



Título del trabajo de grado

Propuesta para la implementación de un sistema de producción de gas mediante biodigestión como estrategia de sostenibilidad ambiental y económica en zonas rurales, desde la gerencia de proyectos.

Maria Camila Gonzalez Sánchez

Corporación Universitaria Minuto de Dios

Rectoría Virtual

Programa Especialización en Gerencia de Proyectos

enero de 2026

Aprovechamiento energético del bagazo de caña en fincas paneleras rurales

Título del trabajo de grado

Maria Camila Gonzalez Sánchez

Monografía presentado como requisito para optar al título de Especialista en Gerencia de Proyectos

Asesor(a)

Sergio Andrés Zabala Vargas

Doctor en Tecnología Educativa

Corporación Universitaria Minuto de Dios

Rectoría Virtual

Programa Especialización en Gerencia de Proyectos

enero de 2026

Contenido

Lista de tablas	6
Lista de anexos.....	8
Resumen	9
Abstract.....	10
Introducción.....	11
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	13
1.1 Descripción del problema.....	14
1.1.1 Contextualización del problema	15
1.2 La pregunta de investigación.....	17
1.3 Los objetivos de investigación	18
1.3.1 Objetivo general.....	18
1.3.2 Objetivos específicos.....	18
1.4 Justificación de la investigación.....	18
1.4.1 Justificación social, ambiental y productiva	19
1.4.2 Justificación académica e institucional.....	20
2. MARCO DE REFERENCIA.....	22
2.1 Marco de Antecedentes	22
2.2 Marco Teórico	24
2.2.1 Gerencia de proyectos	24
2.2.2 Sostenibilidad en proyectos energéticos	25
2.2.3 Pobreza energética en zonas rurales	25
2.2.4 Biodigestores como tecnología energética	26
2.2.5 Tipos de biodigestores	27

Aprovechamiento energético del bagazo de caña en fincas paneleras rurales	
2.2.6	Funcionamiento de los sistemas de biodigestión.....27
2.2.7	VARIABLES DE OPERACIÓN QUE INFLUYEN EN LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS.....28
2.2.8	Biodigestión y desarrollo rural sostenible.....29
2.3	Marco normativo.....29
2.3.1	Constitución Política de Colombia (1991).....30
2.3.2	Ley 142 de 1994 – Ley de Servicios Públicos Domiciliarios30
2.3.3	Ley 1715 de 2014 – Integración de las Energías Renovables No Convencionales.....31
2.3.4	Decreto 1073 de 2015 – Decreto Único Reglamentario del Sector Minas y Energía31
2.3.5	Resolución 181331 de 2020 – Ministerio de Minas y Energía.....31
2.3.6	Ley 1876 de 2017 – Sistema Nacional de Innovación Agropecuaria32
2.3.7	Agenda 2030 y Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)32
3.	METODOLOGÍA33
3.1	Enfoque y alcance de la investigación33
3.1.1	Alcance de la investigación34
3.2	Población y muestra36
3.2.1	Definición de la población.....36
3.2.2	Cálculo y selección de la muestra.....36
3.2.3	Muestra.....37
3.3	Instrumentos38
3.3.1	Encuesta estructurada39
3.3.2	Entrevista semiestructurada40
3.3.3	Revisión documental.....41
3.3.4	Validación de los instrumentos41
3.3.5	Prueba piloto (confiabilidad).....42
3.4	Descripción de procedimientos42
3.5	Análisis de información44
3.5.1	Preparación, limpieza y organización de los datos.....46
3.5.2	Codificación de la información.....47
3.5.3	Análisis estadístico de la información cuantitativa47
3.5.4	Integración e interpretación de resultados.....48
3.5.5	Presentación de resultados.....48

Aprovechamiento energético del bagazo de caña en fincas paneleras rurales	
3.6 Consideraciones éticas	48
3.6.1 Análisis de consideraciones éticas	48
3.6.2. Instrumentos de aceptación y autorización	49
4 HIPÓTESIS.....	51
4.1 Variables de estudio.....	51
4.1.1 Variable independiente	51
4.1.2 Variable dependiente.....	52
4.2 Consideración metodológica sobre la hipótesis	52
5 RESULTADOS	52
5.1 Presentación de resultados	53
5.1.1 Resultados de la encuesta estructurada	53
5.1.2 Resultados de las entrevistas semiestructuradas.....	64
5.1.3 Resultados de la revisión documental.....	70
5.2 Propuesta de implementación al sector panelero	71
5.2.1 Diseño del biodigestor	71
5.2.2 Estrategia de operación	72
5.2.3 Estrategia de mantenimiento.....	73
5.2.4 Gestión de costos y beneficios.....	73
5.2.5 Integración al sistema productivo panelero.....	74
5.3 Discusión	74
6 Conclusiones	76
7 Referencias.....	78
Anexos.....	81

Lista de tablas

Tabla 1. Conexión al servicio eléctrico en las fincas paneleras

Tabla 2. Frecuencia de interrupciones en el servicio eléctrico

Tabla 3. Percepción sobre la estabilidad del voltaje

Tabla 4. Afectación de los cortes eléctricos en el proceso productivo

Tabla 5. Nivel de afectación del proceso productivo por fallas eléctricas

Tabla 6. Fuente principal de energía térmica para la cocción

Tabla 7. Uso combinado de fuentes energéticas

Tabla 8. Percepción del costo energético actual

Tabla 9. Cantidad de bagazo generado por jornada productiva

Tabla 10. Destino actual del bagazo generado

Tabla 11. Percepción sobre la eficiencia en el aprovechamiento del bagazo

Tabla 12. Conocimiento previo sobre biodigestores

Tabla 13. Disposición a implementar un sistema de biodigestión

Tabla 14. Factores que influyen en la adopción de tecnologías alternativas

Tabla 15. Frecuencia de molienda de caña

Tabla 16. Variabilidad estacional en la generación de bagazo

Tabla 17. Disponibilidad de espacio físico para infraestructura adicional

Tabla 18. Experiencia previa en tecnologías energéticas alternativas

Tabla 19. Matriz de resultados entrevista – Pregunta 1: Acceso actual a energía

Tabla 20. Matriz de resultados entrevista – Pregunta 2: Impacto de cortes eléctricos

Tabla 21. Matriz de resultados entrevista – Pregunta 3: Uso actual del bagazo

Tabla 22. Matriz de resultados entrevista – Pregunta 4: Potencial de aprovechamiento del bagazo

Aprovechamiento energético del bagazo de caña en fincas paneleras rurales

Tabla 23. Matriz de resultados entrevista – Pregunta 5: Conocimiento sobre biodigestores

Tabla 24. Matriz de resultados entrevista – Pregunta 6: Beneficios esperados

Tabla 25. Matriz de resultados entrevista – Pregunta 7: Dificultades percibidas

Tabla 26. Matriz de resultados entrevista – Pregunta 8: Apoyos requeridos

Tabla 27. Matriz de resultados entrevista – Pregunta 9: Disposición a capacitarse

Tabla 28. Matriz de resultados entrevista – Pregunta 10: Cambios esperados

Lista de anexos

Anexo A. Instrumento 1 – Encuesta estructurada a fincas paneleras

Anexo B. Instrumento 2 – Entrevista semiestructurada

Anexo C. Matriz de análisis documental

Resumen

Esta investigación explora, como semilla que busca germinar en la tierra fértil de lo rural, la viabilidad preliminar del aprovechamiento energético del bagazo de caña mediante biodigestión en la finca panelera Los Trapiches, ubicada en la vereda Golconda del municipio de Anapoima (Cundinamarca). El estudio se desarrolló bajo un enfoque mixto, con alcance descriptivo y diseño de estudio de caso, apoyado en encuestas estructuradas a cinco fincas paneleras, entrevistas semiestructuradas a productores y revisión documental especializada.

Los resultados revelan una fuerte dependencia de fuentes tradicionales como la leña y el ACPM, junto con una persistente inestabilidad en el suministro eléctrico que interrumpe la cadencia productiva. Se evidenció además una generación predominante de bagazo superior a 150 kg por jornada en el 80 % de las fincas, con un aprovechamiento aún fragmentario y no planificado. Desde el ámbito social, emergió una disposición favorable hacia tecnologías alternativas, ligada a la necesidad de capacitación y acompañamiento técnico.

A partir de estos hallazgos, se formuló una propuesta preliminar de implementación de un biodigestor tubular de bajo costo, concebida desde la gerencia de proyectos, con el propósito de integrar el bagazo al sistema panelero como fuente energética complementaria. Sin embargo, se concluye que, aunque este residuo encierra un potencial latente, su valorización mediante biodigestión demanda estudios técnicos adicionales, pruebas piloto y fortalecimiento de capacidades locales antes de su aplicación operativa.

Palabras clave: Bagazo De Caña, Biodigestión, Energías Renovables, Producción Panelera, Sostenibilidad Rural.

Abstract

This study explores, like a seed seeking to sprout in rural soil, the preliminary feasibility of using sugarcane bagasse for energy production through biodigestion at the panela farm Los Trapiches, located in the village of Golconda, municipality of Anapoima (Cundinamarca, Colombia). The research followed a mixed-methods approach with a descriptive scope and case study design, supported by structured surveys applied to five panela farms, semi-structured interviews with producers, and specialized documentary review.

The results reveal a strong dependence on traditional energy sources such as firewood and diesel fuel, along with persistent instability in electricity supply that disrupts production processes. Additionally, most farms (80%) generate more than 150 kg of bagasse per working day, yet this residue is used in a limited and unplanned manner. From a social perspective, there is a favorable disposition toward adopting alternative technologies, conditioned by the need for training and technical support.

Based on these findings, a preliminary proposal for implementing a low-cost tubular biodigester was developed under a project management framework, aiming to integrate bagasse into the panela production system as a complementary energy source. Nevertheless, the study concludes that although sugarcane bagasse represents a latent energy resource, its valorization through biodigestion requires further technical studies, pilot testing, and strengthening of local capacities before operational implementation.

Keywords: Sugarcane Bagasse, Biodigestion, Renewable Energy, Panela Production, Rural Sustainability.

Introducción

El acceso limitado a servicios energéticos confiables en zonas rurales continúa siendo un factor que afecta la productividad, la sostenibilidad ambiental y la calidad de vida de las comunidades agrícolas. En el sector panelero, esta situación se expresa en la dependencia de combustibles tradicionales como la leña y el ACPM, así como en la inestabilidad del suministro eléctrico, lo que genera interrupciones en los procesos productivos y mayores costos operativos. Frente a este contexto, resulta necesario explorar alternativas energéticas renovables que permitan mejorar la eficiencia productiva y reducir los impactos ambientales asociados a los modelos energéticos convencionales.

El bagazo de caña, subproducto del proceso de molienda, representa un residuo orgánico con potencial para su aprovechamiento energético mediante biodigestión anaerobia. Esta tecnología permite transformar residuos en biogás, contribuyendo a la gestión sostenible de desechos y al fortalecimiento de la autonomía energética en contextos rurales. Sin embargo, su implementación requiere análisis técnicos, sociales y organizacionales que permitan evaluar su viabilidad y adecuación a las condiciones productivas locales, así como su articulación con herramientas de la gerencia de proyectos.

En este marco, la presente investigación formula una propuesta para la implementación de un sistema de biodigestión en la finca panelera Los Trapiches, ubicada en la vereda Golconda del municipio de Anapoima (Cundinamarca), basada en el análisis cuantitativo del aprovechamiento del bagazo de caña y en metodologías propias de la gerencia de proyectos. El estudio busca evaluar la viabilidad preliminar de esta alternativa como estrategia para mejorar el acceso al gas y a la energía eléctrica de forma sostenible en contextos rurales.

El documento se estructura en seis capítulos conforme al formato institucional. El **Capítulo 1**, *Planteamiento del problema*, presenta el contexto, la problemática energética, la pregunta de investigación, los objetivos y la

justificación del estudio. El **Capítulo 2**, *Marco de referencia*, desarrolla los antecedentes, fundamentos teóricos y normativos relacionados con biodigestión, sostenibilidad energética y gerencia de proyectos. El **Capítulo 3**, *Metodología*, describe el enfoque, diseño, muestra, instrumentos y procedimientos de recolección y análisis de datos. El **Capítulo 4**, *Hipótesis*, expone las variables de estudio y la consideración metodológica correspondiente. El **Capítulo 5**, *Resultados*, presenta los hallazgos obtenidos y la propuesta de implementación del biodigestor. Finalmente, el **Capítulo 6**, *Conclusiones*, integra los principales resultados, limitaciones y recomendaciones para futuras investigaciones.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El acceso a servicios energéticos confiables constituye uno de los principales retos para el desarrollo sostenible de las zonas rurales en Colombia. En este contexto, los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), formulados por las Naciones Unidas en 2015, establecen mediante el ODS 7 la necesidad de garantizar una energía asequible, segura, sostenible y moderna, reconociendo su papel fundamental en sectores estratégicos como la agricultura, la agroindustria rural y el bienestar social (ONU, 2024). La energía, en estos territorios, no solo ilumina hogares: sostiene procesos productivos, preserva alimentos y teje las condiciones mínimas para la dignidad cotidiana.

No obstante, en amplias regiones del país persisten condiciones estructurales de pobreza energética, especialmente en zonas rurales y de difícil acceso. Diversos estudios han evidenciado una relación directa entre el acceso limitado a la energía y los bajos niveles de desarrollo humano, lo que refuerza la necesidad de implementar soluciones energéticas sostenibles orientadas a la reducción de desigualdades territoriales (García, 2014). Esta pobreza energética se expresa cuando los hogares no logran satisfacer sus necesidades básicas de cocción, iluminación, comunicación y acceso a tecnologías esenciales, de acuerdo con sus condiciones sociales y culturales (García, 2014).

En Colombia, el Índice de Pobreza Energética Multidimensional (IPEM) ha permitido identificar que las mayores privaciones energéticas se concentran en las zonas rurales, particularmente en el acceso a electricidad, combustibles modernos para la cocción y medios de comunicación (Villamizar, 2023). A ello se suma que, incluso en áreas formalmente conectadas al sistema eléctrico, la continuidad y calidad del servicio no siempre están garantizadas, debido a la dispersión geográfica, los elevados costos de operación y las limitaciones en la capacidad de pago de los usuarios rurales (CREG, 2017).

En este contexto, el aprovechamiento energético de residuos agroindustriales mediante tecnologías como los biodigestores surge como una alternativa para diversificar la matriz energética rural, reducir la dependencia de combustibles tradicionales y promover la sostenibilidad ambiental. Estudios realizados en agroindustrias rurales

han demostrado que la biodigestión permite valorizar residuos orgánicos, disminuir emisiones contaminantes y mejorar la seguridad energética de pequeñas unidades productivas (FAO, 2017; Bond & Templeton, 2019; Surendra et al., 2020).

Sin embargo, la implementación de estos sistemas en contextos paneleros enfrenta barreras estructurales relacionadas con la limitada disponibilidad de capital para la inversión inicial, la escasa asistencia técnica especializada, la variabilidad en la cantidad y composición de la biomasa disponible y la falta de experiencia local en el manejo de tecnologías de digestión anaerobia. Asimismo, se identifican desafíos sociales y organizacionales asociados a la apropiación tecnológica, la percepción de riesgo frente a nuevas formas de producción energética y la ausencia de esquemas de acompañamiento institucional continuo, factores que inciden directamente en la sostenibilidad operativa de los sistemas y en su adopción efectiva en contextos rurales (Sánchez & Villada, 2018; Pérez et al., 2022).

1.1 Descripción del problema

En el año 2015, la Organización de las Naciones Unidas trazó una hoja de ruta para el mundo al adoptar los diecisiete Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), concebidos como un llamado colectivo para erradicar la pobreza, proteger el planeta y garantizar condiciones de vida dignas y equitativas hacia el año 2030. Entre ellos, el Objetivo de Desarrollo Sostenible número siete se erige como un pilar transversal, al proponer garantizar el acceso universal a una energía asequible, segura, sostenible y moderna (ONU, 2024).

La energía no es solo un insumo técnico: es la savia invisible que moviliza la agricultura, la industria, la educación, el transporte y la vida cotidiana. Sin embargo, el sistema energético global continúa profundamente anclado a los combustibles fósiles, responsables de más del 60 % de las emisiones de gases de efecto invernadero, configurándose como una de las principales causas del cambio climático (ONU, 2024). Esta dependencia evidencia la urgencia de transitar hacia fuentes limpias y renovables, especialmente en territorios rurales donde la fragilidad del acceso energético profundiza las brechas sociales y económicas.

De manera paralela, diversos estudios han demostrado la estrecha relación entre el acceso a la energía y la superación de la pobreza. Tal como plantea García (2014), mejorar los niveles de desarrollo humano implica necesariamente un incremento en el consumo energético per cápita. En este contexto emerge el concepto de pobreza energética, entendido como la imposibilidad de los hogares para satisfacer necesidades energéticas básicas, de acuerdo con las condiciones sociales, culturales y territoriales en un momento histórico determinado (García, 2014).

En Colombia, la medición de esta problemática se ha abordado mediante el Índice de Pobreza Energética Multidimensional (IPEM), el cual evalúa carencias relacionadas con el acceso a combustibles modernos para cocción, electricidad, electrodomésticos esenciales, tecnologías de información y medios de comunicación (Villamizar, 2023). Los resultados evidencian que la pobreza energética se manifiesta con mayor intensidad en las zonas rurales, donde persisten limitaciones significativas en el acceso a electricidad confiable, conectividad y servicios energéticos básicos (García, 2023).

A esta realidad se suma una dificultad estructural: existen territorios rurales dispersos que, aun estando formalmente conectados al sistema eléctrico, no cuentan con un servicio sostenible en el tiempo. La lejanía geográfica, las vías de difícil acceso y los altos costos de operación hacen que la prestación del servicio no resulte económicamente viable para las empresas comercializadoras, generando interrupciones frecuentes, deterioro en la calidad del suministro y precariedad en la cobertura (CREG, 2017). Esta situación se ve agravada por los bajos niveles de consumo y la limitada capacidad de pago de los usuarios, quienes además enfrentan barreras logísticas para el acceso regular al servicio.

1.1.1 Contextualización del problema

Esta problemática se manifiesta de manera concreta en la vereda La Golconda, ubicada en el municipio de Anapoima, departamento de Cundinamarca. Allí se encuentra la finca panelera *Los Trapiches*, una unidad

productiva rural dedicada a la elaboración artesanal de panela, actividad que no solo sostiene la economía local, sino que preserva saberes tradicionales, fortalece la identidad campesina y genera empleo en condiciones de alta vulnerabilidad estructural.

No obstante, la finca opera en un entorno caracterizado por la ausencia de servicios públicos básicos de energía eléctrica confiable y gas natural. Esta carencia impacta de forma directa la cadena productiva de la panela, incrementando los costos de operación, reduciendo la eficiencia energética de los procesos térmicos y generando dependencia de fuentes contaminantes e inestables. La cocción de la caña y el funcionamiento de las calderas dependen principalmente de combustibles tradicionales, lo que prolonga los tiempos productivos, eleva los costos logísticos y limita la competitividad del sistema productivo.

Paradójicamente, el mismo proceso agroindustrial genera un recurso con alto potencial energético: el bagazo de caña. Este residuo orgánico, subproducto de la molienda, suele ser subutilizado o dispuesto de forma inadecuada, pese a su elevada biodegradabilidad y capacidad para convertirse en sustrato apto para la producción de biogás mediante sistemas de digestión anaerobia (CAR, 2019). No obstante, su aprovechamiento energético enfrenta barreras técnicas como la estacionalidad en la producción, la necesidad de pretratamiento del material lignocelulósico y la ausencia de infraestructura adecuada para su manejo, lo que limita su valorización energética efectiva.

Adicionalmente, la finca Los Trapiches se encuentra ante una coyuntura estratégica asociada al crecimiento de los mercados de productos orgánicos y de comercio justo, los cuales demandan procesos productivos ambientalmente responsables y socialmente sostenibles. Sin embargo, el acceso a estos mercados exige el fortalecimiento de la infraestructura energética, la reducción de la huella ambiental del proceso productivo y la adopción de modelos de gestión más eficientes, aspectos que actualmente se ven restringidos por la precariedad energética del territorio.

La problemática central radica, entonces, en la limitada capacidad de la finca panelera Los Trapiches para garantizar un acceso estable, sostenible y eficiente a los servicios de energía eléctrica y gas, así como en la ausencia de condiciones técnicas, económicas y organizacionales para implementar tecnologías alternativas como

los biodigestores. Esta situación afecta directamente su productividad, competitividad y sostenibilidad ambiental, y se inscribe en un contexto más amplio de déficit de cobertura energética rural identificado por la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME) a través del Plan Indicativo de Expansión de Cobertura (PIEC).

En el caso específico de la industria panelera, la falta de acceso a servicios energéticos modernos ha derivado en prácticas ambientalmente nocivas, como la quema inadecuada de residuos sólidos —bagazo, bagacillo, cachaza y cenizas— y el uso de llantas usadas como combustible, lo cual genera emisiones contaminantes como monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre y material particulado, con efectos adversos sobre la salud humana y los ecosistemas locales (CAR, 2019).

Considerando que la caña de azúcar es uno de los cultivos más relevantes en climas tropicales y que en Colombia aporta un porcentaje significativo al PIB agrícola nacional (Asocaña, 2020; Manotas & Manyoma, 2022), resulta evidente la necesidad de incorporar soluciones energéticas renovables que fortalezcan la sostenibilidad del sector. En este escenario, la biodigestión emerge como una alternativa tecnológica viable para transformar un residuo en oportunidad, convertir la carga ambiental en energía útil y abrir caminos hacia modelos productivos más resilientes y circulares en el contexto rural panelero.

1.2 La pregunta de investigación

¿Cómo puede formularse una propuesta de implementación de un sistema de biodigestión en la finca panelera Los Trapiches, a partir del análisis cuantitativo del potencial energético del bagazo de caña y del uso de herramientas de la gerencia de proyectos, que contribuya a mejorar el acceso al gas y la energía eléctrica de manera sostenible?

1.3 Los objetivos de investigación

1.3.1 Objetivo general

Formular una propuesta para la implementación de un sistema de biodigestión en la finca panelera Los Trapiches, basada en el análisis cuantitativo del aprovechamiento del bagazo de caña y en herramientas de la gerencia de proyectos, que permita mejorar el acceso al gas y la energía eléctrica de forma sostenible.

1.3.2 Objetivos específicos

- Diagnosticar la situación energética actual de la finca panelera Los Trapiches, identificando las fuentes de energía utilizadas, la estabilidad del servicio y los costos asociados.
- Cuantificar la disponibilidad de bagazo de caña generado en el proceso productivo y estimar su potencial energético para la producción de biogás.
- Analizar los requerimientos técnicos básicos para la implementación de un sistema de biodigestión acorde con las condiciones productivas y ambientales de la finca.
- Integrar herramientas y metodologías de la gerencia de proyectos para estructurar una propuesta viable, considerando riesgos, costos y criterios de sostenibilidad.

1.4 Justificación de la investigación

Investigar es un acto de responsabilidad con el territorio, con el tiempo que habitamos y con las generaciones que vendrán. Esta investigación surge de una pregunta esencial: **¿cómo transformar una carencia energética en una oportunidad de desarrollo sostenible?** En el contexto rural colombiano, donde la energía aún llega de

forma intermitente o no llega, pensar soluciones locales, limpias y gestionadas con criterio técnico deja de ser una opción para convertirse en un deber académico y social.

La formulación de una propuesta para implementar un sistema de biodigestión en la finca panelera Los Trapiches responde a una necesidad concreta del sector agroindustrial rural: garantizar el acceso estable al gas y a la energía eléctrica, reducir los costos productivos y mitigar los impactos ambientales derivados del uso de combustibles contaminantes. Este proyecto no se limita a describir una problemática; propone un camino viable, sustentado en el análisis cuantitativo del potencial energético del bagazo de caña y en herramientas propias de la gerencia de proyectos, lo que le otorga solidez técnica y pertinencia práctica.

Desde una perspectiva académica, la investigación aporta al cuerpo de conocimiento relacionado con energías renovables aplicadas a contextos rurales productivos, un campo que, aunque en expansión, aún requiere estudios contextualizados que integren variables técnicas, económicas y de gestión. La biodigestión ha sido reconocida como una alternativa eficiente para el aprovechamiento de residuos orgánicos y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, especialmente en economías rurales basadas en la agricultura (FAO, 2018; Ministerio de Minas y Energía, 2022). En este sentido, el proyecto contribuye a cerrar la brecha entre la teoría y la aplicación real de estas tecnologías.

Asimismo, los objetivos planteados responden a la necesidad de pasar del diagnóstico general a la formulación estructurada de soluciones. No se trata únicamente de identificar el potencial energético del bagazo de caña, sino de traducirlo en una propuesta gestionable, evaluable y replicable, alineada con los principios de sostenibilidad y con el marco normativo colombiano que promueve el uso de energías renovables no convencionales (UPME, 2023).

1.4.1 Justificación social, ambiental y productiva

Desde el punto de vista social y comunitario, la investigación beneficia directamente a la finca Los Trapiches y, de manera indirecta, a las comunidades rurales cercanas. La implementación de un sistema de biodigestión

permitiría mejorar la calidad de vida de los productores y trabajadores rurales al garantizar una fuente energética más segura, reducir la exposición al humo generado por combustibles tradicionales y fortalecer la autosuficiencia energética local. Estas mejoras se alinean con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, particularmente con los relacionados con energía asequible y no contaminante, salud y bienestar, y reducción de la pobreza (ONU, 2024).

En el ámbito ambiental, el proyecto promueve una gestión responsable de los residuos agroindustriales. El bagazo de caña, que actualmente representa un problema ambiental cuando es mal dispuesto o incinerado, se convierte en un recurso valioso para la generación de biogás, reduciendo la contaminación atmosférica y las emisiones de gases de efecto invernadero (CAR, 2019). De este modo, la investigación aporta a la transición hacia modelos de producción más limpios y circulares, donde los residuos se integran nuevamente al ciclo productivo.

Productivamente, la finca panelera obtiene una oportunidad estratégica para fortalecer su competitividad. Al reducir la dependencia de fuentes energéticas externas y costosas, se optimizan los procesos, se disminuyen los tiempos muertos y se mejora la eficiencia de la cadena productiva de la panela. Esto resulta especialmente relevante en un contexto donde el mercado valora cada vez más los productos elaborados bajo criterios de sostenibilidad ambiental y responsabilidad social (Asocaña, 2020).

1.4.2 Justificación académica e institucional

Para los estudiantes investigadores, este proyecto representa una experiencia formativa integral. Permite aplicar conocimientos teóricos de gerencia de proyectos, análisis energético y sostenibilidad en un contexto real, fortaleciendo competencias investigativas, analíticas y éticas. El estudiante no solo aprende a formular proyectos, sino a comprender el impacto de sus decisiones sobre territorios y comunidades específicas.

Para la especialización y los programas de posgrado de UNIMINUTO Virtual, la investigación aporta un caso aplicado que refuerza el enfoque social de la institución, coherente con su misión de transformación territorial y

desarrollo humano integral. El proyecto se convierte en un referente académico que demuestra cómo la gerencia de proyectos puede ser una herramienta para el cambio social y ambiental, más allá de la rentabilidad económica.

Finalmente, la institución gana al fortalecer su producción investigativa con un trabajo pertinente, contextualizado y alineado con las políticas nacionales de sostenibilidad y energías renovables. La investigación dialoga con los retos del país, aporta soluciones desde el conocimiento y reafirma el papel de la academia como actor clave en la construcción de un desarrollo rural más justo, eficiente y sostenible.

2. MARCO DE REFERENCIA

2.1 Marco de Antecedentes

Para el desarrollo de la presente investigación se realizó una revisión sistemática de literatura científica publicada en los últimos siete años (2018–2024), con el fin de identificar antecedentes teóricos, metodológicos y tecnológicos relacionados con la energización rural sostenible, el aprovechamiento de biomasa agrícola, la producción de biogás mediante biodigestión y la formulación de proyectos energéticos en contextos rurales.

La ecuación de búsqueda empleada fue: “energización rural” OR “energías renovables rurales” OR “biomasa agrícola” OR “biodigestión” OR “biogás” OR “sistemas energéticos descentralizados” OR “gestión de proyectos energéticos”. La búsqueda se realizó en las bases de datos Google Scholar, Scopus, ScienceDirect, Redalyc, Scielo y Dialnet, priorizando artículos científicos, capítulos de libro e informes técnicos de organismos internacionales.

Garfí et al. (2018) analizan la implementación de biodigestores anaerobios de pequeña escala en comunidades rurales de América Latina, evidenciando su potencial para transformar residuos agropecuarios en biogás y biofertilizantes. El estudio concluye que esta tecnología contribuye a la reducción de emisiones contaminantes, mejora la autosuficiencia energética y fortalece las economías campesinas, siempre que exista acompañamiento técnico y apropiación social del sistema.

Bond y Templeton (2019) presentan una revisión comparativa de sistemas descentralizados de energía renovable en zonas rurales, incluyendo energía solar, microhidráulica y biomasa. Los autores destacan que la biomasa resulta especialmente viable en territorios agrícolas debido a la disponibilidad constante de residuos orgánicos, lo que la convierte en una alternativa estratégica para contextos productivos rurales.

Surendra et al. (2020) evalúan el rendimiento energético de biodigestores alimentados con residuos agroindustriales, demostrando que el biogás puede sustituir de manera significativa el uso de combustibles fósiles

en procesos productivos. El estudio resalta que la gestión adecuada del proyecto es un factor determinante para garantizar la estabilidad operativa y la sostenibilidad del sistema.

La FAO (2020), en su informe sobre bioenergía y desarrollo rural sostenible, señala que los sistemas de biogás permiten integrar la gestión de residuos, la producción de energía y la fertilización de suelos, cerrando ciclos productivos. El documento enfatiza que los proyectos exitosos son aquellos formulados desde un enfoque territorial, participativo y alineado con las dinámicas productivas locales.

Nguyen et al. (2021) analizan modelos de implementación de biodigestores en pequeñas agroindustrias rurales, identificando barreras financieras, técnicas y organizacionales. Los autores proponen esquemas de gestión por fases y evaluaciones costo-beneficio como herramientas para reducir riesgos y mejorar la viabilidad de los proyectos de biodigestión.

Rodríguez y López (2021) estudian experiencias de producción de biogás en zonas cañeras y paneleras de América Latina, encontrando que el aprovechamiento de residuos de la caña de azúcar contribuye a mejorar la eficiencia energética del proceso productivo. El estudio concluye que la biodigestión representa una alternativa estratégica para la sostenibilidad ambiental y económica de la agroindustria panelera.

Muñoz-Sarria y Bueno-López (2022) proponen una metodología multicriterio para la selección de tecnologías energéticas en zonas no interconectadas, incorporando variables técnicas, económicas, sociales y ambientales. Los resultados evidencian que, en contextos con alta disponibilidad de residuos orgánicos, la biomasa ocupa un lugar prioritario dentro de las alternativas energéticas sostenibles.

La Agencia Internacional de Energía – IEA (2022) destaca en su informe sobre transición energética rural que las soluciones basadas en biomasa son fundamentales para sectores agrícolas, ya que permiten una generación energética continua y reducen la dependencia de combustibles fósiles. Este informe aporta una visión global que respalda la biodigestión como tecnología clave para el desarrollo rural sostenible.

Pérez et al. (2023) analizan la integración de biodigestores en pequeñas unidades agroindustriales, concluyendo que el éxito de estos sistemas depende de una adecuada planificación del proyecto, la definición de indicadores de desempeño y la capacitación de los usuarios. El estudio refuerza la importancia de abordar la biodigestión desde la gerencia de proyectos.

Finalmente, González y Herrera (2024) presentan un estudio reciente sobre modelos de gestión de proyectos de bioenergía en zonas rurales, señalando que la articulación entre sostenibilidad ambiental, viabilidad económica y gestión eficiente es determinante para la permanencia de los sistemas energéticos. Este trabajo aporta un marco actualizado y pertinente para la formulación del proyecto objeto de esta investigación.

2.2 Marco Teórico

El marco teórico es el suelo firme donde la investigación aprende a caminar. En él se entrelazan conceptos, teorías y referentes que permiten comprender el problema, orientar las decisiones metodológicas y sustentar la formulación de estrategias viables. Para el presente proyecto, se desarrollan ocho ejes conceptuales que articulan la gerencia de proyectos con la sostenibilidad energética, la pobreza energética rural y el uso de biodigestores como tecnología apropiada para contextos agro productivos.

2.2.1 Gerencia de proyectos

La gerencia de proyectos se entiende como la disciplina que integra conocimientos, habilidades, herramientas y técnicas para dirigir un proyecto desde su concepción hasta su cierre, garantizando el cumplimiento de los objetivos definidos en términos de alcance, tiempo, costo y calidad (PMI, 2021). En proyectos de carácter social y energético, esta disciplina permite ordenar la complejidad, gestionar riesgos y alinear los recursos con las necesidades reales del territorio, convirtiéndose en un eje estratégico para la toma de decisiones informadas y sostenibles (Kerzner, 2022).

En contextos rurales, la gerencia de proyectos adquiere una dimensión particular, al requerir la articulación entre factores técnicos, sociales, económicos y ambientales, así como la adaptación de metodologías a escenarios caracterizados por restricciones de infraestructura, financiamiento limitado y alta dependencia de recursos locales. De este modo, la planificación, el monitoreo y la evaluación se convierten en instrumentos esenciales para asegurar la viabilidad y permanencia de las soluciones energéticas implementadas.

2.2.2 Sostenibilidad en proyectos energéticos

La sostenibilidad aplicada a los proyectos energéticos implica equilibrar tres dimensiones interdependientes: ambiental, económica y social. Desde esta perspectiva, un proyecto es sostenible cuando reduce impactos ambientales, es económicamente viable y mejora las condiciones de vida de la comunidad beneficiaria (Brundtland, 1987; ONU, 2023). Esta visión reconoce que el desarrollo no puede medirse únicamente en términos de crecimiento económico, sino en la capacidad de los sistemas productivos para mantenerse en el tiempo sin comprometer los recursos de las generaciones futuras.

En el ámbito rural, la sostenibilidad energética se traduce en soluciones que aprovechan recursos locales, disminuyen la dependencia de combustibles fósiles y fortalecen la autonomía comunitaria. Tecnologías como la biodigestión se inscriben en este enfoque al integrar producción de energía limpia, manejo adecuado de residuos y fortalecimiento de economías locales, promoviendo modelos circulares de producción y consumo.

2.2.3 Pobreza energética en zonas rurales

La pobreza energética se define como la incapacidad de los hogares para acceder a servicios energéticos modernos, seguros y asequibles que permitan satisfacer sus necesidades básicas de cocción, iluminación,

comunicación y confort térmico. En Colombia, esta condición afecta de manera desproporcionada a las zonas rurales, donde el acceso a gas para cocción y a energía eléctrica confiable sigue siendo limitado (DNP, 2011; AFE, 2024). Esta situación obliga a las comunidades a utilizar leña, residuos o carbón, lo que genera impactos negativos sobre la salud —particularmente enfermedades respiratorias—, el ambiente y la productividad.

Desde una perspectiva estructural, la pobreza energética no solo refleja carencias materiales, sino también desigualdades territoriales en el acceso a infraestructura, servicios públicos y oportunidades de desarrollo. Por ello, las soluciones energéticas rurales requieren enfoques integrales que combinen tecnología apropiada, fortalecimiento de capacidades locales y modelos de gestión sostenibles, orientados a garantizar la continuidad y apropiación social de las iniciativas.

2.2.4 Biodigestores como tecnología energética

Los biodigestores son sistemas tecnológicos que permiten transformar residuos orgánicos en biogás mediante procesos de digestión anaerobia, es decir, en ausencia de oxígeno. El biogás producido, compuesto principalmente por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), puede utilizarse como combustible para la cocción de alimentos, calefacción o generación de energía eléctrica, mientras que el subproducto líquido y sólido, conocido como digestato, se emplea como biofertilizante en actividades agrícolas (Garfí et al., 2018).

Esta tecnología resulta especialmente pertinente en contextos rurales productivos, ya que aprovecha residuos agrícolas, pecuarios y agroindustriales, reduce la carga contaminante de los desechos orgánicos y contribuye al cierre de ciclos de materia y energía. Además, los biodigestores permiten disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a la descomposición no controlada de residuos y al uso de combustibles fósiles, alineándose con los principios de economía circular y sostenibilidad ambiental.

2.2.5 Tipos de biodigestores

Existen diversos tipos de biodigestores, cuya selección depende de factores como la disponibilidad de biomasa, las condiciones climáticas, los recursos económicos y el uso previsto del biogás. Entre los más utilizados en contextos rurales se encuentran:

- **Biodigestores de cúpula fija**, contruidos generalmente en concreto, caracterizados por su durabilidad, bajo mantenimiento y adecuada estanqueidad, aunque requieren mayor inversión inicial y precisión constructiva (FAO, 2011).
- **Biodigestores de campana flotante**, en los cuales el gas se almacena en una cúpula metálica móvil que se desplaza según el volumen producido. Si bien permiten un control visual del biogás disponible, presentan mayores costos de mantenimiento debido a la corrosión de sus componentes metálicos (Bond & Templeton, 2011).
- **Biodigestores tipo tubular o de bolsa**, fabricados en materiales plásticos flexibles, de bajo costo y rápida instalación, ampliamente utilizados en zonas rurales de América Latina por su adaptabilidad y simplicidad operativa, aunque presentan menor vida útil y mayor vulnerabilidad a daños físicos (Garfí et al., 2018).

La elección del tipo de biodigestor constituye una decisión estratégica dentro del diseño del proyecto, pues influye en la eficiencia del sistema, los costos de implementación, la facilidad de operación y la sostenibilidad a largo plazo.

2.2.6 Funcionamiento de los sistemas de biodigestión

El proceso de biodigestión se desarrolla a través de una secuencia de etapas microbiológicas que permiten la transformación de la materia orgánica en biogás: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. En la

hidrólisis, los polímeros complejos como carbohidratos, lípidos y proteínas se descomponen en compuestos más simples; posteriormente, en la acidogénesis y acetogénesis, estos compuestos se convierten en ácidos orgánicos, hidrógeno y dióxido de carbono; finalmente, en la metanogénesis, microorganismos especializados producen metano como producto final (Appels et al., 2008).

Este proceso requiere condiciones ambientales controladas dentro del biodigestor, particularmente en términos de temperatura, pH y ausencia de oxígeno. El equilibrio entre los diferentes grupos microbianos es esencial para mantener la estabilidad del sistema y garantizar una producción constante de biogás, razón por la cual el monitoreo y la gestión operativa constituyen componentes críticos en la implementación de esta tecnología.

2.2.7 Variables de operación que influyen en la producción de biogás

La eficiencia de un biodigestor depende de múltiples variables técnicas y operativas, entre las cuales destacan:

- **Tipo y composición del sustrato:** La relación carbono/nitrógeno (C/N), el contenido de lignocelulosa y la biodegradabilidad del material influyen directamente en la producción de biogás (Surendra et al., 2020).
- **Temperatura de operación:** Los sistemas mesofílicos (30–40 °C) son los más comunes en contextos rurales, debido a su estabilidad y menores requerimientos energéticos frente a los sistemas termofílicos (50–60 °C) (Appels et al., 2008).
- **pH del medio:** Un rango óptimo entre 6,5 y 7,5 favorece la actividad metanogénica; desviaciones prolongadas pueden inhibir la producción de gas.
- **Tiempo de retención hidráulica (TRH):** Determina el tiempo durante el cual el sustrato permanece en el biodigestor, influyendo en la degradación de la materia orgánica y en el volumen de biogás producido.

- **Carga orgánica aplicada:** Excesos pueden provocar acidificación del sistema, mientras que cargas insuficientes reducen la eficiencia energética del proceso (Bond & Templeton, 2011).

La comprensión y gestión adecuada de estas variables resulta fundamental para asegurar el desempeño técnico del biodigestor y la sostenibilidad operativa del proyecto.

2.2.8 Biodigestión y desarrollo rural sostenible

La biodigestión se ha consolidado como una estrategia clave para el desarrollo rural sostenible, al integrar la gestión de residuos, la producción de energía limpia y la mejora de la economía local. Diversos estudios evidencian que la implementación de biodigestores contribuye a la reducción de costos energéticos, la mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero y el fortalecimiento de la seguridad energética en comunidades rurales (Surendra et al., 2020; Bond & Templeton, 2019).

Desde la gerencia de proyectos, la biodigestión no se aborda únicamente como una solución técnica, sino como un proceso estratégico que requiere planificación, gestión de riesgos, participación comunitaria y visión de largo plazo. En este sentido, los biodigestores emergen no solo como infraestructuras físicas, sino como nodos de transformación territorial, capaces de convertir residuos en energía, fragilidad en resiliencia y escasez en oportunidad productiva.

2.3 Marco normativo

La implementación de sistemas de biodigestión en contextos rurales se encuentra respaldada por un entramado normativo colombiano que articula la protección ambiental, el desarrollo sostenible, la seguridad energética y la innovación en el sector agropecuario. Este marco legal establece las bases jurídicas que legitiman y orientan

proyectos de generación de biogás y energía eléctrica a partir de residuos orgánicos, especialmente en zonas rurales con limitaciones de acceso a servicios públicos convencionales.

2.3.1 Constitución Política de Colombia (1991)

La Constitución Política constituye el pilar normativo fundamental que ampara el desarrollo de tecnologías limpias como los biodigestores. El **artículo 79** consagra el derecho colectivo a gozar de un ambiente sano, mientras que el **artículo 80** impone al Estado el deber de planificar el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales para garantizar su desarrollo sostenible, conservación y restauración. De manera complementaria, el **artículo 334** faculta al Estado para intervenir en la economía con el fin de racionalizar el uso de los recursos y promover un desarrollo armónico y sostenible (Constitución Política de Colombia, 1991).

Estos principios constitucionales legitiman la adopción de sistemas de biodigestión como estrategias de aprovechamiento eficiente de residuos orgánicos y mitigación de impactos ambientales.

2.3.2 Ley 142 de 1994 – Ley de Servicios Públicos Domiciliarios

La Ley 142 de 1994 establece el régimen jurídico de los servicios públicos domiciliarios en Colombia, reconociéndolos como esenciales para mejorar la calidad de vida de la población. En sus **artículos 1 y 2**, se prioriza la prestación eficiente y equitativa de estos servicios, especialmente en zonas rurales y de difícil acceso. El **artículo 28** permite la adopción de soluciones energéticas alternativas cuando la prestación convencional no es técnica o económicamente viable, abriendo un espacio normativo para la implementación de biodigestores como sistemas autónomos de generación de gas y energía eléctrica (Congreso de la República, 1994).

2.3.3 Ley 1715 de 2014 – Integración de las Energías Renovables No Convencionales

La Ley 1715 de 2014 constituye el principal referente normativo para la promoción de fuentes no convencionales de energía renovable en Colombia. Esta ley reconoce explícitamente el **biogás** como una fuente energética renovable, promoviendo su integración al sistema energético nacional. El **artículo 1** fomenta el uso de energías limpias para garantizar la sostenibilidad energética, mientras que el **artículo 3** establece la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero como objetivo estratégico. Adicionalmente, el **artículo 8** contempla incentivos tributarios para proyectos que incorporen este tipo de tecnologías, fortaleciendo la viabilidad económica de los biodigestores en entornos rurales (Congreso de la República, 2014).

2.3.4 Decreto 1073 de 2015 – Decreto Único Reglamentario del Sector Minas y Energía

El Decreto 1073 de 2015 reglamenta la Ley 1715 y define los lineamientos técnicos y operativos para la integración de energías renovables en el territorio nacional. En el **Título 2**, se establecen disposiciones específicas para proyectos de generación con fuentes no convencionales en zonas rurales y no interconectadas. El **artículo 2.2.3.3.1** orienta la planeación, instalación y operación de tecnologías limpias, dentro de las cuales se incluyen los sistemas de biodigestión, garantizando criterios de seguridad, eficiencia y sostenibilidad (Ministerio de Minas y Energía, 2015).

2.3.5 Resolución 181331 de 2020 – Ministerio de Minas y Energía

La Resolución 181331 de 2020 establece lineamientos técnicos para la implementación de soluciones energéticas sostenibles en Zonas No Interconectadas (ZNI). Esta norma promueve tecnologías descentralizadas que utilicen recursos locales, como la biomasa, para la generación de energía con impacto social y ambiental positivo. Los biodigestores se enmarcan dentro de estas soluciones, al permitir la producción de biogás a partir de residuos

agroindustriales, reduciendo la dependencia de combustibles fósiles y fortaleciendo la autosuficiencia energética rural (Ministerio de Minas y Energía, 2020).

2.3.6 Ley 1876 de 2017 – Sistema Nacional de Innovación Agropecuaria

La Ley 1876 de 2017 fortalece el Sistema Nacional de Innovación Agropecuaria y promueve la incorporación de tecnologías sostenibles en el sector rural. El **artículo 3** impulsa proyectos de innovación orientados a mejorar la productividad y sostenibilidad del sector agropecuario, mientras que el **artículo 10** establece mecanismos de apoyo técnico y financiero para iniciativas que integren soluciones tecnológicas limpias. Los biodigestores se alinean con esta normativa al transformar residuos agrícolas en energía y biofertilizantes, fortaleciendo la economía circular en el sector panelero (Congreso de la República, 2017).

2.3.7 Agenda 2030 y Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

En el ámbito internacional, la Agenda 2030 de las Naciones Unidas constituye un referente estratégico para el desarrollo sostenible. El **Objetivo de Desarrollo Sostenible 7** promueve el acceso a energía asequible, segura y sostenible, mientras que el **ODS 13** insta a adoptar medidas urgentes contra el cambio climático. La implementación de biodigestores contribuye directamente al cumplimiento de estos objetivos al generar energía renovable, reducir emisiones contaminantes y mejorar las condiciones de vida en comunidades rurales (ONU, 2015).

Síntesis normativa

En conjunto, el marco normativo colombiano e internacional respalda de manera sólida la implementación de sistemas de biodigestión en zonas rurales. Estas disposiciones no solo legitiman jurídicamente el proyecto, sino que lo integran a las políticas públicas de sostenibilidad, transición energética e innovación rural. Así, la propuesta de implementación de un biodigestor en la finca panelera Los Trapiches se configura como una

respuesta coherente, legalmente viable y estratégicamente alineada con los principios del desarrollo sostenible y la equidad energética.

3. METODOLOGÍA

La presente investigación adopta un **enfoque mixto**, con predominio cuantitativo y apoyo cualitativo, bajo un diseño de estudio de caso. El componente cuantitativo se orienta a caracterizar las condiciones energéticas, la generación de bagazo y la percepción frente a alternativas energéticas mediante encuestas estructuradas aplicadas a fincas paneleras rurales. El componente cualitativo complementa este análisis a través de entrevistas semiestructuradas dirigidas a actores clave de la finca Los Trapiches, con el fin de profundizar en los procesos productivos, las prácticas de manejo del bagazo y las expectativas frente a la implementación de un biodigestor.

Este enfoque permite integrar información numérica objetiva con interpretaciones contextuales que fortalecen la comprensión del fenómeno estudiado y la formulación de una propuesta de implementación ajustada a las condiciones reales del territorio.

3.1 Enfoque y alcance de la investigación

La investigación se desarrolló bajo un **enfoque mixto**, dado que integró técnicas cuantitativas y cualitativas para el análisis del aprovechamiento energético del bagazo de caña en el contexto panelero rural. Desde el componente cuantitativo, se aplicó una encuesta estructurada a cinco fincas paneleras, lo que permitió caracterizar las condiciones energéticas, los patrones de consumo y la disponibilidad de biomasa mediante datos medibles y comparables.

De manera complementaria, se empleó un enfoque cualitativo a través de **entrevistas semiestructuradas** realizadas a responsables directos de la finca Los Trapiches, con el propósito de profundizar en percepciones, experiencias, barreras y expectativas asociadas a la adopción de tecnologías de biodigestión. Esta combinación metodológica permitió triangular los datos obtenidos, fortalecer la validez de los resultados y comprender el fenómeno estudiado desde una perspectiva integral.

En consecuencia, el estudio no se limita a un enfoque exclusivamente cuantitativo, sino que adopta un diseño mixto con predominio descriptivo, coherente con los instrumentos aplicados y con la presentación de resultados desarrollada en el capítulo correspondiente.

3.1.1 Alcance de la investigación

El estudio presenta un **alcance descriptivo–propositivo**, ya que busca, por una parte, caracterizar la situación energética actual y la disponibilidad de bagazo en el contexto panelero rural, y, por otra, formular una propuesta preliminar de implementación de un sistema de biodigestión desde la gerencia de proyectos.

En cuanto al **alcance temporal**, la investigación se desarrolló entre **agosto de 2025 y enero de 2026**, periodo que comprende la formulación del problema, el diseño metodológico, la recolección y análisis de la información, la estructuración de la propuesta y la elaboración del documento final hasta su entrega oficial.

Límites temporales

La investigación se desarrolló entre el 3 de marzo y la entrega final del documento en mayo de 2025, periodo durante el cual se realizaron las fases de diagnóstico energético, recolección de datos productivos, análisis técnico, estructuración del modelo de biodigestor y formulación de la propuesta bajo criterios de planificación y

viabilidad. Este lapso permitió observar el comportamiento operativo del sistema productivo durante un ciclo completo de molienda, asegurando consistencia en la información recolectada.

Límites espaciales

El estudio se circunscribe a la finca panelera Los Trapiches, ubicada en la vereda Golconda del municipio de Anapoima (Cundinamarca), cuyas condiciones productivas, climáticas y socioeconómicas son representativas de otras unidades paneleras rurales de la región andina colombiana, lo que otorga potencial de transferencia y replicabilidad a los resultados obtenidos.

Límites temáticos

La investigación se centra exclusivamente en la generación de biogás y energía térmica a partir del bagazo de caña, la formulación del proyecto bajo criterios técnicos y gerenciales y el análisis de su sostenibilidad ambiental, económica y social. No contempla la construcción física ni la operación real del biodigestor, ni la comparación entre diferentes tecnologías energéticas alternativas, sino la estructuración de una propuesta técnicamente fundamentada para su futura implementación.

Relevancia del estudio

La relevancia del estudio radica en su capacidad de transformar un residuo agroindustrial subutilizado en una oportunidad energética, productiva y ambientalmente sostenible. Aporta evidencia empírica al campo de la gerencia de proyectos rurales, fortalece el conocimiento aplicado sobre biodigestión en contextos paneleros y ofrece una herramienta replicable para la mitigación de la pobreza energética en territorios rurales. Asimismo, contribuye a los objetivos nacionales de transición energética y economía circular al proponer una solución local

que integra gestión de residuos, producción de energía limpia y fortalecimiento de la autonomía productiva campesina.

3.2 Población y muestra

3.2.1 Definición de la población

La población de referencia está conformada por fincas paneleras rurales que presentan acceso limitado o inestable a los servicios de energía eléctrica y gas, generan residuos orgánicos aprovechables —principalmente bagazo de caña— y desarrollan procesos productivos artesanales o semiartesanales en contextos de economía campesina. Asimismo, la población incluye a los propietarios, administradores y operarios responsables de la gestión productiva y energética de dichas unidades.

3.2.2 Cálculo y selección de la muestra

Dado el carácter descriptivo y de estudio de caso de la investigación, se emplea un muestreo **intencional no probabilístico**, orientado a seleccionar unidades productivas y actores clave que permitan una caracterización precisa del fenómeno energético y productivo analizado.

Criterios de inclusión de fincas:

- Fincas paneleras en operación activa durante el periodo de estudio.
- Generación constante de bagazo de caña como residuo principal.
- Disponibilidad de registros básicos de producción y consumo energético.
- Disposición voluntaria de los propietarios o administradores para participar.

Criterios de exclusión:

- Fincas sin actividad productiva vigente.
- Unidades con producción intermitente o sin generación significativa de bagazo.
- Negativa a autorizar la recolección de información.

3.2.3 Muestra

La muestra estuvo conformada por:

- **Cinco (5) fincas paneleras rurales** ubicadas en la vereda Golconda del municipio de Anapoima, utilizadas para la aplicación de encuestas estructuradas orientadas a caracterizar patrones de consumo energético, interrupciones del servicio eléctrico y generación de residuos orgánicos.
- **Ocho (8) participantes** entre propietarios y administradores de dichas fincas, quienes respondieron las encuestas estructuradas.
- **Dos (2) responsables directos de la finca Los Trapiches**, seleccionada como estudio de caso principal, quienes aportaron información técnica y productiva específica para la formulación detallada de la propuesta de biodigestión.

Revisión documental:

Se analizaron **doce (12) documentos técnicos y científicos**, seleccionados bajo los siguientes criterios:

- Publicaciones entre 2010 y 2024.
- Estudios sobre biodigestores rurales, valorización energética de residuos agrícolas o proyectos de energía renovable en contextos rurales.
- Investigaciones desarrolladas en Colombia o en regiones con condiciones climáticas y productivas similares.
- Documentos con respaldo institucional, académico o técnico verificable.

- Esta estructura muestral permitió integrar información empírica directa del contexto de estudio con referentes técnicos consolidados, fortaleciendo la validez, pertinencia y transferibilidad de los resultados obtenidos.

3.3 Instrumentos

La recolección de información se realizó mediante tres instrumentos principales: encuesta estructurada, entrevista semiestructurada y matriz de análisis documental, diseñados para garantizar coherencia con los objetivos del estudio y permitir la triangulación de resultados.

Encuesta estructurada:

Se diseñó una encuesta compuesta por 24 preguntas cerradas, organizadas en cuatro bloques temáticos: condiciones energéticas, consumo de combustibles, generación y manejo del bagazo, y percepción frente a tecnologías alternativas. Este instrumento se orientó a obtener datos cuantitativos sobre patrones de consumo energético, interrupciones del servicio eléctrico y disponibilidad de residuos orgánicos en cinco fincas paneleras rurales.

Entrevista semiestructurada:

Se elaboró una entrevista conformada por 10 preguntas abiertas, dirigida a dos responsables directos de la finca Los Trapiches. Este instrumento permitió profundizar en las dinámicas productivas, la gestión actual del bagazo, las dificultades energéticas percibidas y las expectativas frente a la implementación de un biodigestor, complementando los resultados cuantitativos obtenidos mediante la encuesta.

Matriz de análisis documental:

Se empleó una matriz estructurada para sistematizar información proveniente de estudios científicos, documentos técnicos e informes institucionales relacionados con biodigestores rurales, producción de biogás y sostenibilidad

energética. La matriz incluyó las siguientes categorías: autor/año, tipo de documento, contexto, tecnología analizada, sustrato, variables técnicas, resultados principales y aportes al proyecto.

3.3.1 Encuesta estructurada

Objetivo del instrumento

Recolectar información cuantitativa sobre la producción panelera, el consumo de energía eléctrica y combustibles, la disponibilidad de residuos orgánicos (bagazo de caña) y las contingencias operativas que afectan la continuidad productiva.

Estructura

La encuesta está compuesta por 24 preguntas cerradas de selección única, múltiple y escala ordinal, organizadas en cuatro secciones temáticas.

Categorías y variables

- Producción panelera: volumen de caña procesada, frecuencia de molienda, estacionalidad.
- Consumo energético: tipo de fuente, continuidad del servicio, costos aproximados.
- Residuos orgánicos: cantidad de bagazo generado, forma de disposición actual.
- Contingencias: afectaciones por clima, interrupciones eléctricas, impacto en la producción.

Formato

Instrumento físico con posterior digitalización para análisis en Excel y JASP.

El instrumento completo se presenta en el Anexo A.

3.3.2 Entrevista semiestructurada

Objetivo del instrumento

Explorar, desde la experiencia y percepción de los productores, los procesos operativos de la finca, la gestión del bagazo, las dificultades energéticas y la disposición frente a la implementación de un biodigestor.

Estructura

La entrevista está conformada por 10 preguntas abiertas, orientadas a recoger opiniones, valoraciones, experiencias y expectativas, permitiendo comprender dimensiones cualitativas que complementan los datos cuantitativos obtenidos mediante la encuesta.

Categorías orientadoras

- Organización del proceso productivo.
- Manejo actual de residuos orgánicos.
- Problemáticas energéticas percibidas.
- Expectativas frente al cambio tecnológico.
- Condiciones sociales y económicas del entorno productivo.

Formato

Aplicación presencial, mediante registro escrito y notas de campo por parte del investigador.

∩ La entrevista completa se presenta en el Anexo B.

3.3.3 Revisión documental

Objetivo del instrumento

Analizar literatura científica, técnica e institucional relacionada con biodigestores rurales, producción de biogás, gestión de residuos orgánicos y sostenibilidad energética en contextos rurales.

Estructura

Se emplea una matriz de análisis documental que permite sistematizar y comparar la información relevante.

Categorías y variables

- Tipología de biodigestores.
- Parámetros técnicos de operación.
- Resultados energéticos y ambientales.
- Factores críticos de éxito.
- Limitaciones reportadas.
- Formato y esquema de la matriz

Autor/Año	Tipo de documento	Contexto	Tecnología analizada	Variables técnicas	Resultados principales	Aportes al proyecto
-----------	-------------------	----------	----------------------	--------------------	------------------------	---------------------

☞ La matriz diligenciada se presenta en el Anexo C.

3.3.4 Validación de los instrumentos

Juicio de expertos (validez de constructo)

La encuesta y la entrevista fueron sometidas a evaluación por dos expertos —uno en gerencia de proyectos y otro en energías renovables— quienes valoraron:

Claridad de las preguntas.

Pertinencia de las variables.

Coherencia con los objetivos.

Suficiencia del instrumento.

☞ Formato de evaluación por expertos: Anexo D.

3.3.5 Prueba piloto (confiabilidad)

Se realizó una prueba piloto con dos productores paneleros no pertenecientes a la muestra definitiva, lo que permitió ajustar redacción, tiempos de aplicación y secuencia lógica de los ítems, fortaleciendo la confiabilidad del instrumento final.

3.4 Descripción de procedimientos

El proceso metodológico avanza como un cauce ordenado, en el que cada fase prepara la siguiente y el rigor guía cada paso, garantizando coherencia entre los objetivos, los instrumentos, los datos recolectados y los resultados obtenidos.

Fase 1. Planeación (3 semanas)

Durante esta fase se diseñaron los instrumentos de recolección de información: encuesta estructurada, guía de entrevista semiestructurada y matriz de revisión documental. El diseño de la encuesta se fundamentó en los objetivos específicos y en las variables definidas previamente, estructurándose a partir de preguntas cerradas de opción múltiple y escala Likert, orientadas a medir consumo energético, disponibilidad de biomasa, continuidad

del servicio eléctrico y prácticas productivas. La guía de entrevista se elaboró con preguntas abiertas organizadas en categorías temáticas, con el fin de complementar la información cuantitativa mediante la comprensión de percepciones, barreras y oportunidades asociadas al uso de tecnologías energéticas alternativas. La matriz documental se construyó para sistematizar información técnica, normativa y bibliográfica relevante.

Los instrumentos fueron sometidos a validación por juicio de expertos, quienes evaluaron la pertinencia, claridad, coherencia interna y alineación con los objetivos del estudio. Posteriormente, se realizó una prueba piloto con productores paneleros externos a la muestra definitiva, lo que permitió ajustar redacción, secuencia y tiempo de aplicación de los instrumentos.

De manera paralela, se gestionaron las autorizaciones con los participantes mediante consentimiento informado, garantizando confidencialidad, voluntariedad y uso académico de la información recolectada, conforme a principios éticos de investigación social.

Fase 2. Recolección de información (4 semanas)

La aplicación de las encuestas se realizó de forma presencial en las unidades productivas seleccionadas, con acompañamiento del investigador para asegurar la comprensión de cada ítem y minimizar sesgos de interpretación. Las respuestas fueron registradas en formatos físicos y posteriormente digitalizadas en una base de datos estructurada.

Las entrevistas semiestructuradas se llevaron a cabo de manera presencial, siguiendo la guía previamente validada, y fueron grabadas —previo consentimiento— para asegurar fidelidad en la transcripción. Estas entrevistas permitieron profundizar en aspectos cualitativos relacionados con prácticas productivas, percepción de costos energéticos, barreras tecnológicas y disposición al cambio.

Asimismo, se realizó la revisión y sistematización de fuentes documentales, incluyendo registros productivos de la finca, informes técnicos, normatividad vigente y literatura científica, los cuales fueron organizados mediante matrices de análisis para facilitar su posterior triangulación.

Fase 3. Organización y análisis de la información (3 semanas)

Los datos cuantitativos fueron digitalizados, depurados y verificados para identificar valores atípicos, inconsistencias y registros incompletos. Posteriormente, se realizó un análisis estadístico descriptivo mediante frecuencias, porcentajes, promedios y gráficos, orientado a caracterizar el consumo energético, la disponibilidad de biomasa y las condiciones operativas de la finca.

Las entrevistas fueron transcritas íntegramente y sometidas a un proceso de codificación temática, a partir de categorías predefinidas alineadas con los objetivos de investigación, lo que permitió identificar patrones discursivos relevantes para la formulación de la propuesta.

Finalmente, se efectuó un proceso de triangulación entre los datos cuantitativos, cualitativos y documentales, con el propósito de fortalecer la validez de los resultados, contrastar hallazgos y sustentar de manera integral la propuesta técnica y gerencial de implementación del sistema de biodigestión.

3.5 Análisis de información

El análisis de la información se realizó de manera diferenciada según el tipo de instrumento aplicado, considerando la naturaleza cuantitativa de las encuestas y el carácter cualitativo de las entrevistas y de la revisión documental. Este proceso incluyó fases de organización, depuración, codificación, análisis e interpretación, garantizando la coherencia metodológica y la trazabilidad de los resultados.

Análisis de la encuesta (datos cuantitativos):

Inicialmente, se efectuó un proceso de limpieza y organización de los datos recolectados mediante la encuesta estructurada, verificando la consistencia de las respuestas, la ausencia de valores atípicos y la completitud de los registros. Posteriormente, los datos fueron codificados mediante variables numéricas para facilitar su procesamiento estadístico.

El análisis se desarrolló utilizando el software **JASP**, a través de estadística descriptiva básica (frecuencias absolutas, porcentajes y medidas de tendencia central), con el fin de caracterizar las condiciones energéticas, el consumo de combustibles, la generación de bagazo y la disposición hacia tecnologías alternativas. Los resultados se presentaron mediante tablas y gráficos, acompañados de análisis interpretativos alineados con los objetivos específicos del estudio.

Análisis de las entrevistas (datos cualitativos):

Las entrevistas semiestructuradas fueron transcritas de manera literal, preservando el sentido original de las respuestas. Posteriormente, se realizó un proceso de codificación abierta, identificando unidades de significado relacionadas con percepciones energéticas, barreras de implementación, beneficios esperados y necesidades de acompañamiento técnico.

Estas unidades fueron agrupadas en categorías temáticas, construidas de manera inductiva a partir de los datos, lo que permitió estructurar matrices de análisis cualitativo. A partir de estas matrices se realizó un análisis interpretativo orientado a identificar patrones, convergencias y divergencias entre participantes, sin recurrir a análisis estadístico, dado el carácter narrativo y contextual de la información.

Análisis de la matriz documental:

La información obtenida mediante la revisión documental fue organizada en una matriz analítica que incluyó variables como tipo de documento, enfoque metodológico, contexto de aplicación, principales hallazgos y aportes al objeto de estudio. Posteriormente, se realizó un análisis temático comparativo para identificar tendencias,

coincidencias y vacíos en la literatura relacionada con biodigestión rural, aprovechamiento de residuos agroindustriales y sostenibilidad energética.

Este análisis permitió contrastar los resultados empíricos del estudio con referentes teóricos y técnicos existentes, fortaleciendo la discusión y la formulación de la propuesta.

Presentación de resultados:

Los resultados cuantitativos se presentaron mediante tablas y gráficos estadísticos, mientras que los hallazgos cualitativos se expusieron a través de matrices por pregunta, categorías temáticas y análisis narrativo interpretativo. Esta diferenciación metodológica garantizó la coherencia entre el tipo de datos, los procedimientos analíticos empleados y la presentación final de los resultados.

3.5.1 Preparación, limpieza y organización de los datos

Los datos cuantitativos provenientes de las encuestas estructuradas y de los registros productivos fueron revisados para identificar valores faltantes, inconsistencias, duplicidades y errores de digitación. Posteriormente, se realizó un proceso de depuración mediante validación cruzada entre formularios físicos y bases digitales, asegurando la integridad y confiabilidad de la información.

Una vez depurados, los datos fueron organizados en matrices estructuradas en Microsoft Excel, clasificadas por variables, dimensiones e indicadores previamente definidos, lo que permitió su posterior importación al software estadístico JASP para el análisis formal. Las variables fueron codificadas numéricamente, asignando valores específicos a cada categoría de respuesta, con el fin de facilitar su tratamiento estadístico.

La información documental fue organizada mediante matrices de análisis categorial, en las que se sistematizaron datos normativos, técnicos y conceptuales relevantes para la triangulación y la sustentación teórica de los resultados.

3.5.2 Codificación de la información

En el caso de los datos cuantitativos, la codificación se realizó a partir de la transformación de las respuestas cerradas en variables numéricas, siguiendo una estructura previamente definida en el diseño del instrumento. Las categorías fueron revisadas y ajustadas durante el proceso de depuración para garantizar consistencia interna y operatividad estadística.

Para la información documental, se establecieron categorías analíticas deductivas relacionadas con sostenibilidad energética, biodigestión, aprovechamiento de biomasa y gerencia de proyectos, las cuales permitieron organizar y clasificar los contenidos relevantes para su posterior análisis interpretativo.

3.5.3 Análisis estadístico de la información cuantitativa

El análisis estadístico se desarrolló mediante los programas Microsoft Excel y JASP. En Excel se realizó la organización inicial de bases de datos, la construcción de tablas dinámicas y la elaboración de gráficos preliminares. En JASP se efectuó el análisis estadístico formal, incluyendo:

Estadística descriptiva: cálculo de medias, medianas, modas, rangos, varianza y desviación estándar para caracterizar las variables energéticas y productivas.

Tablas de frecuencia absoluta y relativa, así como gráficos de barras, histogramas y diagramas circulares para la visualización de patrones de consumo energético, disponibilidad de biomasa y continuidad del servicio eléctrico.

Análisis inferencial, cuando la naturaleza de los datos lo permitió, mediante pruebas de hipótesis, intervalos de confianza, análisis de varianza (ANOVA) y modelos de regresión simples, orientados a explorar relaciones entre variables como producción de bagazo, consumo energético y condiciones operativas del sistema productivo.

3.5.4 Integración e interpretación de resultados

Los resultados obtenidos fueron interpretados a la luz de los objetivos de investigación, el marco teórico y los antecedentes revisados, estableciendo relaciones entre los hallazgos empíricos y los fundamentos conceptuales de la biodigestión, la sostenibilidad energética rural y la gerencia de proyectos. Asimismo, se realizó una triangulación entre los datos cuantitativos y la información documental, con el fin de fortalecer la validez interna de las conclusiones y sustentar técnicamente la propuesta formulada.

3.5.5 Presentación de resultados

Los resultados se presentan mediante tablas estadísticas, gráficos de barras, histogramas, diagramas circulares y matrices comparativas, acompañados de análisis interpretativos que permiten visualizar tendencias, patrones y relaciones significativas entre las variables estudiadas. Estas representaciones facilitan la comprensión de los datos y respaldan la formulación de la propuesta técnica y gerencial desarrollada en el estudio.

3.6 Consideraciones éticas

3.6.1 Análisis de consideraciones éticas

Entre las consideraciones éticas a tener en cuenta en la presente investigación se encuentra la objetividad, está se refiere a presentar de manera clara y precisa toda la información, también alude al acceso a los datos utilizados y la explicación minuciosa de todo el proceso que permite llegar a una conclusión determinada.

Otro de los principios éticos que guían esta investigación es la honestidad académica y el rechazo al plagio, este principio está consagrado en las consideraciones éticas de Uniminuto, al igual que en las diferentes normativas

que regulan la investigación científica en Colombia y el mundo. En coherencia con este principio, se respetarán los derechos de autor y de propiedad intelectual (Ley 23 de 1982) y se citará todas las referencias bibliográficas utilizadas en la presente investigación.

Por último, otro principio que rige la presente investigación es la confidencialidad y el consentimiento informado de las personas, procesos y/o organizaciones participantes. Como establece la Resolución 8430 de 1993 del Ministerio de Salud, es obligatorio solicitar el consentimiento informado previo a información sobre los objetivos, posibles efectos que tendrá el desarrollo de la investigación y el uso de los datos que de ella salgan, en ese sentido, se obtendrá autorización previa para realizar la presente investigación con las personas participantes al igual que autorización para realizar el estudio en la finca panelera.

3.6.2. Instrumentos de aceptación y autorización

3.6.1.1 Declaración de consentimiento informado personas participantes

Yo _____, mayor de edad y con n° documento _____ de _____ Manifiesto que he leído y entendido la hoja de información que se me ha entregado, que he hecho las preguntas que me surgieron sobre el proyecto y que he recibido información suficiente sobre el mismo.

Comprendo que mi participación es totalmente voluntaria, que puedo retirarme del estudio cuando quiera sin tener que dar explicaciones y sin que esto repercuta.

Presto libremente mi conformidad para participar en el Proyecto de Investigación titulado “Fortalecimiento del acceso y suministro de energía eléctrica y gas para la producción panelera a partir de herramientas y metodologías de gerencia de proyectos que impulsen la sostenibilidad ambiental y económica”.

He sido también informado/a de que mis datos personales serán protegidos e tratados bajo la confidencialidad y ética correspondiente. Tomando ello en consideración, OTORGO mi CONSENTIMIENTO para cubrir los objetivos especificados en el proyecto.

3.6.1.2 Autorización para investigar al interior de la finca panelera.

Yo _____, mayor de edad y con n° documento _____ de _____, en calidad de propietario/administrador de la finca _____ autorizó el desarrollo de la investigación “Fortalecimiento del acceso y suministro de energía eléctrica y gas para la producción panelera a partir de herramientas y metodologías de gerencia de proyectos que impulsen la sostenibilidad ambiental y económica”.

Manifiesto que he leído y entendido la hoja de información que se me ha entregado, que he hecho las preguntas que me surgieron sobre el proyecto y que he recibido información suficiente sobre el mismo.

Autorizó el ingreso, las visitas y demás actividades que sean necesarias para el desarrollo adecuado de la investigación.

4 HIPÓTESIS

La investigación no avanza a ciegas: camina sostenida por una conjetura que, como brújula silenciosa, orienta el rumbo del análisis y de la propuesta. En coherencia con la pregunta de investigación —*¿Cómo puede formularse una propuesta de implementación que contribuya a mejorar el acceso al gas y la energía eléctrica de manera sostenible en la finca panelera Los Trapiches?*— se formula la siguiente hipótesis:

H_i:

La formulación de una propuesta técnica y gerencial de implementación de un biodigestor, basada en la disponibilidad de bagazo de caña y en principios de sostenibilidad, contribuye a mejorar el acceso al gas y la energía eléctrica de manera eficiente y ambientalmente responsable en la finca panelera Los Trapiches.

Esta hipótesis no busca establecer causalidades universales, sino verificar, en el marco de un estudio de caso, la coherencia técnica, energética y gerencial entre los recursos disponibles, las condiciones productivas y la viabilidad de una solución basada en biodigestión.

4.1 Variables de estudio

Las variables constituyen los hilos invisibles que tejen la relación entre el problema diagnosticado y la propuesta formulada. Su análisis permite traducir la realidad productiva en criterios técnicos que sustentan la toma de decisiones.

4.1.1 Variable independiente

Disponibilidad de residuos orgánicos (bagazo de caña panelera)

Corresponde a la cantidad de bagazo generada en los procesos de molienda y producción de panela, expresada en

unidades de masa y frecuencia temporal. Esta variable condiciona la capacidad de carga del biodigestor y determina el potencial energético del sistema.

4.1.2 Variable dependiente

Mejoramiento del acceso a gas y energía eléctrica mediante biodigestión

Hace referencia al incremento en la disponibilidad, continuidad y sostenibilidad del suministro energético, medido a partir de la cantidad estimada de biogás producido, su aprovechamiento térmico y eléctrico, y la reducción en la dependencia de fuentes energéticas convencionales o contaminantes.

4.2 Consideración metodológica sobre la hipótesis

En coherencia con el alcance descriptivo–propositivo del estudio, esta hipótesis no pretende establecer relaciones causales generalizables, sino verificar la viabilidad técnica y estratégica de una solución energética contextualizada. Su función no es ser refutada o confirmada en términos experimentales, sino servir como eje orientador para el análisis cuantitativo de las variables y para la formulación de una propuesta estructurada desde la gerencia de proyectos.

Así, la hipótesis no se erige como un juicio cerrado, sino como una pregunta viva que dialoga con los datos, con el territorio y con la posibilidad de transformar los residuos en energía, y la energía en dignidad rural.

5 RESULTADOS

Este capítulo presenta los resultados obtenidos a partir de la aplicación de los instrumentos de recolección de información: encuesta estructurada, entrevista semiestructurada y revisión documental. Los hallazgos se

organizan de forma sistemática con el fin de dar respuesta a los objetivos de la investigación y sustentar la formulación de la propuesta de implementación de un sistema de biodigestión en la finca panelera Los Trapiches.

5.1 Presentación de resultados

5.1.1 Resultados de la encuesta estructurada

Este apartado presenta los resultados obtenidos a partir de la aplicación de la encuesta estructurada y de las entrevistas semiestructuradas realizadas a productores de la finca Los Trapiches. La encuesta estuvo compuesta por **18 preguntas**, organizadas en cuatro bloques temáticos: condiciones energéticas, consumo de combustibles, generación y manejo del bagazo, y percepción frente a tecnologías alternativas. Los resultados se presentan mediante tablas con su respectivo análisis interpretativo individual. Asimismo, se exponen los hallazgos de las entrevistas a través de matrices de análisis cualitativo, acompañadas de su correspondiente interpretación.

Tabla 1

Conexión al servicio eléctrico en las fincas paneleras

Respuesta Frecuencia Porcentaje

Sí	5	100 %
No	0	0 %

Análisis:

La totalidad de las fincas encuestadas cuenta con conexión formal al servicio eléctrico, lo cual evidencia cobertura

institucional en el territorio. Sin embargo, este resultado no implica condiciones adecuadas de calidad o continuidad del servicio, como se observa en preguntas posteriores, lo que permite inferir que el acceso formal no se traduce necesariamente en disponibilidad energética efectiva para los procesos productivos rurales.

Tabla 2

Frecuencia de interrupciones en el servicio eléctrico**Frecuencia de cortes Frecuencia Porcentaje**

1 vez por semana	1	20 %
2 a 3 veces/semana	3	60 %
4 a 5 veces/semana	1	20 %

Análisis:

El 80 % de las fincas experimenta interrupciones eléctricas al menos dos veces por semana, lo que evidencia una alta inestabilidad en el suministro energético rural. Esta situación afecta la planificación de la producción panelera y obliga a los productores a depender de fuentes alternativas o a suspender temporalmente sus actividades, generando pérdidas operativas y disminución de la eficiencia productiva.

Tabla 3

Percepción sobre la estabilidad del voltaje

Estabilidad percibida Frecuencia Porcentaje

Moderadamente inestable	4	80 %
-------------------------	---	------

Muy inestable	1	20 %
---------------	---	------

Análisis:

El 100 % de los productores percibe inestabilidad en el voltaje, lo que implica riesgos técnicos asociados al deterioro de maquinaria, interrupciones inesperadas y posibles pérdidas de producto. Este resultado refuerza la necesidad de fuentes energéticas complementarias que permitan garantizar mayor estabilidad en los procesos productivos rurales.

Tabla 4

Afectación de los cortes eléctricos en el proceso productivo**Respuesta Frecuencia Porcentaje**

Sí	5	100 %
----	---	-------

No	0	0 %
----	---	-----

Análisis:

La totalidad de los encuestados afirmó que los cortes eléctricos afectan directamente sus procesos productivos, lo que demuestra que la problemática energética no es marginal sino estructural. Este impacto se refleja en retrasos en la molienda, interrupciones en la cocción y dificultades para cumplir cronogramas de producción, comprometiendo la eficiencia operativa de las fincas.

Tabla 5

Nivel de afectación del proceso productivo por fallas eléctricas**Nivel de afectación Frecuencia Porcentaje**

Alta	4	80 %
Media	1	20 %
Baja	0	0 %

Análisis:

El 80 % de las fincas reporta una afectación alta en sus procesos productivos debido a fallas eléctricas, lo que evidencia una dependencia crítica del suministro energético para el desarrollo de las actividades paneleras. Este resultado sustenta la pertinencia de explorar soluciones energéticas alternativas orientadas a fortalecer la resiliencia productiva del sector.

Tabla 6

Fuente principal de energía térmica para la cocción**Fuente Frecuencia Porcentaje**

Leña	4	80 %
ACPM	1	20 %

Análisis:

La leña continúa siendo la principal fuente energética para la cocción de la caña en el 80 % de las fincas, lo que refleja una dependencia significativa de combustibles tradicionales. Esta situación tiene implicaciones

ambientales, sanitarias y operativas, además de evidenciar oportunidades para la transición hacia fuentes energéticas más limpias y sostenibles.

Tabla 7

Uso combinado de fuentes energéticas**Respuesta Frecuencia Porcentaje**

Sí	3	60 %
No	2	40 %

Análisis:

El 60 % de las fincas utiliza más de una fuente energética en sus procesos productivos, lo que sugiere estrategias adaptativas frente a la inestabilidad del suministro eléctrico y a la disponibilidad irregular de combustibles. No obstante, esta diversificación se da de forma reactiva y no planificada, lo que limita su eficiencia y sostenibilidad.

Tabla 8

Percepción del costo energético actual**Percepción del costo Frecuencia Porcentaje**

Alto	4	80 %
Medio	1	20 %

Percepción del costo Frecuencia Porcentaje

Bajo	0	0 %
------	---	-----

Análisis:

La mayoría de los productores percibe el costo energético como alto, lo que representa una carga significativa sobre los márgenes de rentabilidad de la producción panelera. Este resultado refuerza la necesidad de alternativas energéticas que permitan reducir gastos operativos y fortalecer la sostenibilidad económica de las unidades productivas rurales.

Tabla 9

Cantidad de bagazo generado por jornada productiva**Cantidad de bagazo Frecuencia Porcentaje**

100–150 kg	1	20 %
------------	---	------

150–200 kg	3	60 %
------------	---	------

Más de 200 kg	1	20 %
---------------	---	------

Análisis:

El 80 % de las fincas genera más de 150 kg de bagazo por jornada productiva, lo que evidencia una disponibilidad significativa de biomasa residual. Este volumen resulta relevante para evaluar la factibilidad preliminar de sistemas de aprovechamiento energético, especialmente en tecnologías como la biodigestión anaerobia, que requieren flujos constantes de materia orgánica.

Tabla 10

Destino actual del bagazo generado

Destino	Frecuencia Porcentaje	
Quema parcial	3	60 %
Quema total	1	20 %
Desecho/almacenamiento	1	20 %

Análisis:

El bagazo es mayoritariamente quemado de forma parcial o total, lo que indica un aprovechamiento energético ineficiente y no planificado. Esta práctica no solo desaprovecha su potencial energético, sino que también genera emisiones contaminantes, lo que refuerza la pertinencia de explorar alternativas tecnológicas más sostenibles para su valorización.

Tabla 11

Percepción sobre la eficiencia en el aprovechamiento del bagazo

Respuesta	Frecuencia Porcentaje	
No eficiente	5	100 %
Eficiente	0	0 %

Análisis:

La totalidad de los encuestados considera que el bagazo no se aprovecha de forma eficiente, lo que evidencia un

consenso claro sobre la necesidad de mejorar su gestión. Este resultado valida la relevancia de formular propuestas orientadas a integrar este residuo al sistema productivo de manera más sostenible y estratégica.

Tabla 12

Conocimiento previo sobre biodigestores**Respuesta Frecuencia Porcentaje**

Sí	3	60 %
No	2	40 %

Análisis:

Aunque el 60 % de los productores manifiesta conocer qué es un biodigestor, este conocimiento es básico y no técnico, lo que limita su capacidad de evaluar la viabilidad operativa de estos sistemas. Este hallazgo resalta la necesidad de procesos de formación y acompañamiento técnico para fortalecer la apropiación tecnológica.

Tabla 13

Disposición a implementar un sistema de biodigestión**Respuesta Frecuencia Porcentaje**

Sí	4	80 %
Tal vez	1	20 %

Análisis:

Existe una alta disposición hacia la adopción de tecnologías de biodigestión, ya que el 80 % de los productores manifestó interés en implementarlas. Sin embargo, esta disposición está condicionada, como se profundiza en las entrevistas, a la disponibilidad de capacitación técnica, acompañamiento institucional y viabilidad económica del sistema.

Tabla 14

Factores que influyen en la adopción de tecnologías alternativas

Factor	Frecuencia	Porcentaje
Capacitación técnica	5	100 %
Acompañamiento técnico	4	80 %
Costo inicial	3	60 %
Resultados demostrables	2	40 %

Análisis:

La capacitación técnica fue identificada como el factor más determinante para la adopción tecnológica por el 100 % de los productores, seguida del acompañamiento técnico y el costo inicial. Este resultado evidencia que las barreras percibidas no son únicamente económicas, sino también formativas e institucionales, lo que debe ser considerado en el diseño de estrategias de implementación.

Tabla 15

Frecuencia de molienda de caña**Frecuencia Frecuencia Porcentaje**

Semanal 3 60 %

Quincenal 2 40 %

Análisis:

La mayoría de las fincas realiza molienda semanal, lo que garantiza una generación relativamente constante de bagazo. Esta regularidad resulta favorable para sistemas de biodigestión, los cuales requieren flujos continuos de sustrato para su operación estable.

Tabla 16

Variabilidad estacional en la generación de bagazo**Respuesta Frecuencia Porcentaje**

Sí 4 80 %

No 1 20 %

Análisis:

El 80 % de los productores reporta variabilidad estacional en la producción de bagazo, lo que implica que la disponibilidad de biomasa no es completamente uniforme durante el año. Este factor debe ser considerado en el diseño operativo del biodigestor, particularmente en la planificación de cargas y en el manejo del almacenamiento de sustrato.

Tabla 17

Disponibilidad de espacio físico para infraestructura adicional**Respuesta Frecuencia Porcentaje**

Sí	4	80 %
No	1	20 %

Análisis:

La mayoría de las fincas dispone de espacio físico suficiente para la instalación de infraestructura adicional, lo que favorece la viabilidad espacial de la implementación de sistemas de biodigestión. No obstante, se requiere una evaluación técnica detallada del terreno para garantizar condiciones adecuadas de seguridad y operación.

Tabla 18

Experiencia previa en tecnologías energéticas alternativas**Respuesta Frecuencia Porcentaje**

No	4	80 %
Sí	1	20 %

Análisis:

El 80 % de los productores no ha tenido experiencia previa en tecnologías energéticas alternativas, lo que refuerza la necesidad de acompañamiento técnico continuo y procesos de capacitación contextualizados. Este resultado tiene implicaciones directas para la sostenibilidad operativa de cualquier sistema de biodigestión que se implemente en el territorio.

5.1.2 Resultados de las entrevistas semiestructuradas

Se realizaron dos entrevistas semiestructuradas a responsables directos de la finca Los Trapiches, orientadas a profundizar en percepciones, barreras, expectativas y condiciones de implementación de sistemas de biodigestión. A continuación, se presentan los resultados mediante matrices de análisis por pregunta, acompañadas de su respectiva interpretación.

Tabla 19

Matriz de resultados entrevista – Pregunta 1: Acceso actual a energía

Respuesta textual	Categorías clave	Interpretación
“La energía se va varias veces por semana y cuando vuelve el voltaje no es estable.”	Interrupciones frecuentes; inestabilidad	Se evidencia una percepción clara de precariedad energética que afecta la continuidad productiva.
“Dependemos mucho de la leña porque el gas es costoso y difícil de conseguir.”	Dependencia de combustibles tradicionales	Se confirma una estructura energética basada en fuentes convencionales con altos costos operativos.

Análisis:

Los entrevistados coinciden en señalar una alta inestabilidad del suministro eléctrico y una dependencia estructural de combustibles tradicionales, lo cual refuerza los resultados cuantitativos obtenidos en las encuestas. Esta convergencia evidencia una problemática energética persistente que afecta tanto la planificación como la continuidad de los procesos productivos paneleros.

Tabla 20

Matriz de resultados entrevista – Pregunta 2: Impacto de cortes eléctricos

Respuesta textual	Categorías clave	Interpretación
“Cuando se va la luz hay que parar la molienda.”	Interrupciones operativas	Los cortes afectan directamente la continuidad de los procesos productivos.
“A veces se dañan equipos o hay que repetir procesos.”	Riesgo técnico; reprocesos	Se incrementan costos y pérdidas por fallas en la energía.

Análisis:

Las entrevistas confirman que los cortes eléctricos no solo generan retrasos, sino también riesgos técnicos y pérdidas económicas, lo que coincide con la percepción de alta afectación reportada en el 80 % de las encuestas.

Tabla 21

Matriz de resultados entrevista – Pregunta 3: Uso actual del bagazo

Respuesta textual	Categorías clave	Interpretación
“Parte se quema para ayudar en la cocción, pero no alcanza.”	Uso parcial	Aprovechamiento limitado del residuo.
“Lo que sobra se deja secar o se bota.”	Disposición sin uso	Pérdida de valor energético.

Análisis:

Las respuestas evidencian que el bagazo se gestiona de manera poco planificada y con bajo nivel de aprovechamiento energético, lo que coincide con el 100 % de percepción de ineficiencia reportada en la encuesta.

Tabla 22

Matriz de resultados entrevista – Pregunta 4: Potencial de aprovechamiento del bagazo

Respuesta textual	Categorías clave	Interpretación
“Sí, si hubiera una forma de sacarle más energía.”	Interés en valorización	Existe disposición hacia alternativas de aprovechamiento.
“Si fuera fácil de manejar, sería buena opción.”	Simplicidad operativa	Preferencia por tecnologías de baja complejidad.

Análisis:

Se evidencia apertura hacia tecnologías alternativas siempre que estas sean sencillas de operar, lo cual orienta la selección de biodigestores de bajo costo y fácil manejo como opción tecnológica preliminar.

Tabla 23

Matriz de resultados entrevista – Pregunta 5: Conocimiento sobre biodigestores

Respuesta textual	Categorías clave	Interpretación
“He escuchado que sirven para producir gas con residuos.”	Conocimiento básico	Comprensión general sin dominio técnico.
“No sé bien cómo funcionan.”	Desconocimiento operativo	Necesidad de formación.

Análisis:

Aunque existe un conocimiento general sobre la tecnología, este no es suficiente para su implementación efectiva, lo que resalta la importancia de procesos de capacitación y acompañamiento técnico.

Tabla 24

Matriz de resultados entrevista – Pregunta 6: Beneficios esperados

Respuesta textual	Categorías clave	Interpretación
“Ayudaría a gastar menos en leña.”	Ahorro económico	Beneficio financiero percibido.
“Sería mejor para el ambiente.”	Beneficio ambiental	Reconocimiento de impacto positivo.

Análisis:

Los entrevistados identifican beneficios tanto económicos como ambientales asociados a la biodigestión, lo que fortalece la percepción positiva hacia esta tecnología como alternativa energética sostenible.

Tabla 25

Matriz de resultados entrevista – Pregunta 7: Dificultades percibidas

Respuesta textual	Categorías clave	Interpretación
“El costo inicial y no saber manejarlo.”	Barreras económicas y técnicas	Obstáculos principales para adopción.
“Que se dañe y no sepamos repararlo.”	Riesgo de mantenimiento	Necesidad de soporte técnico.

Análisis:

Las principales barreras identificadas se relacionan con limitaciones económicas y falta de capacidades técnicas, lo que refuerza la importancia del acompañamiento institucional para garantizar la sostenibilidad operativa del sistema.

Tabla 26

Matriz de resultados entrevista – Pregunta 8: Apoyos requeridos

Respuesta textual	Categorías clave	Interpretación
“Capacitación para aprender a manejarlo.”	Formación técnica	Necesidad de capacitación.
“Acompañamiento permanente.”	Soporte institucional	Importancia del acompañamiento.

Análisis:

Existe consenso en que la capacitación y el acompañamiento institucional son condiciones necesarias para la adopción efectiva de tecnologías de biodigestión, lo cual debe ser considerado en la formulación de estrategias de implementación.

Tabla 27

Matriz de resultados entrevista – Pregunta 9: Disposición a capacitarse

Respuesta textual	Categorías clave	Interpretación
“Sí, si nos enseñan bien.”	Disposición positiva	Apertura a procesos formativos.
“Que sea práctico.”	Formación aplicada	Preferencia por capacitación contextualizada.

Análisis:

Los entrevistados manifiestan alta disposición a participar en procesos de formación, siempre que estos sean prácticos y adaptados a su contexto productivo, lo que refuerza la viabilidad social de la propuesta.

Tabla 28

Matriz de resultados entrevista – Pregunta 10: Cambios esperados

Respuesta textual	Categorías clave	Interpretación
“Menos gasto y menos humo.”	Mejora económica y ambiental	Impactos positivos percibidos.
“Más estabilidad en la producción.”	Continuidad operativa	Fortalecimiento de procesos productivos.

Análisis:

Se anticipan mejoras en eficiencia productiva, reducción de costos y condiciones ambientales más favorables, lo que refuerza la pertinencia social y productiva de implementar sistemas de biodigestión en el contexto estudiado.

5.1.3 Resultados de la revisión documental

Se analizaron 12 documentos técnicos y científicos relacionados con biodigestores rurales, aprovechamiento energético de residuos agroindustriales y sostenibilidad energética. Los principales hallazgos se sintetizan a continuación:

Los estudios revisados coinciden en que los biodigestores tubulares presentan alta viabilidad técnica y bajos costos de instalación en contextos rurales, especialmente cuando se emplean residuos orgánicos agroindustriales como sustrato (Bond & Templeton, 2019; FAO, 2017). Investigaciones en contextos similares reportan producciones de biogás entre 0,20 y 0,30 m³ por kilogramo de sólidos volátiles, lo que respalda el potencial energético del bagazo de caña cuando es adecuadamente pretratado (Surendra et al., 2020; López et al., 2021).

Asimismo, la literatura destaca que la sostenibilidad de los sistemas de biodigestión depende más de factores organizacionales, capacitación y acompañamiento técnico que de la tecnología en sí misma (Pérez et al., 2022; Sánchez & Villada, 2018). Estudios en agroindustrias rurales de América Latina evidencian que los proyectos exitosos integran esquemas de formación local, mantenimiento preventivo y apropiación social de la tecnología (FAO, 2020; Rodríguez & López, 2021).

Finalmente, los documentos institucionales coinciden en que la valorización energética de residuos agrícolas contribuye a reducir emisiones, mejorar la seguridad energética y fortalecer la economía circular en contextos rurales (UPME, 2021; Ministerio de Minas y Energía, 2022). Estos hallazgos respaldan la pertinencia técnica, ambiental y social de la propuesta formulada en esta investigación.

5.2 Propuesta de implementación al sector panelero

A partir de los resultados obtenidos en las encuestas, entrevistas y revisión documental, se formuló una propuesta preliminar de implementación de un sistema de biodigestión en la finca Los Trapiches, estructurada desde la gerencia de proyectos y orientada a integrar el bagazo de caña como fuente energética complementaria, mejorar la estabilidad productiva y reducir la dependencia de combustibles tradicionales.

5.2.1 Diseño del biodigestor

Con base en la disponibilidad promedio de 180 kg de bagazo por jornada productiva, reportada por el 60 % de las fincas encuestadas y confirmada por los responsables de la finca Los Trapiches, se propone la implementación de un **biodigestor tubular de bajo costo**, tecnología ampliamente recomendada para contextos rurales por su simplicidad constructiva, bajo requerimiento de mantenimiento y adaptabilidad a pequeñas escalas productivas (FAO, 2017; Bond & Templeton, 2019).

El diseño considera una alimentación diaria proporcional a la producción de bagazo, diluida con agua en proporción adecuada para favorecer la digestión anaerobia. La elección de esta tipología responde a: (i) la disponibilidad de espacio físico en la finca, confirmada por el 80 % de los encuestados; (ii) la limitada experiencia técnica previa en biodigestión (80 % no ha recibido capacitación); y (iii) la necesidad de minimizar costos iniciales y complejidad operativa.

5.2.2 Estrategia de operación

La estrategia de operación se fundamenta en tres ejes: manejo del sustrato, control del proceso y aprovechamiento del biogás.

Manejo del sustrato:

El bagazo generado durante cada jornada será recolectado, triturado de forma manual o mecánica y mezclado con agua para facilitar su biodigestión. Este procedimiento responde al hallazgo de que el 100 % de las fincas reconoce una subutilización del bagazo y que el 80 % genera más de 150 kg por jornada, lo que garantiza disponibilidad suficiente de biomasa.

Control del proceso:

Se propone un monitoreo básico de variables como carga diaria, tiempo de retención hidráulica y presión del gas, mediante registros manuales sencillos, considerando que el 80 % de los productores no cuenta con experiencia previa en tecnologías energéticas alternativas. Esta estrategia se alinea con recomendaciones de FAO (2017) y Sánchez y Villada (2018), quienes destacan que los sistemas rurales exitosos priorizan simplicidad operativa y monitoreo básico.

Aprovechamiento del biogás:

El biogás producido se destinará principalmente a la cocción de la caña, sustituyendo parcialmente el uso de leña y ACPM. Esta aplicación responde directamente al hecho de que el 80 % de las fincas utiliza leña como principal combustible y que el 80 % percibe sus costos energéticos como altos, lo que convierte al biogás en una alternativa pertinente para reducir gastos operativos y dependencia de combustibles externos.

5.2.3 Estrategia de mantenimiento

La estrategia de mantenimiento contempla acciones preventivas y correctivas orientadas a garantizar la continuidad operativa del sistema. Se propone una revisión semanal de válvulas, tuberías y conexiones, así como limpieza periódica del sistema de alimentación para evitar obstrucciones. Esta estrategia se fundamenta en la percepción de riesgo expresada por los entrevistados respecto a posibles fallas técnicas y falta de capacidad de reparación local.

La literatura respalda que los sistemas de biodigestión rural presentan mayores tasas de éxito cuando incorporan rutinas de mantenimiento preventivo y capacitación básica en resolución de fallas (Pérez et al., 2022; Sánchez & Villada, 2018), lo que refuerza la pertinencia de este enfoque.

5.2.4 Gestión de costos y beneficios

Desde la gestión de proyectos, se propone una evaluación preliminar de costos de inversión, operación y mantenimiento, contrastados con beneficios económicos y ambientales esperados. Aunque este estudio no desarrolla un análisis financiero detallado, los resultados de la encuesta muestran que el 80 % de las fincas considera altos sus costos energéticos actuales, lo que indica un margen potencial de ahorro mediante la sustitución parcial de combustibles tradicionales por biogás.

Estudios similares reportan reducciones de entre 30 % y 60 % en el gasto energético cuando se integran sistemas de biodigestión en pequeñas agroindustrias rurales (Ramírez et al., 2021; Rodríguez & López, 2021), lo que respalda la viabilidad económica preliminar de la propuesta, sujeta a validación mediante estudios técnicos posteriores.

5.2.5 Integración al sistema productivo panelero

La integración del biodigestor al sistema productivo panelero se concibe como un proceso gradual y adaptativo. El sistema se articula al flujo de residuos existente, sin alterar sustancialmente las rutinas de producción, lo que responde a la necesidad de simplicidad operativa expresada por los entrevistados. Además, el digestato generado podrá evaluarse como insumo potencial para fertilización de cultivos, cerrando ciclos productivos y fortaleciendo la economía circular, como lo recomiendan FAO (2020) y UPME (2021).

Esta integración responde directamente a tres hallazgos centrales del estudio: (i) disponibilidad significativa de bagazo (80 % >150 kg/jornada), (ii) subutilización total del residuo (100 %), y (iii) alta disposición hacia tecnologías alternativas (80 %), lo que configura un escenario favorable para la implementación progresiva del sistema.

5.3 Discusión

Los resultados de esta investigación evidencian que el sector panelero rural estudiado enfrenta una combinación crítica de inestabilidad energética, dependencia de combustibles tradicionales y subutilización de residuos orgánicos, lo que configura un escenario propicio para la incorporación de tecnologías de valorización energética como la biodigestión.

En cuanto a las condiciones energéticas, el 80 % de las fincas reportó interrupciones eléctricas entre dos y cinco veces por semana, y el 100 % indicó que estas afectan directamente su proceso productivo. Estos hallazgos coinciden con estudios nacionales que señalan una alta vulnerabilidad energética en zonas rurales colombianas, caracterizada por baja calidad del servicio eléctrico y dependencia de fuentes térmicas tradicionales (Mora & Zambrano, 2020; UPME, 2021).

Respecto a la disponibilidad de biomasa, el 80 % de las fincas encuestadas genera más de 150 kg de bagazo por jornada productiva, y el 100 % considera que este residuo no se aprovecha eficientemente. Estos resultados son consistentes con investigaciones previas que identifican al bagazo de caña como un residuo agroindustrial subutilizado con alto potencial energético cuando es gestionado adecuadamente (González et al., 2021; Rodríguez & López, 2021).

Desde el componente social, el 80 % de los productores manifestó disposición a implementar un sistema de biodigestión, aunque condicionada a procesos de capacitación y acompañamiento técnico, lo cual fue corroborado por las entrevistas, donde se identificaron barreras relacionadas con el desconocimiento técnico, el costo inicial y la sostenibilidad operativa. Este patrón coincide con lo reportado por Pérez et al. (2022) y Sánchez y Villada (2018), quienes señalan que la apropiación social y la formación local son factores determinantes para el éxito de proyectos de biodigestión rural.

A partir de estos resultados, la propuesta de implementación de un biodigestor tubular se sustenta en evidencia empírica directa del contexto estudiado y en referentes técnicos consolidados. La selección de esta tecnología responde a la disponibilidad significativa de bagazo, la necesidad de sistemas de baja complejidad operativa y la limitada experiencia previa en tecnologías alternativas, factores que han sido identificados como críticos en experiencias exitosas de biodigestión rural (FAO, 2017; Bond & Templeton, 2019).

No obstante, la investigación presenta limitaciones importantes. La ausencia de caracterización fisicoquímica del bagazo y de ensayos experimentales de producción de biogás impide realizar estimaciones energéticas precisas y establecer relaciones causales robustas entre disponibilidad de biomasa y viabilidad técnica del sistema.

Asimismo, el tamaño reducido de la muestra limita la generalización de los resultados, por lo que estos deben interpretarse como indicativos y contextuales.

En conjunto, los hallazgos permiten afirmar que existe una base empírica sólida para considerar la biodigestión como una alternativa energética potencialmente viable en el contexto panelero rural estudiado; sin embargo, su

implementación efectiva requiere estudios técnicos adicionales, pruebas piloto, evaluación económica detallada y fortalecimiento de capacidades locales, en concordancia con las recomendaciones de la literatura especializada.

6 Conclusiones

La presente investigación permitió caracterizar las condiciones energéticas del sector panelero en la finca Los Trapiches y fincas aledañas de la vereda Golconda, evidenciando una alta vulnerabilidad energética. A partir de los resultados de la encuesta, se identificó que el 100 % de las fincas cuenta con conexión eléctrica, pero el 80 % presenta cortes frecuentes entre dos y cinco veces por semana y el 100 % reporta afectaciones directas en sus procesos productivos. Asimismo, el 80 % de las fincas utiliza leña como principal combustible térmico y el 80 % percibe sus costos energéticos como altos, lo que confirma la existencia de limitaciones estructurales en el acceso a energía confiable y sostenible, cumpliéndose así el primer objetivo específico relacionado con la caracterización de las condiciones energéticas del contexto de estudio.

En relación con la disponibilidad y uso del bagazo de caña, los resultados muestran que el 80 % de las fincas genera más de 150 kg de residuo por jornada productiva y que el 100 % de los productores considera que este material no se aprovecha de forma eficiente, destinándolo principalmente a quema parcial o disposición sin uso productivo. Estos hallazgos permiten concluir que existe una oferta significativa de biomasa residual con potencial energético, aunque actualmente subutilizada, lo que cumple el segundo objetivo específico orientado a analizar el potencial de aprovechamiento del bagazo en el contexto panelero rural.

Desde el componente social, se evidenció una disposición favorable hacia la adopción de tecnologías alternativas, ya que el 80 % de los encuestados manifestó interés en implementar un sistema de biodigestión, condicionando esta decisión principalmente a procesos de capacitación técnica y acompañamiento institucional. Este resultado fue corroborado por las entrevistas, en las cuales los productores expresaron preocupaciones relacionadas con la

falta de conocimiento técnico, el mantenimiento del sistema y los costos iniciales, pero también reconocieron beneficios potenciales como reducción de gastos en combustibles, mejora en la continuidad productiva y disminución de impactos ambientales. De este modo, se cumple el tercer objetivo específico relacionado con el análisis de la percepción social frente a tecnologías de aprovechamiento energético.

Con base en estos resultados, se formuló una propuesta preliminar de implementación de un biodigestor tubular de bajo costo, adaptada a las condiciones productivas de la finca Los Trapiches y estructurada desde la gerencia de proyectos. La propuesta se fundamenta empíricamente en la disponibilidad significativa de bagazo (80 % de fincas >150 kg/jornada), en la subutilización total del residuo (100 %) y en la alta disposición social hacia tecnologías alternativas (80 %). Asimismo, su diseño considera la limitada experiencia técnica previa (80 % sin capacitación), lo que justifica la selección de una tecnología de operación sencilla y bajo requerimiento de mantenimiento. De esta manera, se da cumplimiento al objetivo general del estudio, orientado a formular una alternativa preliminar de aprovechamiento energético del bagazo mediante biodigestión en el contexto panelero rural.

No obstante, los resultados también permiten concluir que la propuesta formulada tiene un alcance conceptual y exploratorio, ya que la investigación no incluyó caracterización fisicoquímica del bagazo ni ensayos experimentales de producción de biogás, lo que impide establecer estimaciones energéticas precisas y evaluar con rigor la viabilidad técnica, económica y operativa del sistema. Por tanto, su implementación inmediata no puede recomendarse sin la realización previa de estudios técnicos complementarios, pruebas piloto controladas y análisis financieros detallados.

Finalmente, la investigación evidencia que la biodigestión del bagazo de caña representa una alternativa energética potencialmente viable para el fortalecimiento de la sostenibilidad productiva del sector panelero rural, siempre que su adopción se articule a procesos de capacitación, acompañamiento técnico institucional y fortalecimiento de capacidades locales. En este sentido, el estudio contribuye al conocimiento aplicado sobre

energías renovables rurales, al tiempo que establece bases empíricas sólidas para futuras investigaciones orientadas a la implementación efectiva de sistemas de biodigestión en agroindustrias paneleras.

7 Referencias

- Acevedo Argüello, C., Zabala Vargas, S., Rojas Mesa, J., & Guayán Perdomo, O. (2020). Análisis de Redes Sociales como estrategia para estudiar los Sistemas de Innovación. Revisión sistemática de la literatura. *Revista Interamericana de Investigación, Educación y Pedagogía*, 13(2), 369-402.
<https://doi.org/10.15332/s1657-107X>
- ADEN. (2024, marzo 25). *Elige la estrategia adecuada: Claves para una gestión de proyectos exitosa. Estas son las metodologías más utilizadas.* <https://www.aden.org/business-magazine/gestion-proyectos-metodologias-mas-utilizadas/>
- AFE – Asociación de Fundaciones Familiares y Empresariales. (2024, junio 27). *Pobreza energética: Una lucha silenciosa para 9.6 millones en Colombia.* Fundación Promigas. <https://afecolombia.org/pobreza-energetica-fundacion-promigas/>
- AMITAI. (2022, abril 25). *Qué es el design thinking y cómo implementarlo en tu equipo de trabajo.* <https://www.amitai.com/es/design-thinking-y-como-implementarlo/>
- Arboleda, J., & Molina, L. (2020). Evaluación de biodigestores rurales para la generación de energía a partir de residuos agroindustriales. *Revista Colombiana de Energías Renovables*, 5(2), 45–59.
- Asana. (2024, febrero 13). *Qué es la programación extrema (XP).* <https://asana.com/es/resources/extreme-programming-xp>
- Asana. (2024, febrero 14). *Metodología ágil: Scrumban, lo mejor de dos metodologías ágiles.* <https://asana.com/es/resources/scrumban>
- Asocaña. (2020). *Somos azúcar y mucho más: Informe anual 2019–2020.* Asociación de Cultivadores de Caña de Azúcar de Colombia.
- Brouwer, H. (2018). *La guía de las MSP: Cómo diseñar y facilitar asociaciones de múltiples partes interesadas* (J. Woodhill, Ed.). Practical Action Publishing. https://mspguide.org/wp-content/uploads/2021/12/msp_guide_spanish_2018-web.pdf

- Cadena, C. (2006). ¿Electrificación o energización mediante energías alternativas en zonas rurales? *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 10, 1–8. <https://sedici.unlp.edu.ar/>
- Comisión de Regulación de Energía y Gas. (2017). *Condiciones especiales de prestación del servicio en zonas de difícil acceso del SIN (Resolución CREG 060 de 2017)*. <https://gestornormativo.creg.gov.co/>
- Congreso de la República de Colombia. (2021). *Ley 2128 de 2021*. Diario Oficial No. 51.861.
- Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. (2019). *Oportunidades de producción más limpia en la industria panelera: Guía para empresarios*. <https://sie.car.gov.co/>
- Departamento Nacional de Planeación. (2022). *Plan Nacional de Desarrollo 2022–2026*. DNP.
- Díaz, L. F., Savage, G. M., & Eggerth, L. L. (2011). *Biogas generation from anaerobic digestion of organic wastes*. CRC Press.
- EAE Business School. (2018). *Metodología de desarrollo Crystal*. <https://www.tecnologias-informacion.com/>
- ENEL Colombia. (2024). *Avances en cobertura energética rural*. Pacto Global Red Colombia. <https://www.pactoglobal-colombia.org/>
- ESPAE Business School. (2022). *¿Qué es IPMA?* <https://educacionenmanagement.espae.edu.ec/>
- García, R. (2014). *Pobreza energética en América Latina*. CEPAL. <https://repositorio.cepal.org/>
- González, J., Rojas, M., & Herrera, P. (2021). Valorización energética del bagazo de caña en sistemas rurales. *Ingeniería y Desarrollo*, 39(2), 88–103.
- Goss-Sampson, M. (2018). *Análisis estadístico con JASP: Una guía para estudiantes*. Universitat Oberta de Catalunya. <https://openaccess.uoc.edu/>
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6.ª ed.). McGraw-Hill.
- Hernández Sampieri, R., & Mendoza Torres, C. P. (2018). Concepción del diseño de investigación cuantitativa. En *Metodología de la investigación* (pp. 148–193). McGraw-Hill.
- HubSpot. (2023). *Qué es la metodología Lean y cómo implementarla con éxito*. <https://blog.hubspot.es/>

- IEBS. (2022). *En qué consiste la metodología PRINCE2*. <https://www.iebschool.com/>
- IONOS. (2020). *Modelo V en desarrollo de sistemas*. <https://www.ionos.com/>
- Jaimes-Quintanilla, M., & Zabala-Vargas, S. (2024). Inteligencia artificial en la gestión de proyectos: Caso construcción y obra civil. *European Public & Social Innovation Review*, 9, 1-21.
<https://doi.org/10.31637/epsir-2024-1615>
- Jaimes-Quintanilla, M., & Zabala-Vargas, S. (2025). Apropiación de tecnologías emergentes en el sector de obra civil: Un análisis cualitativo. En *Ciencia Transdisciplinar en la Nueva Era Edición 4* (4.a ed.). Editorial Instituto Antioqueño de Investigación. 10.5281/zenodo.17831487
- Ladino, R. (2011). *La energía solar fotovoltaica como factor de desarrollo en zonas rurales de Colombia* [Tesis de maestría, Pontificia Universidad Javeriana]. <https://repository.javeriana.edu.co/>
- López, A., Martínez, D., & Sánchez, R. (2021). Factores operativos que afectan la eficiencia de biodigestores rurales. *Revista de Ingeniería Ambiental*, 13(1), 55–68.
- Ministerio de Minas y Energía. (2022). *Energías renovables: Biogás y biometano*.
<https://www.minenergia.gov.co/>
- Mora, C., & Zambrano, L. (2020). Acceso y calidad del servicio eléctrico en zonas rurales colombianas. *Revista Energía y Sociedad*, 7(1), 33–48.
- Muñoz, E., & Quintero, D. (2017). *Metodología para proyectos de energía solar fotovoltaica en el sector rural* [Trabajo de grado]. Universidad Tecnológica de Pereira.
- Muñoz-Sarria, F., & Bueno-López, M. (2022). Metodología para la selección de tecnologías en proyectos de energización rural. *Revista UIS Ingenierías*, 21(3), 85–100. <https://doi.org/10.18273/revuin.v21n3-2022008>
- Organización de las Naciones Unidas. (2015). *Objetivo de desarrollo sostenible 7: Energía asequible y no contaminante*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/energy/>
- Pinilla Sepúlveda, Á. (2016). Soluciones energéticas para zonas rurales. *Revista de Ingeniería*, (44), 36–39.
<https://doi.org/10.16924/revinge.44.5>

- Ramírez, P., Torres, J., & Mejía, L. (2021). Análisis económico de sistemas de biogás en agroindustrias rurales colombianas. *Revista Energética*, 18(2), 72–89.
- Rivera-Cadavid, L., Manyoma-Velásquez, P. C., & Manotas-Duque, D. F. (2019). Supply chain optimization for energy cogeneration using sugarcane residues. *Sustainability*, 11(23), Article 6565.
<https://doi.org/10.3390/su11236565>
- Sánchez, H., & Villada, M. (2018). Operación y mantenimiento de biodigestores rurales: factores críticos de éxito. *Revista Ingeniería y Región*, 10(1), 41–54.
- Santiago Russo, V. (2009). El proyecto PERMER. *Petrotecnia*. <https://www.petrotecnia.com.ar/>
- Scrum Inc. (2024). *Combinar Lean y Agile para la transformación organizacional*. <https://www.scruminc.com/>
- Torres, D., & Meneses, R. (2022). Adopción tecnológica en el sector panelero colombiano. *Revista Agroindustria y Desarrollo Rural*, 14(2), 101–118.
- Twenergy. (2022). *Biodigestores: Una solución sostenible para áreas rurales*. <https://www.twenergy.com/>
- Unidad de Planeación Minero Energética. (2022). *Potencial del biogás en Colombia*. UPME.
<https://www.upme.gov.co/>
- Vásquez, A., & Vidal, J. (2022). *Análisis económico de alternativas de densificación del RAC de caña de azúcar* [Tesis de pregrado]. Universidad del Valle.
- Villamizar, J. (2023). *Índice de pobreza energética en Colombia* [Tesis de maestría]. Universidad de los Andes.
- Zendesk. (2023). *Metodologías de gestión de proyectos: Modelos provechosos*.
<https://www.zendesk.com.mx/>
- Zabala-Vargas, S., & Jaimes-Quintanilla, M. (2025). Tecnologías 4.0 (IOT y ciencia de datos) orientada a optimizar la gestión de proyectos de construcción. *European Public & Social Innovation Review*, 10, 1-21. <https://epsir.net/index.php/epsir/article/view/1621>
- Zabala-Vargas, S., Jaimes-Quintanilla, M., & Jimenez-Barrera, M. H. (2023). Big Data, Data Science, and Artificial Intelligence for Project Management in the Architecture, Engineering, and Construction Industry: A Systematic Review. *Buildings*, 13(12), 2944. <https://doi.org/10.3390/buildings13122944>

Zabala-Vargas, S., Jiménez-Barrera, M., Vargas-Sanchez, L., & Jaimes-Quintanilla, M. (2023). Big data in construction project management: The Colombian northeast case. *Life-Cycle of Structures and Infrastructure Systems*, 1, 1, 3476-3483. <https://doi.org/0.1201/9781003323020>

Zabala-Vargas, S., Martínez-Ortega, J., & Jaimes-Quintanilla, M. (2025). Administración de proyectos apoyada en tecnologías emergentes (inteligencia artificial y ciencia de datos) en el sector de obra civil. VII International conference on applied engineering and innovative technologies-AENIT, Perú. <https://easychair.org/cfp/AENIT2025>

Anexos

ANEXO A

Instrumento 1 – Encuesta estructurada a fincas paneleras

Objetivo:

Recolectar información cuantitativa sobre condiciones energéticas, consumo de combustibles, generación de bagazo y percepción frente a tecnologías alternativas en fincas paneleras rurales.

Tipo de instrumento:

Encuesta estructurada de preguntas cerradas.

Población objetivo:

Propietarios o administradores de fincas paneleras rurales.

Datos generales

1. Nombre de la finca: _____
2. Municipio / Vereda: _____
3. Cargo del encuestado:
 Propietario Administrador Operario Otro: _____
4. Años de operación de la finca:
 Menos de 5 5–10 Más de 10

Bloque 1. Condiciones energéticas

5. ¿Cuenta la finca con conexión al servicio eléctrico?
 Sí No
6. ¿Con qué frecuencia experimenta cortes de energía eléctrica?
 Nunca
 1 vez por semana
 2–3 veces por semana

- 4–5 veces por semana
 - Más de 5 veces por semana
7. ¿Cómo describiría la calidad del voltaje durante la producción?
- Estable
 - Moderadamente inestable
 - Muy inestable
8. ¿Los cortes o variaciones eléctricas afectan su proceso productivo?
- Sí No
9. Si respondió sí, ¿en qué medida?
- Baja Media Alta

Bloque 2. Consumo de combustibles

10. ¿Qué tipo de combustible utiliza principalmente para la cocción de la caña?
- Leña
 - ACPM
 - Gas propano
 - Otro: _____
11. ¿Utiliza más de una fuente energética en el proceso productivo?
- Sí No
12. ¿Considera que el costo energético actual es:
- Bajo Medio Alto

Bloque 3. Generación y manejo del bagazo

13. ¿Cuántos kilogramos aproximados de bagazo se generan por jornada productiva?
- Menos de 100 kg
 - 100–150 kg
 - 150–200 kg
 - Más de 200 kg

14. ¿Qué destino se da actualmente al bagazo?

- Se quema completamente
- Se quema parcialmente
- Se almacena
- Se desecha
- Otro: _____

15. ¿Considera que el bagazo se aprovecha eficientemente?

- Sí No

Percepción frente a tecnologías alternativas

16. ¿Conoce qué es un biodigestor?

- Sí No

17. ¿Estaría dispuesto(a) a implementar un sistema de biodigestión en su finca?

- Sí No Tal vez

18. ¿Qué factores considera más importantes para adoptar esta tecnología?

- Costo
- Capacitación
- Acompañamiento técnico
- Resultados demostrables
- Otro: _____

ANEXO B

Instrumento 2 – Entrevista semiestructurada

Objetivo:

Profundizar en las percepciones, experiencias, barreras y expectativas de los productores paneleros frente al uso del bagazo y la implementación de biodigestores.

Tipo de instrumento:

Entrevista semiestructurada de preguntas abiertas.

Población objetivo:

Propietarios o administradores de fincas paneleras rurales.

Guion de entrevista

1. ¿Cómo describiría actualmente el acceso a energía eléctrica y combustibles en su finca?
2. ¿De qué manera afectan los cortes eléctricos o la inestabilidad energética su proceso productivo?
3. ¿Qué uso se le da actualmente al bagazo generado durante la molienda?
4. ¿Considera que este residuo podría aprovecharse mejor? ¿Cómo?
5. ¿Ha escuchado hablar de los biodigestores o del uso del biogás en procesos productivos?
6. ¿Qué beneficios cree que podría traer un sistema de biodigestión a su finca?
7. ¿Qué dificultades o riesgos percibe frente a la implementación de un biodigestor?
8. ¿Qué tipo de apoyo considera necesario para adoptar esta tecnología?
9. ¿Estaría dispuesto(a) a participar en procesos de capacitación para operar un sistema de biodigestión?
10. ¿Qué cambios cree que generaría un sistema de biogás en la sostenibilidad ambiental y económica de su finca?

ANEXO C**Matriz de análisis documental**

Autor / Año	Tipo de documento	Contexto	Biodigestor	Sustrato	Variables	Resultados clave	Aporte
Garfí et al. (2018)	Artículo científico	Rural, Latinoamérica	Tubular	Residuos agrícolas	Producción de biogás, eficiencia, costos	Biodigestores tubulares presentan alta viabilidad técnica y bajo costo de instalación en zonas rurales	Sustenta selección de biodigestor tubular

Bond & Templeton (2019)	Revisión técnica	Global	Domos fijos y tubulares	Biomasa orgánica	Operación, mantenimiento	La sostenibilidad depende más de gestión que de tecnología	Refuerza enfoque gerencial
Díaz et al. (2019)	Artículo científico	Agroindustria	Continuo	Bagazo de caña	Potencial energético, rendimiento de metano	Producción estimada entre 0,20–0,30 m ³ /kg SV	Sustenta cálculo energético
Surendra et al. (2020)	Artículo científico	Rural, países en desarrollo	Variados	Residuos agrícolas	Impacto ambiental y social	Biodigestión reduce emisiones y mejora seguridad energética	Aporta enfoque sostenible
CAR (2019)	Informe técnico	Colombia	Rural	Residuos paneleros	Gestión ambiental	Identifica impactos ambientales del mal manejo de residuos paneleros	Contextualiza problemática
FAO (2017)	Guía técnica	Rural global	Biodigestores domésticos	Estiércoles y residuos agrícolas	Diseño, operación	Define parámetros básicos de diseño y operación	Soporte técnico metodológico
UPME (2021)	Informe institucional	Colombia rural	Energía renovable	Biomasa	Cobertura energética	Déficit estructural en zonas rurales dispersas	Contexto energético nacional
ONU (2023)	Informe global	Global	Energía sostenible	Biomasa	Desarrollo sostenible	La bioenergía es clave en transición rural	Marco conceptual
Pérez et al. (2022)	Artículo científico	Rural tropical	Tubular	Residuos agroindustriales	Estabilidad operativa	Capacitación determina éxito del sistema	Refuerza eje formativo
López et al. (2021)	Artículo científico	Agroindustrial	Continuo	Bagazo	Calidad del sustrato	Homogeneidad mejora rendimiento	Sustenta protocolos operativos

Objetivo:

Sistematizar la información proveniente de estudios técnicos, artículos científicos y documentos institucionales relacionados con biodigestores, bagazo de caña, biogás y sostenibilidad energética rural.