

**Revisión Sistemática de Literatura de Sistemas de Producción de Biogás Mediante
Estiércol de Ganado**

Danilo Gabriel Muñoz Nieves
Cesar Augusto Zuluaga Trujillo

Universidad CESMAG
Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Electrónica
San Juan de Pasto
2026

**Revisión Sistemática de Literatura de Sistemas de Producción de Biogás Mediante
Estiércol de Ganado**

Danilo Gabriel Muñoz Nieves
Cesar Augusto Zuluaga Trujillo

Proyecto de trabajo de grado presentado al Comité Curricular del Programa de ingeniería
Electrónica en la modalidad Monografía

Asesor
Camilo Arturo Lagos Mora

Universidad CESMAG
Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Electrónica
San Juan de Pasto
2026

Página de Nota de Exclusión de Responsabilidad Intelectual

“El pensamiento que se expresa en esta obra es exclusivamente responsabilidad de sus autores y no compromete la ideología de la Universidad CESMAG”

Agradecimientos

En primer lugar, queremos expresar nuestros agradecimientos a nuestras familias, amigos y compañeros, quienes estuvieron presentes durante todo este proceso, brindándonos apoyo, motivación y confianza en cada etapa del desarrollo de este trabajo de grado. Su compañía y palabras de aliento fueron fundamentales para alcanzar esta meta.

De manera especial, agradecemos a nuestro asesor, Camilo Lagos, por su acompañamiento, dedicación y paciencia durante el desarrollo de este proyecto. Sus conocimientos, orientación y observaciones fueron esenciales para fortalecer nuestro trabajo y guiarnos a lo largo de este proceso investigativo.

Asimismo, extendemos nuestro agradecimiento a los jurados William Arevalo y Miller Ruales, por el tiempo dedicado a la revisión de este trabajo, por sus aportes, recomendaciones y observaciones, las cuales contribuyeron significativamente al mejoramiento, fortalecimiento y culminación satisfactoria del proyecto.

Finalmente, agradecemos a todas las personas que, de una u otra manera, hicieron parte de este camino y aportaron a nuestro crecimiento tanto académico como personal.

Dedicatoria

Dedico este proyecto de grado, en primer lugar, a mi Padre y Madre quienes han sido mi pilar inquebrantable a lo largo de este arduo camino. Desde el primer día, su amor incondicional, su fe en mí y su inagotable paciencia me han brindado la fuerza necesaria para superar cada desafío y alcanzar este paso en mi vida. Han sacrificado tanto, renunciando a sus propias comodidades y sueños, para asegurar que yo tuviera todas las oportunidades para prosperar.

A mis hermanos que siempre estuvieron presentes y de una u otra manera me daba fuerzas para continuar, gracias por estar siempre a mi lado, por sus consejos y por creer en mí.

A mi abuelo, por todo su apoyo que me han brindado, no solo me ha motivado, sino que también me ha dado la confianza para seguir adelante, incluso en los momentos más difíciles.

A mi compañero Cesar y Juan, por apoyarme cuando más lo necesitaba, porque a pesar de las situaciones y problemas buscamos soluciones y correcciones ayudándonos mutuamente.

Finalmente, a todas aquellas personas que, de alguna manera, han sido fuente de inspiración y motivación en mi vida. Este camino me enseña a no dejar que los obstáculos me detengan. Si encuentras un muro, no te rindas; busca una manera de superarlo.

Danilo Gabriel Muñoz Nieves

Dedicatoria

Dedico este trabajo de grado, en primer lugar, a mi familia, por ser el motor que me impulsó a seguir adelante en cada etapa de este proceso. A mi mamá, por su amor incondicional, sacrificio y apoyo constante; a mi hermana, por acompañarme y brindarme ánimo en los momentos más difíciles; y a mi abuela, por sus consejos, cariño y confianza, que siempre fueron una fuente de motivación para mí.

También quiero dedicar este logro a mi novia, por su amor, paciencia y apoyo incondicional durante este camino.

De igual manera, dedico este trabajo a mi compañero, Danilo, por su compromiso, esfuerzo y dedicación durante el desarrollo de este proyecto. Su apoyo y trabajo en equipo fueron fundamentales para alcanzar esta meta.

Finalmente, expreso mi gratitud a nuestro asesor, Camilo Lagos, por su guía, acompañamiento y conocimientos brindados a lo largo de este proceso académico.

A todos ustedes, gracias por ser parte fundamental de este logro académico y personal.

Cesar Augusto Zuluaga Trujillo

Contenido

Lista de tablas	10
Lista de figuras.....	11
Introducción	12
1. El problema de investigación.....	13
1.1 Objeto o tema de Investigación.....	13
1.2 Línea de Investigación	13
1.3 Sub-línea de Investigación	13
1.4 Planteamiento del problema	13
1.5 Formulación del problema	14
1.6 Objetivos	14
1.6.1 Objetivo General	14
1.6.2 Objetivos Específicos.....	14
1.7 Justificación.....	15
1.8 Viabilidad.....	15
1.9 Delimitación	15
2. Tópicos del marco teórico.....	17
2.1 Antecedentes	17
2.1.1 Household anaerobic digesters for biogas production in Latin America: A review	17
2.1.2 From manure to megawatts: Navigating the sustainable innovation solution through biogas production from livestock waste for harnessing green energy for green economy	17

2.1.3 Livestock Agriculture Greenhouse Gases for Electricity Production: Recent Developments and Future Perspectives	18
2.1.4 Systematic literature reviews: An introduction.....	19
2.2 Enunciados de los supuestos teóricos.....	20
2.2.1 Biogás.....	20
2.2.2 Revisión sistemática de literatura.....	20
2.2.3 Parsifal.....	21
2.2.4 Digestión anaeróbica.....	22
3. Metodología	23
3.1 Tipo de revisión.....	23
3.2 Protocolo de revisión.....	23
3.2.1 Planificación.....	23
3.2.2 Búsqueda	23
3.2.3 Selección	24
3.2.4 Evaluación.....	24
3.2.5 Extracción y síntesis.....	24
3.3 Universo y muestra.....	24
3.4 Técnicas de recolección de información	25
3.5 Instrumentos de recolección de información	25
4. Resultados	26
4.1 Selección de artículos mediante revisión de literatura	26
4.1.1 Planificación.....	26
4.1.2 Búsqueda	27
4.1.3 Selección de artículos.....	29
4.1.4 Evaluación de artículos	30

31

4.2	Análisis documental de la Revisión Sistemática de Literatura	32
4.2.1	Tecnologías de biodigestión utilizadas en la producción de biogás.....	32
4.2.2	Factores que influyen en la eficiencia de los sistemas	40
4.2.2.3	<i>Sustratos/Nutrientes</i>	44
4.2.2.4	<i>Otros</i>	44
4.2.2.5	<i>Inhibidores/Toxicidad</i>	45
4.2.2.6	<i>Mezcla</i>	45
4.2.2.7	<i>Tiempo de retención</i>	45
4.2.3	principales impactos ambientales, sociales y económicos	48
4.2.4	Diseños de biodigestores	55
4.2.5	Complejidad del diseño de biodigestor	62
5.	Discusión de resultados.....	65
6.	Conclusiones	67
7.	Bibliografía	69

Lista de tablas

Tabla 1: Resumen del archivo de recolección de los metadatos (Excel).....	32
Tabla 2: Tecnologías para la producción de biogás.....	33
Tabla 3: Cuadro comparativo digestión anaeróbica.....	36
Tabla 4: Cuadro comparativo co-digestión anaeróbica.	38
Tabla 5: Factores que influyen en la eficiencia de los sistemas	41
Tabla 6: Cuadro comparativo de factores que influyen en la eficiencia de los sistemas..	46
Tabla 7: Impactos ambientales, sociales y económicos.....	49
Tabla 8: Cuadro comparativo de impactos ambientales, sociales y económicos.	53
Tabla 9: Diseños de biodigestores	56
Tabla 10: Cuadro comparativo de diseños de biodigestores.....	60
Tabla 11: Cuadro comparativo de la complejidad de los biodigestores.	62

Lista de figuras

Figura 1: Esquemático PRISMA de la RSL	31
---	----

Introducción

Una de las fuentes de energía renovables de amplio uso en la actualidad es la generada con biogás a partir de estiércol de ganado, por ser una fuente barata, amigable con el ambiente y que no requiere de una infraestructura compleja es una alternativa optima que nos ayuda a resolver el problema de abastecimiento de energía eléctrica para diferentes usos.

El proceso permite transformar la biomasa generada por los animales en energía limpia y sostenible, además tiene ventajas como contribuir a combatir los efectos del cambio climático reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero. Otra contribución del uso de esta energía así producida es que se mejoran los procesos en la agricultura.

El uso de esta energía trae ventajas económicas, técnicas para la agricultura especialmente y se puede producir a pequeña, mediana y gran escala de acuerdo a las necesidades de los usuarios, que pueden ser todos los productores.

El presente trabajo de grado tiene como propósito desarrollar una monografía cuyo objetivo es realizar una Revisión Sistemática de Literatura (RSL) siguiendo una metodología adecuada a partir de una búsqueda exhaustiva en diferentes bases de datos, revisión de artículos científicos sobre el tema que nos presentan aspectos específicos sobre el tema escogido, nos muestran su desarrollo, técnicas, resultados, impactos y en general abarcan la mayoría de aspectos a tener en cuenta a la hora de emprender este tipo de actividades de producción de energía a partir de material orgánico como el estiércol de ganado.

El proceso siguió las fases de planificación, búsqueda, selección, evaluación, extracción y síntesis de información, con el fin de consolidar el estado actual del tema en la literatura existente.

Lo anterior como contribución al conocimiento que requieren los interesados en el tema que contribuya a la realización de proyectos que buscan un aprovechamiento racional y técnico de los recursos renovables como fuente segura de producir energía para la agricultura y otras actividades económicas.

1. El problema de investigación

1.1 Objeto o tema de Investigación

Sistemas de producción de biogás mediante estiércol de ganado.

1.2 Línea de Investigación

Potencia y Energía. La línea de Potencia y Energía del programa de Ingeniería Electrónica de la Universidad CESMAG enfoca su trabajo en el estudio de la generación, transformación, intercambio, transporte, distribución, almacenamiento y consumo de energía eléctrica de manera absoluta o por unidad de tiempo, incluyendo el diseño, análisis, control y optimización de sistemas de electrónica de potencia. Las líneas de investigación incluyen Calidad de la Energía y Energías Alternativas.

1.3 Sub-línea de Investigación

Las energías alternativas son aquellas que se obtienen mediante procesos alternativos a los tradicionales (quema de combustibles fósiles o en el caso de Colombia la hidroeléctrica a gran escala), estas se dividen en renovables o limpias, las cuales se obtienen de fuentes naturales capaces de regenerarse de manera más rápida de lo que se consumen o ser virtualmente infinitas; y en no renovables cuya fuente se consume más rápido de lo que se regenera pero que a diferencia las fuentes tradicionales el impacto ambiental es menor. Planteamiento o Descripción del Problema.

1.4 Planteamiento del problema

Entre las alternativas para producir una energía limpia que disminuya drásticamente los efectos del uso de combustibles fósiles e hidrocarburos, especialmente la emisión de gases de efecto invernadero esta la producción de biogás a partir de desechos orgánicos producidos por el ganado bovino; esta práctica que viene incrementándose entre productores y organizaciones dedicadas al tema se ha convertido en una actividad en crecimiento y tanto entidades gubernamentales como privadas están incentivando dichas prácticas por los beneficios que conlleva.

Además de producir energía que se usa para diferentes fines es un aporte a la conservación del medio ambiente y al ahorro de recursos por su costo competitivo.

Lo que comenzó como una solución particular de pequeños productores para solucionar problemas de saneamiento y cumplimiento de normas ambientales hoy en día se ha convertido en una práctica común en la agroindustria de la mano de la tecnología, y el uso de biodigestores que en sus inicios fueron de tipo artesanal hoy en día su evolución técnica permite una transformación de un pasivo ambiental en un activo energético.

Si bien existen diversos estudios y literatura sobre el tema que abordan infinidad de aspectos alrededor del tema del uso y aprovechamiento de biodigestores para la agroindustria no existe una consolidación ordenada de la información técnica producida sobre el tema en mención, siendo imprescindible realizar una revisión detallada y sistemática que organice y clasifique la información disponible, información técnica que sea de utilidad a quien le interese el tema.

Por lo anterior este trabajo plantea realizar una revisión del estado del arte sobre los sistemas de producción de biogás a partir de estiércol de ganado bovino, con el fin de contribuir a su estudio y aplicación práctica en el desarrollo de las actividades productivas.

1.5 Formulación del problema

¿Cuál es el estado del arte sobre la producción de biogás a partir de estiércol de ganado?

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo General

Realizar una revisión sistemática de la literatura científica actualizada sobre la producción de biogás a partir de estiércol de ganado.

1.6.2 Objetivos Específicos

Determinar los documentos científicos relacionados con sistemas de producción de biogás mediante estiércol de ganado.

Analizar sistemáticamente los documentos seleccionados de acuerdo a las preguntas de investigación.

Sintetizar la información analizada de acuerdo a las preguntas de investigación.

1.7 Justificación

En Nariño la ganadería genera grandes cantidades de estiércol que si no se manejan bien generan contaminación en las fuentes de agua y aportan al cambio climático ya que liberan gases como el metano. Una forma de solucionar este problema es con el uso de biodigestores los cuales permiten transformar el estiércol en un biofertilizante.

Sin embargo, existe poca información sobre la producción de biogás a partir de estiércol de ganado en el área de ganadería en Nariño, el objetivo de la presente investigación es ayudar a ese vacío de conocimiento con una revisión sistemática de la información que hay disponible y realizar un análisis de estudios que permitirían identificar mejoras para la implementación de biodigestores.

1.8 Viabilidad

El proyecto es viable porque se trata de revisar por medio de bases de datos como Scopus, IEEE, ScienceDirect, SciELO, Web of Science entre otras, artículos acerca de la producción de biogas por medio de biodigestores con estiércol de ganado, lo que se trataría en esta monografía es leer artículos para responder preguntas que aclaren como es la producción de biogás, cuantos tipos de tecnologías de biodigestores hay actualmente, evaluar la eficiencia, costos, adaptabilidad. Todo esto se puede ya que se cuenta con acceso a las bases de datos descritas anteriormente, ya que la universidad CESMAG, sus directivos y profesores cuenta con suscripciones a estas herramientas, también es importante destacar que se cuenta con el apoyo de profesores y asesores para el manejo de estas herramientas, por lo cual no sería un problema manejar y aprovechar todo lo que nos ofrecen.

1.9 Delimitación

En este documento se realizó una revisión sistemática de literatura de artículos acerca de sistemas de producción de biogás mediante estiércol de ganado, para responder las preguntas propuestas:

- ¿Cuáles son las tecnologías de biodigestión más utilizadas en sistemas de producción de biogás?
- ¿Qué factores influyen en la eficiencia de estos sistemas?
- ¿Cuáles son los principales impactos ambientales, sociales y económicos de la producción de biogás a partir de estiércol de ganado?
- ¿Qué diseños existen en la actualidad para los biodigestores?
- ¿Cuál es la complejidad del diseño del biodigestor?

Para responder las preguntas propuestas se hizo uso de bases de datos como Scopus, ScienceDirect, IEEE, SciELO y Web of Science.

La revisión sistemática de literatura se llevó a cabo entre el segundo semestre de 2024 y el primer semestre de 2026 en el departamento de Nariño, en la ciudad de Pasto.

Para artículos de la siguiente cadena de búsqueda y sus sinónimos:

- Biodigestores
- Biogás
- Estiércol de ganado
- Producción
- Biometano
- Digestión anaeróbica

2. Tópicos del marco teórico

2.1 Antecedentes

2.1.1 *Household anaerobic digesters for biogas production in Latin America: A review*

El antecedente de [5]. Aporta un enfoque general de la implementación de biodigestores caseros en áreas rurales de América Latina. Este se centra en la historia y aplicaciones de los biodigestores en la región; También en sus aspectos sociales, económicos, ambientales y técnicos que se vinculan con su funcionamiento. En este documento se debate sobre las diferentes experiencias exitosas obtenidas en la última década en la región, incorporando la creación de la Red de biodigestores en América Latina y el caribe (Red/BioLac). En esta se organizan programas de investigación y ejecución de biodigestores en todo el continente.

La diferencia entre [5] y el presente es que uno abarca los biodigestores de forma casera en lugares rurales de américa latina con aspectos sociales, adopción tecnológica, pobreza energética; desarrollando un enfoque más contextual. Mientras que este trabajo no se limita a biodigestores domésticos y analiza diferentes tecnologías de biodigestión, eficiencia, diseño de biodigestores, factores operativos como temperatura, pH, tipo de sustrato, co-digestión, entre otros, teniendo un enfoque más técnico y comparativo.

2.1.2 *From manure to megawatts: Navigating the sustainable innovation solution through biogas production from livestock waste for harnessing green energy for green economy*

Este trabajo estudia sobre como la producción de biogás por los residuos ganaderos funciona como una alternativa viable para la producción de energía, calórica o eléctrica. En este se hablan de los beneficios económicos que puedan tener los campesinos al vender y comercializar el biogás; sociales, y ambientales, ya que ayuda a disminuir gases de efecto invernadero al utilizar el estiércol del ganado. También plantea las dificultades que puedan aparecer al construir un biodigestor o una planta de biogás y recomienda métodos para aumentar la viabilidad económica a la hora de su construcción. El trabajo se enfoca en la importancia de

los problemas ambientales en la sociedad, en como el cambio climático afecta a todo el mundo, destaca la importancia de los sistemas de producción de biogás por su sostenibilidad y como ayudan contra el cambio climático.

El artículo [6] y el presente trabajo hablan de la producción de biogás a partir de estiércol y residuos ganaderos, pero el enfoque y el alcance son diferentes. El artículo [6] tiene una perspectiva orientada a sostenibilidad, economía verde, transición energética y el impacto económico y ambiental del biogás, es decir, en como los biodigestores ayudan a los campesinos o a las personas involucradas con la venta, la generación, y la adopción del biogás en el día a día, ayudando al desarrollo sostenible de la región. El presente proyecto se enfoca en la eficiencia de los sistemas, los diferentes factores operativos en los cuales entran co-digestión, temperatura, pH, entre otras, y los diferentes diseños de biodigestores. La principal diferencia entre el artículo [6] y este trabajo es el enfoque técnico en los sistemas de producción de biogás, en el análisis de las tecnologías de biodigestión, la eficiencia, y diferentes variables operáticas que repercuten en el rendimiento del sistema.

2.1.3 Livestock Agriculture Greenhouse Gases for Electricity Production: Recent Developments and Future Perspectives

El artículo Desarrollado por [7] se enfoca principalmente en los gases de efecto invernadero ocasionados por la ganadería y la agricultura, de cómo transformarlos en electricidad, para así aprovechar el gas metano, que es un compuesto principal del biogás y dar una solución sostenible para el futuro. Este artículo se enfoca principalmente en las tecnologías necesarias para la combustión del biogás, también, en cómo se pueden utilizar. Se destacan algunos métodos alternativos a la combustión como son las celdas de combustible microbiana y la reforma del metano. El principal análisis del documento está enfocado en la producción de electricidad luego de la extracción del biogás, la sostenibilidad energética, es decir, sin comprometer los recursos de las generaciones futuras, y que tipos de tecnologías existen para la reducción de los gases de efecto invernadero; tiene como objetivo identificar las diferentes tecnologías para la reducción de las emisiones y además generar electricidad a partir de los gases de efecto invernadero producidos por el ganado bovino.

El artículo [7] y el presente tienen como campo de estudio en común la producción de biogás a partir de estiércol de ganado bovino, para con el correcto proceso ayudar a disminuir los gases de efecto invernadero en la atmosfera, así como el aprovechamiento del gas metano para la generación de electricidad. Este documento también tiene otro tipo de enfoque, como la digestión anaeróbica, la co-digestion, las diferentes variables operativas a la hora de la obtención del biogás y parámetros técnicos de digestión, como lo son: temperatura, pH, tipos de biodigestores, entre otros. Uno se centra en cómo podemos aprovechar los gases de efecto invernadero producidos por el ganado bovino, y el otro en la producción de biogás a partir del estiércol del ganado.

2.1.4 Systematic literature reviews: An introduction

El trabajo [5] examina, mediante la exploración de la metodología de las Revisión Sistemática de la Literatura (RSL), su aplicación en la investigación sobre diseño. Defiende que las RSL son fundamentales para la síntesis de evidencia científicas de forma transparente y reproducible, lo que permite también resolver importantes preguntas de investigación. A pesar de las dificultades para implementarlas en el dominio del diseño, concluye que las RSL son valiosas para la identificación de lagunas en la literatura, para la mejora de la práctica del diseño, y específicamente, la necesidad de desarrollar directrices para adaptar la metodología de RSL a la investigación sobre diseño. Pero también nos ofrece unos componentes clave o principales de una SLR:

- Protocolo claro, explícito y detallado: Definir un protocolo que guíe el proceso de revisión de forma clara y explícita e incluyendo objetivos y preguntas de investigación
- Búsqueda sistemática de literatura: Realizar una búsqueda sistemática y documentada de la literatura relevante, especificando la estrategia de búsqueda y las fuentes utilizadas.
- Criterios de inclusión y exclusión: Establecer criterios claros e incluibles, que especifican las evidencias en literatura relevantes para la revisión basándose en los aspectos del tema, de los métodos o de la calidad en las fuentes.
- Evaluación de la calidad de la evidencia: Analizar y valorar la calidad de los estudios incluidos en la revisión para asegurar la validez de los hallazgos.
- Síntesis de resultados: Juntar y resumir los hallazgos de los estudios que han sido revisados, reconociendo las pautas, tendencias y lagunas de la literatura existente

- Transparencia y reproducibilidad: Documentar el proceso de revisión de forma adecuada para que el resto de investigadores puedan replicar el estudio.

Las Revisiones Sistemáticas de Literatura son una poderosa metodología para sintetizar y evaluar la evidencia en la investigación de diseño, y aunque su uso viene acompañado de aspectos difíciles que suponen un esfuerzo considerable y de que los métodos están adaptados a las especificidades del diseño, en su utilización se puede encontrar una buena contribución para la mejora de la comprensión y la práctica del diseño.

Indicar que el desarrollo de unas directrices claras y adaptadas para la utilización de SLR facilitará la utilización de éstas en la investigación de diseño y permitirá a los investigadores poder proceder e intentar abordar preguntas importantes y críticas en el proceso de Investigación y evitar la duplicación en la investigación.

2.2 Enunciados de los supuestos teóricos

2.2.1 *Biogás*

Se denomina «metanización» al proceso de fermentación anaeróbica de los componentes orgánicos de los residuos [6]. Esta fermentación se da por bacterias que crecen en un ambiente sin oxígeno. En el transcurso de la transformación de la materia orgánica que se le llama digestión las bacterias producen un gas que se denomina biogás.

El biogás puede generarse de forma natural cuando los residuos se descomponen vertederos o puede ser producido con digestores anaeróbicos. La digestión anaeróbica se puede generar con diferentes residuos como lo son los restos de cosechas, residuos agrícolas, residuos ganaderos, todos que sueltan las aguas residuales todos estos residuos pueden tratarse por separado o bien de forma conjunta.

2.2.2 *Revisión sistemática de literatura*

Una revisión sistemática de literatura es un procedimiento estricto que intenta reunir, evaluar y sintetizar la información disponible acerca de un tema determinado. Este método no solo proporciona una perspectiva completa del estado actual del saber acerca del tema, sino que

también hace posible descubrir las lagunas existentes en la investigación. Según Keele et al [7], la revisión sistemática incluye etapas concretas como la formulación de preguntas de investigación, la definición de criterios relativos a inclusión y exclusión y la búsqueda en fuentes relevantes. Este tipo de enfoque proporciona la certeza de que las conclusiones sean de fiar.

2.2.3 Parsifal

Parsifal es una herramienta en línea Gratuita diseñada para ayudar a los investigadores y académicos a realizar revisiones sistemáticas de la literatura. Los investigadores distribuidos geográficamente pueden trabajar juntos dentro de un espacio de trabajo compartido, diseñando el protocolo y llevando a cabo la investigación.

Su principal objetivo es facilitar el proceso de planificación, ejecución y reporte de una revisión sistemática mediante la automatización y organización de varias etapas clave, como la selección de estudios, la extracción de datos y la evaluación de calidad.

Parsifal permite:

- Crear protocolos de revisión sistemática.
- Administrar criterios de inclusión y exclusión.
- Registrar datos extraídos de cada estudio.
- Evaluar la calidad de los estudios incluidos.
- Generar reportes y exportarlos para integrarlos en publicaciones académicas.

Durante la fase de planificación, Parsifal ayuda con los objetivos, PICOC, preguntas de investigación, cadena de búsqueda, palabras clave y sinónimos, selección de fuentes, criterios de inclusión y exclusión. También proporcionará mecanismos para crear una lista de verificación de evaluación de calidad y formularios de extracción de datos.

Durante la fase de realización, se realizó la importación de archivos bibtex y seleccionar los estudios, encontrar duplicados entre todas las diferentes fuentes, ejecutar la evaluación de calidad y extraer datos de los artículos (Parsif.al, 2021).

2.2.4 Digestión anaeróbica

Según [9], la digestión anaeróbica es una biotecnología que se define como la conversión de residuos u otros desechos orgánicos en bioenergía, se han propuesto diferentes tratamientos de pretratamiento como métodos físicos químicos y biológicos para mejorar los procesos de degradación del sustrato y su valorización en productos de alto valor agregado como el biogás.

La digestión anaeróbica es un proceso biológico donde los microorganismos convierten la materia orgánica en condiciones de falta de oxígeno generando como principal producto el biogás en donde el proceso se suele dividir en cuatro etapas que son la hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y la metanogénesis.

2.2.5 Metodología prisma

Según (Blanco et al., n.d.). La metodología prisma es usada para realizar revisiones sistemáticas de una forma organizada, objetiva y rigurosa. Su principal objetivo es evitar el desvío de razonamiento en la selección y el análisis de artículos científicos, para así obtener resultados que sean más confiables.

Primero se define la pregunta de investigación y los criterios de inclusión y exclusión. Luego se realiza la búsqueda en bases de datos utilizando palabras clave para así encontrar artículos que sean relevantes, después de esto los artículos se filtran y seleccionan según los criterios establecidos anteriormente. Finalmente, la información de los artículos restantes o aceptados se organizan en una base de datos para analizar resultados y obtener conclusiones.

3. Metodología

3.1 Tipo de revisión

La investigación es de tipo descriptiva, ya que se enfoca en examinar artículos científicos relacionados con la producción de biogás a partir de estiércol de ganado. Para hacer esto, se revisarán artículos de investigación en bases de datos como Scopus, IEEE, ScienceDirect y SciELO.

El objetivo es identificar y evaluar las diferentes tecnologías de biodigestión y sus aplicaciones. El análisis permitirá recopilar información sobre la eficiencia de los tipos de biodigestores al igual que también se analizarán sus efectos ambientales.

3.2 Protocolo de revisión

El diseño de esta investigación se basa en la Revisión Sistemática de Literatura (RSL) de acuerdo con la metodología utilizada por la Universidad de Keele (Carrizo & Moller, 2018), que corresponda a:

3.2.1 Planificación

Al principio, se define algunos criterios para seleccionar la información más relevante. Se buscaron artículos científicos sobre producción de biogás a partir de estiércol de ganado. Estos artículos debían estar publicados en revistas y bases de datos confiables, en español o inglés, entre 2017 y 2025. Solo se consideraron estudios directamente relacionados con el tema y que ofrecían datos importantes. De esta manera, se asegura de que los documentos seleccionados fueran útiles para responder las preguntas de investigación.

3.2.2 Búsqueda

Se hizo una búsqueda en sitios de estudios importantes como Scopus, IEEE, ScienceDirect y SciELO. En estos sitios, se encontraron estudios sobre cómo se hace biogás con la ayuda de bacterias que no necesitan oxígeno. Para encontrar estos estudios, se usaron palabras

clave como biodigestores, biogás, estiércol de ganado y producción de biogás. El objetivo era encontrar investigaciones que ayudaran a hacer que los biodigestores funcionen mejor.

3.2.3 Selección

Se examinaron los artículos encontrados para eliminar duplicados y aquellos que no se alineen con el contexto de la investigación. Solo los documentos que presenten información valiosa sobre los diferentes tipos de biodigestores, su eficiencia y el impacto en la producción de biogás serán retenidos para un análisis más detallado.

3.2.4 Evaluación

En esta etapa se realizó la lectura de los documentos seleccionados a partir de la búsqueda realizada. Los artículos serán considerados o descartados en relación con su pertinencia respecto a los propósitos de la investigación, priorizando los artículos que proporcionan información cuantitativa sobre la eficiencia de los biodigestores, lo que permite dar respuesta a las preguntas de investigación y determinar que se considere adecuadamente el estado del arte sobre la producción de biogás utilizando estiércol del ganado.

3.2.5 Extracción y síntesis

Se extrajeron respuestas obtenidas de los artículos, así como también se les realizó una clasificación o agrupamiento de todas estas respuestas adquiridas, para así poder tener claro las respuestas a cada una de las preguntas que fueron cuestionadas anteriormente.

3.3 Universo y muestra

Artículos científicos extraídos de revistas indexadas desde el año 2017 en adelante que ofrezcan datos relevantes relacionada con la producción de biogás a partir de estiércol de ganado.

3.4 Técnicas de recolección de información

Las técnicas de recolección de información en esta investigación se basaron primordialmente en la búsqueda en bases de datos académicas reconocidas como Scopus, IEEE, ScienceDirect, SciELO y Web of Science, donde se obtendrán la mayoría de los artículos científicos.

3.5 Instrumentos de recolección de información

Esta monografía se basa en la revisión sistemática de artículos científicos relacionados con la producción de biogás a partir de estiércol de ganado. Para la gestión de la información obtenida, se utilizó Excel, Mendeley, Parsifal y Zotero como herramienta para almacenar, organizar y citar los datos recopilados de los estudios seleccionados.

4. Resultados

4.1 Selección de artículos mediante revisión de literatura

La Revisión Sistemática de Literatura (RSL) es una metodología bien delimitada y estricta que permite determinar un análisis de la producción científica de un tema posteriormente definido. En este proyecto, se ha seguido la metodología propuesta por la Universidad de Keele [1] y se ha tomado como guía en la búsqueda y descubrimiento, evaluación y síntesis de los estudios para extraer una idea acerca del estado del conocimiento de la temática de interés.

El proceso empieza desde la redacción de las preguntas de investigación que guiarán la estrategia de búsqueda en las bases de datos académicas así asegurando un artículo seleccionado válido. Después de esto se estudian y organizan los datos extraídos en un fichero de metadatos donde se extraen las evidencias que dan respuesta a las preguntas de investigación. Finalmente se comparan las evidencias encontradas, esto permite la elaboración de conclusiones que ayuden a futuras investigaciones.

4.1.1 Planificación

Para la fase de planificación se construyó una cadena de búsqueda con conectores lógicos y palabras clave orientadas a identificar artículos científicos relacionados con la producción de biogás a partir de estiércol de ganado. Para la construcción de esta cadena se hizo uso de Parsifal, una herramienta en línea que facilita el diseño de protocolos de revisión sistemática la cual permite estructurar de manera organizada los objetivos, criterios de inclusión y exclusión, así como las palabras clave para el estudio.

La cadena de búsqueda definida fue la siguiente:

("cattle manure" OR "livestock manure" OR "animal waste" OR "organic waste" OR "agricultural waste") AND ("anaerobic digestion" OR "biodigesters" OR "biogas production" OR "biogas systems" OR digest) AND ("continuous flow" OR "fixed dome" OR "floating drum" OR "semi-continuous" OR "batch digester") AND ("efficiency" OR "biofertilizers" OR "environmental impact" OR "methane yield" OR "energy conversion" OR "greenhouse gas reduction" OR "sustainability") AND (2017:2025) AND (LIMIT-TO(language, "English") OR LIMIT-TO(language, "Spanish"))*

El diseño de esta cadena fue un aspecto importante en el proceso, ya que permitió optimizar la identificación de literatura científica enfocada en sistemas de biodigestión.

La aplicación de esta cadena en bases de datos académicas (Scopus, IEEE, ScienceDirect, SciELO y Web of Science) facilitó encontrar estudios clave dando una base sólida para la evaluación y síntesis de la literatura sobre la producción de biogás mediante estiércol de ganado.

4.1.2 Búsqueda

Para la fase de búsqueda se emplearon como fuentes principales las bases de datos Scopus, IEEE Xplore, ScienceDirect, SciELO y Web of Science, seleccionadas por su amplitud, diversidad y pertinencia en cuanto a documentos científicos y técnicos. Estas plataformas concentran gran parte de la literatura académica más relevante en el campo de las energías renovables y, en particular, en la producción de biogás mediante digestión anaeróbica.

Para Scopus, cuya estructura contiene una amplia cantidad de documentos provenientes de distintas bases de datos y permite búsquedas en título, resumen y palabras clave, se empleó la siguiente cadena: **("cattle manure" OR "livestock manure" OR "animal waste" OR "organic waste" OR "agricultural waste") AND ("anaerobic digestion" OR "biodigesters" OR "biogas production" OR "biogas systems" OR digest) AND ("continuous flow" OR "fixed dome" OR "floating drum" OR "semi-continuous" OR "batch digester") AND ("efficiency" OR "biofertilizers" OR "environmental impact" OR "methane yield" OR "energy conversion" OR "greenhouse gas reduction" OR "sustainability") AND (2017:2025) AND (LIMIT-TO(language, "English") OR LIMIT-TO(language, "Spanish"))***

Para IEEE Xplore, que permite búsquedas dentro de metadatos como título, resumen y palabras clave, se utilizó la siguiente cadena: (**"cattle manure" OR "livestock manure" OR "animal waste" OR "organic waste" OR "agricultural waste"**) AND (**"anaerobic digestion" OR biodigesters OR "biogas production" OR "biogas systems" OR digest**) AND (**"continuous flow" OR "fixed dome" OR "floating drum" OR "semi-continuous" OR "batch digester"**) AND (**efficiency OR biofertilizers OR "environmental impact" OR "methane yield" OR "energy conversion" OR "greenhouse gas reduction" OR sustainability**)

Para ScienceDirect, que permite búsquedas avanzadas en título, resumen y palabras clave mediante el campo TITLE-ABSTR-KEY, se empleó la siguiente cadena: **TITLE-ABSTR-KEY ((**"cattle manure" OR "livestock manure" OR "animal waste" OR "organic waste" OR "agricultural waste"**) AND (**"anaerobic digestion" OR biodigesters OR "biogas production" OR "biogas systems" OR digest**) AND (**"continuous flow" OR "fixed dome" OR "floating drum" OR "semi-continuous" OR "batch digester"**) AND (**efficiency OR biofertilizers OR "environmental impact" OR "methane yield" OR "energy conversion" OR "greenhouse gas reduction" OR sustainability**)) AND PUBYEAR > 2016 AND PUBYEAR < 2026 AND (LANGUAGE(english) OR LANGUAGE(spanish))**

Para la base de datos SciELO, que permite realizar búsquedas mediante operadores booleanos en diferentes campos del documento, se aplicó la siguiente cadena: (**"cattle manure" OR "livestock manure" OR "animal waste" OR "organic waste" OR "agricultural waste"**) AND (**"anaerobic digestion" OR biodigesters OR "biogas production" OR "biogas systems"**) AND (**"continuous flow" OR "fixed dome" OR "floating drum" OR "semi-continuous" OR "batch digester"**) AND (**efficiency OR biofertilizers OR "environmental impact" OR "methane yield" OR "energy conversion" OR sustainability**)

Para Web of Science, debido a su sistema de indexación por temas y categorías, se aplicó la cadena: **TS=((**"cattle manure" OR "livestock manure" OR "animal waste" OR "organic waste" OR "agricultural waste"**) AND (**"anaerobic digestion" OR biodigesters OR "biogas production" OR "biogas systems" OR digest**) AND (**"continuous flow" OR "fixed dome"****

OR "floating drum" OR "semi-continuous" OR "batch digester") AND (efficiency OR biofertilizers OR "environmental impact" OR "methane yield" OR "energy conversion" OR "greenhouse gas reduction" OR sustainability)) AND PY=(2017-2025) AND LA=(English OR Spanish)

4.1.3 Selección de artículos

Las directrices de inclusión/exclusión se adoptaron previamente en la etapa de selección, con el objetivo de depurar el corpus original y conservar los estudios que podrían ser más relevantes para el estudio. En concreto se pudieron localizar 535 artículos distribuidos en Scopus con 419 artículos (78,3%), IEEE Xplore con 75 artículos (14%), Web of Science 42 artículos (7,7%), sin resultados en ScienceDirect y SciELO.

El proceso de depuración del conjunto de documentos se realizó a partir de una escala de etapas: primero, la revisión de los resúmenes y abstracts suponía dar de baja 341 artículos quedando un total de 194 artículos en el que pudiera documentar información útil; posteriormente -para dar de baja 76 más y con respecto a si la publicación quedaba incluida en el criterio de documento excluido (artículos de conferencias y libros)- se pasó a la revisión de títulos y del contenido para dar de baja 25 artículos que mantenían una escasa relación temática, alcanzando un total de 93 artículos seleccionados, y finalmente considerar 30 artículos no accesibles suponía que el análisis se realizara en únicamente 63 documentos.

Los criterios de inclusión se fijaron según la temática (producción de biogás mediante estiércol de ganado), el idioma (inglés o español) y el nivel temporal (2017–2025). Por su parte, los criterios de exclusión fueron documentos duplicados o publicaciones sin evidencia empírica (modelos teóricos o matemáticos), conferencias, libros y artículos que no respondiesen directamente a los objetivos de la investigación.

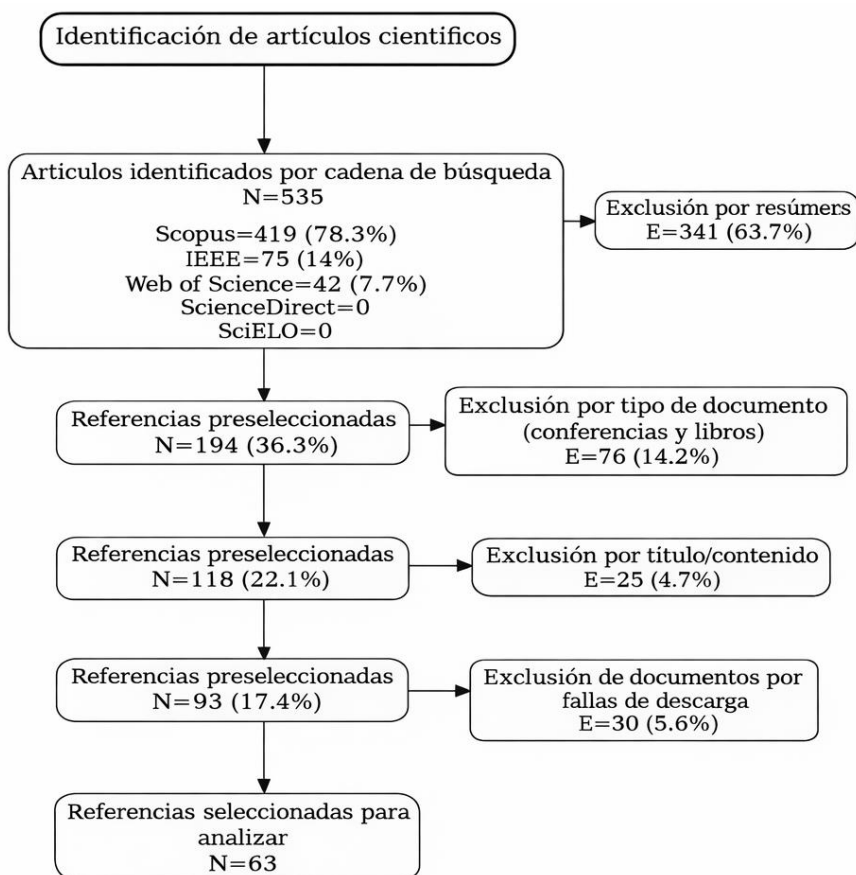
La aplicación de los criterios de inclusión/exclusión propone una serie de garantías relativas a la calidad, la pertinencia y la actualidad de los artículos seleccionados, que favorecen la base de la documentación para la extracción de metadatos y la síntesis de resultados.

4.1.4 Evaluación de artículos

En la fase de evaluación, se aplicaron los criterios de inclusión y exclusión definidos en la planificación, con el fin de filtrar los artículos recolectados en las distintas bases de datos. Inicialmente se identificaron 535 documentos en total, distribuidos principalmente en Scopus (419), IEEE (75) y Web of Science (42). Las bases de datos ScienceDirect y SciELO no arrojaron resultados relevantes para los criterios de búsqueda establecidos.

Posteriormente, se realizó una revisión de títulos, resúmenes y tipo de publicación, con lo cual se excluyeron 341 documentos por el análisis de resúmenes, 76 por corresponder a libros o revistas no científicas, 25 por no cumplir con pertinencia temática en el título y 30 por presentar problemas en la descarga del propio documento.

Luego de este proceso, se obtuvo un total de 63 artículos científicos, los cuales cumplen con los criterios establecidos y la base para el análisis en profundidad. Estos resultados se reflejan en el diagrama de flujo PRISMA (Figura 1) y en la Tabla 1, que resume los porcentajes de documentos por base de datos.

Figura 1: Esquemático PRISMA de la RSL

La Tabla 1 presenta un resumen del archivo de recolección de información en Excel en el que se encuentran las diferentes preguntas de investigación relacionadas con los biodigestores y sus aplicaciones. Entre las preguntas analizadas esta la Pregunta 2 que indaga sobre los factores que influyen en la eficiencia de estos sistemas, esta concentra la mayor atención con un 92.06% de las respuestas.

Por otro lado, las Preguntas 4 y 5 que se enfocan en los diseños existentes y en la complejidad recibieron un 87.30% de las respuestas cada una, esto refleja un interés en los aspectos técnicos de los biodigestores.

En contraste la Pregunta 1 que busca identificar las tecnologías de biodigestión más utilizadas y la Pregunta 3 relacionada con los impactos ambientales alcanzaron un 74.60% de respuestas.

Tabla 1: Resumen del archivo de recolección de los metadatos (Excel).

Pregunta	Respuesta	%
¿Cuáles son las tecnologías de biodigestión más utilizadas en sistemas de producción de biogás?	47	74.60
¿Qué factores influyen en la eficiencia de estos sistemas?	58	92.06
¿Cuáles son las principales impactos ambientales, sociales y económicos de la producción de biogás a partir de estiércol de ganado?	47	74.60
¿Qué diseños existen en la actualidad para los biodigestores?	55	87.30
¿Cuál es la complejidad del diseño del biodigestor?	55	87.30

4.2 Análisis documental de la Revisión Sistemática de Literatura

4.2.1 Tecnologías de biodigestión utilizadas en la producción de biogás

De los 63 documentos analizados, 47 de ellos hablan de tecnologías de biodigestión. Las técnicas encontradas fueron la Digestión Anaeróbica y la Co-digestion Anaeróbica, estas son importantes para obtener una mayor eficiencia en la degradación de la materia orgánica y la producción de biogás.

La tabla 2 muestra las tecnologías usadas para la producción de biogás. La relación de estas permite entender cuáles son las tecnologías más usadas para la producción de biogás. La tabla relaciona la tecnología con la referencia bibliográfica del documento que la utiliza.

Tabla 2: Tecnologías para la producción de biogás

N	Tecnologías de producción	Fuente
1	Digestión Anaeróbica	(Astuti et al., 2025)(Giduthuri & Ahring, 2023)(G. Li et al., 2025)(Aamir & Hassan, 2025)(Salehiyoun et al., 2025)(Parralejo Alcobendas et al., 2023)(Ali et al., 2020)(B. Singh et al., 2020)(B. Singh et al., 2021) (Zulkifli et al., 2020)(Rocamora et al., 2025)(Abbas et al., 2025)(J. Li et al., 2025)(Kolodynskij et al., 2024)(Azkarahman et al., 2025)(Salehi et al., 2025) (Repinc et al., 2021) (Ejigboye et al., 2025)(Sidi Habib & Torii, 2024)(Sharma et al., 2025)(Kegl et al., 2025)(Bhatia et al., 2020)(Bokhary et al., 2025)(R. K. Singh et al., 2025)(Elfeki et al., 2017)(Saha et al., 2025) (Kalamaras et al., 2025)
2	Co-digestion Anaeróbica	(Pandey et al., 2021)(Chaher et al., 2023)(Parralejo Alcobendas et al., 2023)(Wang et al., 2020)(Eliasson et al., 2023)(Enokida et al., 2025)(Gómez-Quiroga et al., 2022)(Montoro et al., 2019)(Pinheiro et al., 2022) (Choudhury et al., 2024)(Lizama et al., 2017)(Roubík & Mazancová, 2020)(Mirabi et al., 2024)(Nindhia et al., 2025)(Rajagopal, 2025)(Chaher et al.,

2021)(H. Li et al., 2025)(Wang et al., 2025)
(K. C. Obileke et al., 2021)(Mozhiarasi & Natarajan, 2025)(Lee et al., 2021)

Las tecnologías de producción utilizadas por los documentos revisados, se explican a continuación:

4.2.1.1 Digestión Anaeróbica

Según (Dar et al., 2024). La digestión anaeróbica (DA) es una biotecnología empleada globalmente que implica la conversión de desechos orgánicos en bioenergía. Se han propuesto diferentes enfoques de pretratamiento como métodos físicos, químicos, biológicos y una combinación de estos para mejorar la degradación de la materia orgánica para su posible valorización en productos de valor agregado como el biogás.

La digestión anaeróbica es un proceso biológico en el que microorganismos descomponen la materia orgánica en ausencia de oxígeno, produciendo biogás como principal resultado. Este proceso se divide en cuatro etapas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis, cada etapa es llevada a cabo por grupos específicos de microorganismos que transforman la materia orgánica en compuestos cada vez más simples.

El proceso de generación de biogás se denomina digestión anaeróbica (DA) y consiste en la degradación de la materia orgánica de los residuos por microorganismos específicos para producir biogás. En este proceso se genera otro producto: el digestato, que puede utilizarse como fertilizante orgánico(Parralejo Alcobendas et al., 2023).

Según (K. C. Obileke et al., 2021). La digestión anaeróbica (DA) es el proceso biológico de descomposición de la materia orgánica en ausencia de oxígeno. Implica el tratamiento de residuos agrícolas, municipales e industriales para la producción de metano.

4.2.1.2 Co-Digestión Anaeróbica

la co-digestion anaeróbica, como en la digestión anaeróbica, es el proceso en el cual los microorganismos en ausencia de oxígeno descomponen un sustrato para la obtención de biogás, en la co-digestion se utilizan dos o más sustratos para mejorar la eficiencia de este proceso.

Según(Enokida et al., 2025). Confirma la viabilidad de la co-digestión anaeróbica para optimizar la producción de biogás y utilizar residuos con diferentes características, promoviendo un enfoque económico sostenible y circular para la gestión de residuos agroindustriales y ganaderos.

Tabla 3: Cuadro comparativo digestión anaeróbica.

Sustrato principal	Características(material)	Condiciones óptimas	Resultado/Eficiencia
Estiércol bovino (Cow manure)	Residuo húmedo con C/N bajo (~14–18)	37 °C pH 6.8–7.3 HRT 30–40 d	Producción ~0.25–0.30 m ³ CH ₄ /kg VS buena estabilidad, pero bajo rendimiento energético por exceso de N.
Estiércol porcino (Pig manure)	Alta concentración de N y amoníaco; riesgo de inhibición.	35 °C pH 7.0 dilución 1:1 con agua HRT 30 d	Biogás ≈ 0.32 m ³ /kg VS Posible inhibición si [NH ₃] > 1 g N/L.
Estiércol avícola (Poultry manure)	Alto N y sales; requiere control estricto del pH.	37 °C pH 7.0 C/N < 20 HRT 25 d	0.27 m ³ CH ₄ /kg VS Acumulación de NH ₃ reduce CH ₄ > 20 %.
Lodos de aguas residuales (Waste activated sludge)	Materia orgánica estabilizada	35 °C pH 7.0 HRT 20–30d Pretratamiento ultrasónico	+40 % solubilización; 0.30 m ³ CH ₄ /kg VS
Residuos agrícolas lignocelulósicos (paja, bagazo, fibras)	Alto C/N, estructura recalcitrante	55 °C pH 7.0 HRT 40–50 d	Conversión de celulosa > 60 % 0.35 m ³ CH ₄ /kg VS Mejora > 50 % con pretratamiento.

Residuos alimentarios (Food waste)	Alto contenido de C y AGV	37 °C pH 6.8–7.0 OLR 2.5–3.5 g VS/L·d HRT 25 d	Alta producción 0.40 m ³ CH ₄ /kg VS (riesgo de acidificación si se sobrecarga)
Residuos de almidón / maíz molido (Cornmeal)	Rica en carbohidratos	37 °C pH 6.8–7.0 ISR 0.3–0.5 HRT 20 d	0.38 m ³ CH ₄ /kg VS Aumento 15 % con extracto enzimático crudo.
Suero de cervecería (Brewery spent grain / whey)	Alta carga orgánica y proteínas	37 °C pH 7.1 OLR 2.5 g VS/L·d HRT 25 d	CH ₄ 0.42 m ³ /kg VS Acidificación si se acumulan AGV
Residuos lignocelulósicos pretratados con oxidación húmeda o vapor (AWOEx / SE)	Fibras de estiércol digerido o bagazo tratados.	175 °C (oxidación húmeda) 55 °C digestión pH 7.0	Conversión > 80 % de hemicelulosa CH ₄ ↑ 60 % frente a sin tratar.
Estiércol + acelerante mineral (ceniza magnética, Fe)	Aditivo, no mezcla: cataliza metanogénesis.	37 °C pH 7.2 dosis Fe ≈ 0.5 g/L	CH ₄ ↑ 25 % Mayor velocidad de arranque.

Tabla 4: Cuadro comparativo co-digestión anaeróbica.

Combinación de sustratos	justificación de la mezcla	Condiciones optimas	Resultado/Eficiencia
Residuos alimentarios (FW) + lodos de aguas residuales (WW Sludge)	Equilibrar C/N y mejorar el contenido orgánico disponible	37 °C pH 7.0 HRT 20 d C/N $\approx$ 24.	+38 % CH ₄ frente a mono-digestión, mejor estabilidad
Estiércol bovino + residuos alimentarios urbanos	Aportar N y microorganismos del estiércol y carbono fácilmente degradable del FW.	35 °C pH 6.8–7.2 OLR 3.5 g VS/L·d HRT 30 d	Aumento 55 % CH ₄ pH estable Reducción de AGV
Estiércol bovino + residuos agroindustriales lignocelulósicos-lipídicos	Incrementar carga orgánica y energía potencial manteniendo C/N equilibrado.	37 °C pH 7.0 HRT 30 d C/N 25–30.	0.54 m ³ CH ₄ /kg VS Sin inhibición por amoníaco.
Estiércol bovino + batata dulce (residuo agrícola)	Aprovechar almidones de la batata como fuente de carbono.	35 °C pH 6.9 HRT 25 d C/N 28	0.57 m ³ CH ₄ /kg VS IRR 22 %
Estiércol bovino + residuos vegetales + cáscaras de papa o tomate	Reducir contenido de N del estiércol y mejorar biodegradabilidad.	37 °C pH 7.2 ISR 0.4 HRT 30 d	+45 % biogás Aumento 6 % CH ₄ en mezcla 75:25 (% v/v).

Estiércol porcino + residuos lignocelulósicos (Gliricidia sepium)	Aportar N (estiércol) y carbono (biomasa vegetal) en biodigestor portátil.	35 °C pH 7.1 HRT 30 d	+48 % producción biogás Aumento estabilidad microbiana.
Residuos lácteos (suero de queso) + estiércol vacuno	Reducir acidez del suero y mejorar metanogénesis.	37 °C pH 6.9–7.2 OLR 2.5 g VS/L·d	Incremento 40 % CH ₄ frente a mono-AD.
Residuos agrícolas (fibra de bagazo, paja) + estiércol	Incrementar contenido de carbono y superficie microbiana.	Termofílica 55 °C HRT 40 d pH 7.0	+52 % CH ₄ frente a AD sola Mejor degradación lignina.
Residuos de matadero + estiércol avícola	Balancear proteínas/lípidos y reducir NH ₃ libre.	37 °C pH 7.0 OLR 3 g VS/L·d	CH ₄ 0.49 m ³ /kg VS Reducción de NH ₃ en 20 %
Estiércol bovino + aceite o residuos grasos (aceite de cocina)	Aumentar potencial energético (grasas = alto CH ₄).	37 °C pH 7.0 ISR 0.5 Dosificación gradual.	+30 % CH ₄ con 10 % v/v grasa Exceso > 20 % inhibe.
Estiércol bovino + biochar / nZVI (como aditivo, no sustrato)	Acelerar transferencia electrónica y mitigar inhibición por AGV.	35–37 °C biochar 0.5 g/g VS nZVI 84 mg/g SSV	+25–35 % CH ₄ Mayor estabilidad Metano hasta 88 %

La digestión anaeróbica y la co-digestión anaeróbica son las técnicas más comunes para generar biogás estas se basan en lo mismo, descomponer la materia orgánica en ausencia de oxígeno. La digestión anaeróbica se hace usando un solo residuo como por ejemplo el estiércol, pero con el

tiempo ha evolucionado a la co-digestión donde se combinan varios residuos orgánicos ya que esto mejora el equilibrio de nutrientes y hace el proceso más estable.

Varios estudios demuestran que la co-digestión puede incrementar la producción de metano entre un 20% y 60% a comparación de usar solo un sustrato y también reduce problemas como las inhibiciones. Además, estos resultados pueden mejorar aplicando pretratamientos físicos o químicos y añadiendo materiales como biochar o hierro nanoestructurado que favorecen la actividad de los microorganismos.

4.2.2 Factores que influyen en la eficiencia de los sistemas

De los 63 documentos analizados, 58 abordan factores de eficiencia. Los factores más relevantes identificados son la temperatura con un 30.48%, seguida del pH con un 25.86%. En tercer lugar, se encuentran los sustratos/nutrientes con un 17.24%, seguidos por la categoría “otros” con un 29.31%. Finalmente, se destacan los inhibidores/toxicidad con un 5.17% y en menor proporción la mezcla y tiempo de retención con un 3.45% cada uno.

La tabla 5 presenta los principales factores que influyen la eficiencia en el proceso de biodigestión, organizados según su frecuencia de aparición en los documentos revisados. Se identificaron seis categorías de factores, cada una respaldada por múltiples fuentes. La tabla relaciona cada factor con la referencia bibliográfica del documento en el que se analiza.

Tabla 5: Factores que influyen en la eficiencia de los sistemas

N	Factores en la eficiencia	Fuente
1	Temperatura	(J. Li et al., 2025)(Bokhary et al., 2025)(Edenhofer et al., 2011)(Bhatia et al., 2020)(Kalamaras et al., 2025)(Kolodynskij et al., 2024)(Sidi Habib & Torii, 2024)(K. C. Obileke et al., 2021)(Dar et al., 2025) (Kegl et al., 2025)(Ejigboye et al., 2025)(Nindhia et al., 2025)(Álvarez-Fraga et al., 2025)(Zulkifli et al., 2020)(R. K. Singh et al., 2025)(Gómez-Quiroga et al., 2022)(Pandey et al., 2021)(Roubík & Mazancová, 2020) (Elfeki et al., 2017)(Rajagopal, 2025)
2	pH	(Salehi et al., 2025)(Amjad et al., 2025)(Abbas et al., 2025)(Eliasson et al., 2023)(Choudhury et al., 2024)(Aamir & Hassan, 2025)(Di Mario et al., 2024)(Chiappero et al., 2022)(Chaher et al., 2023) (Montoro et al., 2019)(Azkarahman et al., 2025)(Chaher et al., 2021)(Giduthuri & Ahring, 2023)(Mukhuba et al., 2020)(Pinheiro et al., 2022)

3	Sustratos/Nutrientes	(B. Singh et al., 2020)(B. Singh et al., 2021)(Wang et al., 2025)(Parralejo Alcobendas et al., 2023)(Lee et al., 2021)(Saha et al., 2025)(Wang et al., 2020)(Mozhiarasi & Natarajan, 2025)(Salehiyoun et al., 2025)
4	Otros	(Sharma et al., 2025) (Cerrillo et al., 2025)(Atelge et al., 2020)(Mahal & Yabar, 2025)(G. Li et al., 2025)(Ali et al., 2020)(Parralejo Alcobendas et al., 2023)(Enokida et al., 2025)(J. Li et al., 2025)(Lizama et al., 2017) (Kegl et al., 2025) (K. C. Obileke et al., 2021)(Edenhofer et al., 2011)(Pinheiro et al., 2022) (Sidi Habib & Torii, 2024)(Dar et al., 2025) (Bokhary et al., 2025)(Mukhuba et al., 2020)
5	Inhibidores/Toxicidad	(Chen et al., 2025)(Repinc et al., 2021)(Rocamora et al., 2025)
6	Mezcla	(H. Li et al., 2025)(Al-Addous et al., 2019)
7	Tiempo de retención	(Astuti et al., 2025)(Lizama et al., 2017)

Los factores de eficiencia utilizadas por los documentos revisados, se explican a continuación:

4.2.2.1 Temperatura

La temperatura tiene un gran impacto en la biodegradabilidad de sustancias que son utilizadas en la digestión anaeróbica ya que afectan la actividad metabólica de los microorganismos, un cambio en la temperatura genera variaciones en la actividad de los metanógenos lo que puede provocar posible inestabilidad en el proceso. Por lo tanto, la temperatura es uno de los indicadores clave que comúnmente se monitorean en los reactores anaerobios(Kalamaras et al., 2025).

La fluctuación en la temperatura ambiente es provocada por cambios climáticos, lo que provoca variaciones en la temperatura del modelo, esta inestabilidad en la temperatura impacta actividades metanogénicas reduciendo el rendimiento de metano. Esto sucede porque la temperatura ambiente está en contacto directo con la pared del digestor afectando la tasa de digestión esto hace que la cámara del digestor absorba o pierda calor(K. C. Obileke et al., 2021).

4.2.2.2 pH

Según (Salehi et al., 2025). El pH es un parámetro importante para el desempeño de la digestión anaerobia porque refleja la capacidad amortiguadora y la estabilidad del sistema ya que los metanógenos son sensibles a las variaciones de pH y su actividad óptima ocurre en un rango de 6.8–7.5.

Cuando el pH está por debajo de 6.5 provoca una reducción de rendimiento de metano y a una posible inestabilidad del proceso. Por otro lado, condiciones muy altas también pueden ser dañinas ya que alteran el equilibrio de la comunidad microbiana(Amjad et al., 2025).

Un pH cercano a la neutralidad es favorable para la actividad microbiana, mientras que una fuente orgánica rica asegura una relación óptima alimento/microorganismo. Un exceso de ácidos grasos volátiles (en particular propionato y butirato) puede obstaculizar la metanogénesis al crear condiciones ácidas perjudiciales para los metanógenos (Choudhury et al., 2024).

4.2.2.3 Sustratos/Nutrientes

La composición del sustrato tiene un impacto directo en la disponibilidad de nutrientes que necesitan los microorganismos y define el potencial de metano del sustrato. Un suministro equilibrado de nutrientes asegura estabilidad microbiana y previene la inhibición del proceso (B. Singh et al., 2021).

Las características del sustrato, como el equilibrio de nutrientes, la biodegradabilidad y la relación C/N tienen un papel clave en la determinación de la eficiencia de la digestión anaerobia, la codigestión de diferentes sustratos puede compensar deficiencias de nutrientes y mejorar el desempeño lo que resulta en mayor rendimiento de metano. (Parralejo Alcobendas et al., 2023).

4.2.2.4 Otros

Además de los parámetros habituales como la temperatura, el pH o la composición del sustrato, diversos estudios han identificado que hay otros factores que también influyen en la eficiencia de los sistemas de biodigestión.

Los pretratamientos físicos, químicos o biológicos como la explosión de vapor, la oxidación húmeda avanzada o el ultrasonido mejoran la solubilización de la materia orgánica y aumentan la tasa de conversión de lignocelulosa a metano así incrementando la eficiencia global del proceso (J. Li et al., 2025) (Lizama et al., 2017) (Kegl et al., 2025).

Por su parte, la adición de materiales conductivos como el biochar o el hierro cero valent (nZVI) demuestran que potencian la transferencia directa de electrones entre especies microbianas (DIET) y así mejoran la estabilidad del sistema y aumentan la producción de metano entre un 20 y 35 % (K. C. Obileke et al., 2021) (Edenhofer et al., 2011) (Pinheiro et al., 2022).

Asimismo, el diseño del reactor tiene una incidencia directa en la eficiencia, ya que determina la mezcla, la retención de biomasa y el contacto entre microorganismos y sustrato. Los reactores del tipo CSTR y UASB han mostrado una mayor eficiencia volumétrica en comparación con sistemas estáticos o discontinuos (Sidi Habib & Torii, 2024) (Dar et al., 2025).

Finalmente, el uso de sensores inteligentes e integración con tecnologías IoT ha permitido optimizar el control del pH, la temperatura y la presión del biogás, reduciendo

pérdidas energéticas y mejorando la estabilidad operativa a largo plazo(Bokhary et al., 2025)(Mukhuba et al., 2020).

4.2.2.5 Inhibidores/Toxicidad

Según (Chen et al., 2025). Cuando la concentración de amoníaco del sustrato es superior a 4 g $\text{NH}_4^+-\text{N/L}$, puede provocar una baja estabilidad y una reducción en la producción de metano, debido a que su membrana es altamente permeable el amoníaco libre (NH_3) puede entrar en las células microbianas y alterar el equilibrio de protones, lo que genera cambios en el pH.

4.2.2.6 Mezcla

Según (Al-Addous et al., 2019). La producción de biometano de la fracción orgánica de los residuos municipales sólidos (OFMSW) siendo mezclada con los lodos de la planta de aguas residuales de Za'atari resultó en una fuerte correlación con la cantidad de fracción orgánica, cuanto mayor fue el porcentaje de OFMSW mayor fue el rendimiento de biometano.

La producción de biogás a partir de la co-digestión de WL y SM... Estos resultados indicaron que un mayor porcentaje de WL en la mezcla de sustratos resulta en una mayor producción acumulada de biogás (CBP), lo cual se atribuyó principalmente al alto potencial de producción de biogás del WL (H. Li et al., 2025).

4.2.2.7 Tiempo de retención

Según (Lizama et al., 2017). Diversos estudios evaluaron la digestión anaerobia en reactores batch y semicontinuos con diferentes tiempos de retención, que van de 20 a 78 días, dependiendo de la concentración de sólidos y de la energía aplicada en el pretratamiento

ultrasónico. Por ejemplo, lodos activados con 1.78% de sólidos totales fueron digeridos durante 50 días; con 2.1% de sólidos durante 23 días; y con 3.93% de sólidos durante 78 días.

En el estudio (Astuti et al., 2025) se mostró que el tiempo de retención influye directamente en la eficiencia: el metano aumentó progresivamente hasta alcanzar su punto máximo entre la quinta y sexta semana, continuando en ascenso hasta la octava semana en los reactores con mayor proporción de estiércol bovino, mientras que los residuos vegetales solos produjeron menor CH₄ y mayores emisiones de N₂O.

Tabla 6: Cuadro comparativo de factores que influyen en la eficiencia de los sistemas.

Factor	Influencia sobre la eficiencia	Condición optima	Observaciones
Temperatura	Controla la velocidad metabólica y la diversidad microbiana.	Mesofílica 35–40 °C (más estable) Termofílica 50–55 °C (más rápida).	Termofilia → conversión lignocelulósica mesofilia → mayor estabilidad.
pH	Regula la actividad de arqueas metanogénicas pH bajo → acumulación de AGV.	6.8–7.4	pH < 6.5 reduce metano control automático o buffers naturales en AcoD mantienen estabilidad.
Nutrientes	Balance entre carbono (energía) y nitrógeno (proteína).	20–30	Bajo C/N → NH ₃ inhibitorio Alto C/N → fermentación incompleta.

Relación inóculo/sustrato (ISR)	Proporción microbiana inicial vs materia orgánica.	0.25–0.5 (g VS_inóculo/g VS_sustrato)	ISR bajo → retardo en arranque ISR alto → estabilidad, pero menor rendimiento por dilución.
Tiempo de retención hidráulico (HRT)	Tiempo de permanencia del sustrato en el reactor.	20–40 d (AD húmeda) 30–60 d (AD seca).	HRT corto → menor digestión Largo → mayor CH ₄ pero volumen alto.
Mezcla / agitación	Mejora transferencia de masa y uniformidad térmica.	Moderada (30–60 rpm o recirculación 1–2 vol/día).	Mezclador modificado ↑ biogás 42 %, exceso rompe flóculos.
Tamaño de partícula del sustrato	Afecta superficie de ataque microbiano.	1–5 mm óptimo para lignocelulósicos.	Partículas grandes → digestión incompleta Demasiado pequeñas → flotación.
Inhibidores / toxicidad	Exceso de NH ₃ , AGV, LCFA, sulfuro o metales pesados afectan metanogénesis.	NH ₃ < 1 g N L ⁻¹ VFA < 4 g L ⁻¹ .	Mitigación con biochar, zeolita o nZVI Moléculas QS mejoran estabilidad.
Pretratamientos	Rompen estructuras recalcitrantes (celulosa/lignina).	SE 175 °C; oxidación húmeda o enzimática antes de AD.	↑ 60 % CH ₄ y solubilización orgánica.

Aditivos / catalizadores	Mejoran transferencia electrónica y reducen inhibición.	Biochar 0.4–0.8 g g ⁻¹ VS nZVI ~ 80 mg g ⁻¹ SSV.	↑ 25–35 % CH ₄ mejor estabilidad.
Tipo de reactor / diseño	Define mezcla, contacto y retención de biomasa.	CSTR y UASB = mejor eficiencia volumétrica.	CSTR + IoT logra monitoreo y control estable.
Monitoreo y automatización (IoT / sensores)	Permite control en tiempo real de pH, T, OLR, presión, gas.	Uso de sensores ESP32, control PID.	Mejora eficiencia energética y evita fallas.

La eficiencia de los sistemas de biodigestión depende de la complejidad en la interacción entre factores físico-químicos y biológicos. La temperatura y el pH ayudan a regular la actividad de los microorganismos y la estabilidad del proceso, la composición del sustrato determina la accesibilidad de nutrientes, elementos como los inhibidores, el tiempo de retención y la mezcla interna afectan la tasa de conversión y la calidad del biogás, los pretratamientos y aditivos aumentan la solubilización de compuestos y ayudan a una transferencia electrónica más efectiva.

4.2.3 principales impactos ambientales, sociales y económicos

De los 63 documentos analizados, 47 detallan impactos ambientales, sociales y económicos, los impactos más frecuentes fueron impactos ambientales con un 100%, seguido de impacto económico con el 87.23% y por último el impacto social con el 74.47%.

La tabla 7 presenta los principales factores que influyen en los impactos ambientales, sociales y económicos en el proceso de biodigestión, organizados según su frecuencia de aparición en los documentos revisados. Cada una respaldada por múltiples fuentes. Esta

clasificación permite comprender cuáles son los principales impactos que genera la biodigestión. La tabla relaciona cada factor con la referencia bibliográfica del documento en el que se analiza.

Tabla 7: Impactos ambientales, sociales y económicos.

N	Impactos	Fuente
1	Ambientales	(Astuti et al., 2025)(Al-Addous et al., 2019)(Di Mario et al., 2024)(Parralejo Alcobendas et al., 2023)(Kolodynskij et al., 2024)(Amjad et al., 2025)(Mukhuba et al., 2020)(Montoro et al., 2019)(Ali et al., 2020)(Abbas et al., 2025)(Aamir & Hassan, 2025)(Rocamora et al., 2025)(Mirabi et al., 2024)(Chiappero et al., 2022)(K. C. Oibileke et al., 2021) (H. Li et al., 2025)(Atelge et al., 2020)(Giduthuri & Ahring, 2023)(Eliasson et al., 2023)(Mahal & Yabar, 2025)(Bhatia et al., 2020)(Ejigboye et al., 2025)(Sidi Habib & Torii, 2024)(Salehi et al., 2025)(Elfeki et al., 2017)(Edenhofer et al., 2011)(G. Li et al., 2025)(Enokida et al., 2025)(Mozhiarasi & Natarajan, 2025)(Pandey et al., 2021) (J. Li et al., 2025)(Chaher et al., 2021)(Roubík & Mazancová, 2020)(Nindhia et al., 2025)(R. K. Singh et al., 2025)(Lee et al., 2021)(Saha et al., 2025)(Rajagopal, 2025)(Chaher et al., 2023)(Gómez-Quiroga et al., 2022)(Salehiyoun et al., 2025)(Wang et al., 2025)(Pinheiro et al., 2022)(Álvarez-Fraga et al., 2025)(Cerrillo et al., 2025) (Choudhury et al., 2024)(B. Singh et al., 2021)
2	Sociales	(Astuti et al., 2025)(Al-Addous et al., 2019)(Di Mario et al., 2024)(Parralejo Alcobendas et al., 2023)(Amjad et al., 2025)(Mukhuba et al., 2020)(Montoro et al., 2019)(Ali et al., 2020)(Abbas et al., 2025)(Aamir & Hassan, 2025)(Rocamora et al., 2025)(Chiappero et al., 2022)(K. C. Oibileke et al., 2021)(H. Li et al., 2025)(Giduthuri & Ahring, 2023)

(Mahal & Yabar, 2025)(Bhatia et al., 2020)(Ejigboye et al., 2025)(Sidi Habib & Torii, 2024)(Salehi et al., 2025)(Elfeki et al., 2017)(Edenhofer et al., 2011)(G. Li et al., 2025)(Enokida et al., 2025)(Mozhiarasi & Natarajan, 2025)(Pandey et al., 2021)(J. Li et al., 2025)(Roubík & Mazancová, 2020)(Nindhia et al., 2025)(R. K. Singh et al., 2025)

(Lee et al., 2021)(Saha et al., 2025)(Rajagopal, 2025)(Álvarez-Fraga et al., 2025)(Choudhury et al., 2024)

3 Económicos

(Astuti et al., 2025)(Al-Addous et al., 2019)(Di Mario et al., 2024)(Parralejo Alcobendas et al., 2023)(Amjad et al., 2025)(Mukhuba et al., 2020)(Montoro et al., 2019)(Ali et al., 2020)(Abbas et al., 2025)(Aamir & Hassan, 2025)(Rocamora et al., 2025)(Chiappero et al., 2022)(K. C. Oibileke et al., 2021)(H. Li et al., 2025)(Atelge et al., 2020)

(Giduthuri & Ahring, 2023)(Eliasson et al., 2023)(Mahal & Yabar, 2025)(Bhatia et al., 2020)(Ejigboye et al., 2025)(Sidi Habib & Torii, 2024)(Salehi et al., 2025)(Elfeki et al., 2017)(Edenhofer et al., 2011)(G. Li et al., 2025)(Enokida et al., 2025)(Mozhiarasi & Natarajan, 2025)(Pandey et al., 2021)(J. Li et al., 2025)(Chaher et al., 2021)

(Roubík & Mazancová, 2020)(Nindhia et al., 2025)(R. K. Singh et al., 2025)(Lee et al., 2021)(Saha et al., 2025)(Rajagopal, 2025)(Chaher et al., 2023)(Gómez-Quiroga et al., 2022)(Salehiyoun et al., 2025)(Wang et al., 2025)(Choudhury et al., 2024)

Los impactos ambientales, sociales y económicos por los documentos revisados, se explican a continuación:

4.2.3.1 Impacto Ambiental

El estiércol animal muchas veces se ve como un simple desecho que contamina, sobre todo porque libera gases que afectan al clima, como el metano. Pero en realidad, si se maneja bien, puede convertirse en algo muy útil. Mediante la digestión anaerobia, ese residuo se transforma en biogás, una fuente de energía limpia que ayuda a reducir la contaminación y, al mismo tiempo, se puede aprovechar (Astuti et al., 2025).

En lugar de dejar que estos residuos se acumulen o se quemen lo que empeora el problema, este proceso les da un uso mucho más inteligente y sostenible (Di Mario et al., 2024).

Además, no todo termina con el biogás. El proceso deja un material llamado digestato, que funciona como un fertilizante natural. Este ayuda a nutrir el suelo y a mejorar su calidad, permitiendo reducir el uso de fertilizantes químicos. Al final, lo que parecía un problema se convierte en una solución: energía para usar y nutrientes para la tierra (Parralejo Alcobendas et al., 2023)

4.2.3.2 Impacto Social

En el estudio [24] se habla que la integración de subproductos industriales, como la ceniza volante magnética, en los sistemas de digestión anaerobia no solo mejora el rendimiento del biogás, sino que también ayuda a la sostenibilidad ambiental y la recuperación de recursos, Este enfoque puede ayudar a generar energía más limpia y a la valorización de residuos, ofreciendo posibles beneficios socioeconómicos en regiones que enfrentan escasez de residuos y energía.

El estudio [66] los resultados destacan la viabilidad de utilizar BSG sin tratar y pretratado como sustratos para la producción de biometano. La implementación de tales procesos a escala industrial puede mejorar las prácticas de gestión de residuos, reducir los impactos ambientales y

proporcionar beneficios socioeconómicos a las comunidades locales al apoyar la producción de energía renovable y los objetivos de la economía circular.

4.2.3.3 *Impacto Económico*

La economía circular es una opción diferente al modelo lineal al que estamos acostumbrados que se basa en “producir, usar y desechar”. Teniendo en cuenta esto el biogás como una fuente de energía renovable tiene un papel dentro del modelo de economía circular, ya que desde sus residuos hasta la producción energética que ofrece contribuye a disminuir los impactos ambientales y a mejorar la eficiencia en el uso de los recursos naturales [61].

Un estudio analizó la viabilidad económica del uso de biochar en la digestión anaerobia, comparando su costo máximo sostenible con los precios de mercado [57], los resultados demostraron que bajo ciertas condiciones la adición de biochar puede ser económicamente favorable, por lo que incrementa la producción de metano y con esto los ingresos energéticos del proceso.

Tabla 8: Cuadro comparativo de impactos ambientales, sociales y económicos.

Tipo de impacto	Efectos principales	Indicadores o beneficios cuantificados
Ambiental – Reducción de GEI	Captura y uso del CH ₄ evita su liberación directa a la atmósfera; reducción de emisiones por sustitución de combustibles fósiles (GLP, diésel).	Reducción de CH ₄ entre 40–65 %; disminución de 10.7 Gg CH ₄ /año (Mauritania).
Ambiental – Gestión sostenible de residuos	Transformación del estiércol en biogás y biofertilizante evita contaminación del suelo y del agua, lixiviados y olores.	Aprovechamiento del 100 % del estiércol generado en plantas de mediana escala; reducción del 80 % de carga orgánica en efluentes.
Ambiental – Producción de biofertilizante	El digestato conserva N, P y K, mejorando la fertilidad y reduciendo el uso de fertilizantes químicos.	Digestato con N = 7770 mg/kg, alta biodisponibilidad.
Ambiental – Economía circular y energía renovable	Integración del biogás en ciclos agropecuarios locales cierra el ciclo de nutrientes y energía.	Plantas comunitarias pueden cubrir 50 % de la demanda doméstica de gas (Mauritania).
Social – Acceso a energía rural y bienestar doméstico	Sustitución del GLP o la leña por biogás mejora la seguridad energética, salud y equidad de género.	Reducción del uso de leña en 60 % ; tiempo de recuperación 74 meses, luego beneficios netos.
Social – Empleo y desarrollo local	Genera empleos en operación, mantenimiento y distribución de	Hasta 4 empleos directos por planta y beneficios sociales anuales de USD 1,750 por comunidad.

	biodigestores; promueve economías rurales sostenibles.	
Social – Salud pública y saneamiento	Reducción de exposición a humo, patógenos y residuos sin tratar; mejora en la calidad del aire y del agua.	Disminución de enfermedades respiratorias y diarreicas en zonas rurales.
Económico – Sustitución de combustibles fósiles	Ahorro por reemplazo de GLP o electricidad; menor dependencia energética externa.	Ahorro energético de USD 200–350/año/familia en proyectos rurales.
Económico – Viabilidad y retorno de inversión	El biogás presenta períodos de recuperación moderados y alta rentabilidad a largo plazo.	Payback = 3.4 años; IRR = 22 % (batata + estiércol bovino).
Económico – Aprovechamiento de subproductos	El digestato puede comercializarse como fertilizante; el biogás purificado (biometano) como combustible vehicular o inyección a red.	Potencial energético: 4 MW teóricos con codigestión (Jordania).
Riesgos comunes	Costos iniciales de instalación, necesidad de capacitación técnica y mantenimiento continuo.	Plantas pequeñas pueden tener altos costos operativos si no hay apoyo estatal.

Aprovechar el estiércol de ganado para producir biogás es muy práctico. Convierte un problema en algo útil. En lugar de contaminar, se produce energía limpia que ayuda al ambiente. Esto se logra al reducir los gases que afectan el clima. Además, queda un fertilizante natural que mejora el suelo. Esto ayuda mucho a las personas, especialmente en zonas rurales. Facilita el

acceso a una energía más segura. También mejora la salud y ayuda al desarrollo de la comunidad. Desde el punto de vista económico, trae beneficios. Representa un ahorro en costos de energía. Permite aprovechar los residuos y puede generar empleo local. Para que funcione bien y se mantenga en el tiempo, es clave tener apoyo técnico. También se necesitan buenos incentivos y tecnologías eficientes. Estas tecnologías deben hacer que todo el proceso sea más accesible.

4.2.4 Diseños de biodigestores

De los 63 documentos analizados, 55 presentan diseños de biodigestores, lo que corresponde al 87.30% del total revisado. Los diseños más relevantes identificados son los reactores anaeróbicos avanzados (UASB, CSTR, entre otros), que representan el 41.82%, seguidos por el biodigestor tipo batch con un 32.73%. En menor proporción se encuentra el biodigestor tipo tubular y el biodigestor de domo fijo con un 10.91% y el biodigestor de campana flotante con un 7.27%. Finalmente, se destacan otros diseños o adaptaciones locales que constituyen el 12.73% del total.

La tabla 9 presenta los principales diseños de biodigestores usados en el proceso de biodigestión, organizados según su frecuencia de aparición en los documentos revisados. Cada una respaldada por múltiples fuentes. Esta clasificación permite comprender cuáles son los principales diseños que se usa en la biodigestión. La tabla relaciona cada factor con la referencia bibliográfica del documento en el que se analiza.

Tabla 9: Diseños de biodigestores

N	Diseños de biodigestores	Fuente
1	Reactores anaeróbicos avanzados (UASB, CSTR, etc)	(Giduthuri & Ahring, 2023)(Gómez-Quiroga et al., 2022)(Kegl et al., 2025)(Wang et al., 2020)(Kalamaras et al., 2025)(Mozhiarasi & Natarajan, 2025)(Choudhury et al., 2024)(Enokida et al., 2025)(Nindhia et al., 2025)(Kolodynskiy et al., 2024)(Zulkifli et al., 2020)(Salehiyoun et al., 2025) (B. Singh et al., 2020)(Parralejo Alcobendas et al., 2023)(Azkarahman et al., 2025)(B. Singh et al., 2021)(Dar et al., 2025)(Eliasson et al., 2023)(Lee et al., 2021)(Aamir & Hassan, 2025)(Wang et al., 2025)(Cerrillo et al., 2025)(Bhatia et al., 2020)
2	Biodigestor tipo batch	(Montoro et al., 2019)(Rocamora et al., 2025)(Abbas et al., 2025)(Amjad et al., 2025)(K. C. Obileke et al., 2021)(Saha et al., 2025)(Chen et al., 2025)(Mirabi et al., 2024)(Choudhury et al., 2024)(Elfeki et al., 2017)(Chaher et al., 2021)(Nabaterega et al., 2022) (Salehi et al., 2025)(Parralejo Alcobendas et al., 2023)(Bokhary et al., 2025)(H. Li et al., 2025)(Rajagopal, 2025)(Chaher et al., 2023)
3	Biodigestor tipo tubular	(Sharma et al., 2025)(Roubík & Mazancová, 2020)(Pandey et al., 2021)(Ejigboye et al., 2025)(Choudhury et al., 2024)(K. Obileke et al., 2020)

4	Biodigestor domo fijo	(Roubík & Mazancová, 2020)(Pandey et al., 2021)(Sidi Habib & Torii, 2024)(Choudhury et al., 2024)(G. Li et al., 2025)(Rupf et al., 2017)
5	Biodigestor campana flotante	(Edenhofer et al., 2011)(R. K. Singh et al., 2025)(Roubík & Mazancová, 2020)(Sidi Habib & Torii, 2024)
6	Otros diseños o adaptaciones locales	(J. Li et al., 2025)(Lizama et al., 2017)(Astuti et al., 2025)(Chiappero et al., 2022)(Ali et al., 2020)(Mukhuba et al., 2020)(Pinheiro et al., 2022)

4.2.4.1 Reactores anaeróbicos avanzados

Los reactores de tanque agitado continuo son muy usados en procesos de digestión anaerobia. Esto se debe a que son fáciles de operar y permiten mantener condiciones similares dentro del digestor. Funcionan mediante una agitación constante que asegura que los sustratos y los microorganismos estén distribuidos de manera uniforme. Esto ayuda a que el proceso sea estable. Sin embargo, este tipo de reactores tiene algunas limitaciones cuando se utilizan materiales con mucha cantidad de sólidos o con cargas orgánicas altas. En estos casos, puede haber acumulaciones de ácidos grasos volátiles y la actividad metanogénica se ve inhibida [33].

Los reactores UASB son muy eficientes para tratar aguas residuales que no tienen mucha cantidad de sólidos. En estos sistemas, el agua residual fluye hacia arriba a través de un lecho de lodo granular anaeróbico. Allí, los microorganismos descomponen la materia orgánica. Una de las principales ventajas de estos reactores es que retienen mucha biomasa activa. Esto permite operar con tiempos de retención hidráulica más cortos y con cargas orgánicas más altas [33].

4.2.4.2 Biodigestor tipo batch

Los biodigestores tipo batch (por lotes) son los más simples en cuanto a diseño y operación. En este tipo de sistema el sustrato se carga al inicio del proceso y se sella el digestor sin agregar algún material ni retirar el digestato hasta que el proceso de digestión haya finalizado. Después de completar el ciclo el digestato se descarga y se vuelve a llenar el reactor con un nuevo lote de sustrato.

Estos reactores son adecuados para la digestión de residuos que sean sólidos o semisólidos y se caracterizan por tener bajos costos de instalación y operación (Montoro et al., 2019).

Además los digestores tipo batch son utilizados en estudios de laboratorio de forma común, para simular condiciones reales de digestión seca donde el contenido de sólidos es alto y el contacto entre el sustrato y la biomasa activa depende principalmente de la difusión del líquido intersticial(Rocamora et al., 2025).

4.2.4.3 Biodigestor tipo tubular

Este tipo de diseño tubular facilita una distribución uniforme del sustrato y una retención hidráulica adecuada, lo que favorece la estabilidad microbiana y la eficiencia en la producción de biogás(Choudhury et al., 2024).

Según (K. Oibileke et al., 2020) Los biodigestores flexibles operan como sistemas de flujo pistón, donde el sustrato se desplaza a través del digestor con una mezcla mínima, permitiendo una producción continua de biogás. Además, cuentan con una ventaja importante la cual es su adaptabilidad a diferentes condiciones domésticas, ya que no requiere estructuras civiles permanentes.

4.2.4.4 Biodigestor domo fijo

En este diseño, la estructura principal es una cámara de digestión subterránea de concreto o ladrillo, con un domo superior fijo que actúa como espacio de acumulación del biogás. Los

biodigestores de domo fijo a escala comunitaria se recomiendan especialmente para comunidades rurales de al menos 100 familias, donde proporcionan sostenibilidad energética y rentabilidad económica(Choudhury et al., 2024).

Las principales ventajas de los biodigestores de domo fijo son su larga vida útil y sus bajos requerimientos de mantenimiento una vez construidos adecuadamente. Sin embargo, requieren mano de obra calificada y una alta inversión inicial, lo que puede limitar su adopción por pequeños agricultores (Rupf et al., 2017).

4.2.4.5 Biodigestor campana flotante

El biodigestor de campana flotante (también conocido como modelo indio) consta de un tanque de digestión subterráneo y un gasómetro o campana metálica que flota verticalmente sobre el lodo. A medida que se produce el gas, la campana se eleva, y cuando se consume, desciende, lo que permite mantener una presión de gas constante y visualizar fácilmente el volumen disponible(Roubík & Mazancová, 2020).

En el estudio (R. K. Singh et al., 2025) se utilizó un biodigestor de tipo campana flotante (floating drum type biogas plant), compuesto por un tanque de digestión cilíndrico hecho de ladrillo y cemento, y una campana metálica flotante utilizada como gasómetro para el almacenamiento del biogás producido. La campana se mueve verticalmente según el volumen del gas generado, manteniendo así una presión casi constante dentro del sistema.

4.2.4.6 Otros diseños o adaptaciones locales

El experimento (J. Li et al., 2025) se realizó usando un biodigestor solar anaeróbico diseñado para mantener la temperatura estable mediante la captura y retención de energía solar. El sistema se basó en un tanque cilíndrico de polietileno de 100 litros cubierto con una capa transparente de un material aislante que permitía el paso de la radiación solar mientras evitaba la pérdida de calor. Este digestor estaba equipado con una salida superior para la recolección de biogás, un sistema de entrada para sustrato fresco y una válvula en la parte inferior para el drenaje. Este diseño permite operar el proceso sin necesidad de calefacción externa,

aprovechando la energía solar para mantener condiciones mesofílicas durante la digestión anaerobia.

El diseño del biodigestor es un biodigestor solar controlado térmicamente, construido en acero inoxidable 304, con calentamiento indirecto mediante serpentines de agua caliente, aislamiento térmico grueso y sistema de rebose y alimentación abierta, lo que le permite operar en múltiples modos de digestión (lote, continua, seca o húmeda)(Lizama et al., 2017).

Tabla 10: Cuadro comparativo de diseños de biodigestores.

Diseño	Condiciones donde rinde mejor	Temperatura / pH / HRT típicos	Ventajas
CSTR (Continuous Stirred Tank Reactor)	Mezclas heterogéneas (estiércol + FW + agroindustriales), codigestión con control fino.	35–55 °C / pH 6.8–7.4 / HRT 10–30 d (según OLR).	Industrial y piloto Mezcla y control continuo → alta productividad Ideal para AcoD con aditivos.
UASB	Residuos líquidos de alta carga (manure diluido, aguas industriales)	Mesófilo a termófilo/ HRT corto (horas a días)	Alta eficiencia para corrientes líquidas, menor lodo, buena para efluentes con bajo SRT.
Batch	Proyectos pequeños o pruebas, sustratos homogéneos sólidos/semisólidos	Mesófilo 20–40 d	Simple, bajo costo, producción discontinua; útil en comunidades pequeñas.
Tubular / Plug flow (vertical/horizontal)	Estiércol con sólidos moderados, OFMSW en digestión seca	HRT largo (30–60 d)	Buen retén de sólidos, baja mezcla

			Apropiado para digestión seca Menor control térmico.
Domo fijo	Estiércol doméstico, mezcla simple	Mesófilo 30–40 d	Robusto en zonas rurales, bajo mantenimiento, económico Rinde mejor con cargas estables y uso doméstico.
Campana flotante	Estiércol líquido, comunidades pequeñas	Mesófilo 30–40 d	Fácil seguimiento del gas; buen rendimiento en sistemas rurales organizados; mantenimiento moderado.
Híbridos / Portátiles / AD– MFC / IoT	Proyectos pequeños, experimentales, zonas con acceso eléctrico limitado	Varía según diseño	Permiten generación eléctrica + biogás IoT mejora control y detección temprana de fallas. Ideal para optimizar parámetros (pH, T) remotamente.

Actualmente, hay múltiples modelos de biodigestores que se ajustan a la escala, clase de sustrato y condiciones climáticas del medio ambiente. Los reactores anaeróbicos avanzados (como UASB y CSTR) son los más utilizados en la industria y la investigación por su gran eficiencia y control automatizado, mientras que los biodigestores de tipo batch, tubular, con domo fijo y campana flotante son más comunes en áreas rurales por su simplicidad, bajo costo y

facilidad de uso. Asimismo, han aparecido adaptaciones regionales e innovaciones tecnológicas, como dispositivos portátiles, híbridos o con monitoreo IoT, que pretenden optimizar la sostenibilidad y el acceso al biogás en comunidades pequeñas. Es decir, la tendencia actual se orienta hacia la automatización, modularidad y eficiencia energética como pilares en la evolución del diseño de biodigestores.

4.2.5 Complejidad del diseño de biodigestor

La dificultad del diseño de un biodigestor varía según el tipo, los materiales y el nivel de control que requieren para el correcto funcionamiento.

Los biodigestores tradicionales (batch, tubular, domo fijo y campana flotante) presentan baja complejidad en su funcionamiento, se pueden construir con materiales fáciles de encontrar y operarse con capacitación básica, aunque ofrecen menor control del proceso y eficiencia.

Mientras tanto, los reactores avanzados (CSTR y UASB) y los diseños híbridos (portátiles, con IoT o celdas microbianas) presentan alta complejidad, es decir que su funcionamiento es complicado y requieren automatización, sensores y conocimientos técnicos especializados, pero permiten mayor estabilidad, rendimiento de metano y monitoreo en tiempo real.

En general, la elección depende del equilibrio entre recursos disponibles, escala del proyecto y nivel técnico del operador, donde los modelos simples son ideales para entornos rurales y los complejos para plantas industriales o de investigación.

Tabla 11: Cuadro comparativo de la complejidad de los biodigestores.

Tipo de biodigestor	Nivel de complejidad técnica	Aspectos de diseño (construcción/control/operación)	Ventajas	Limitaciones	Nivel de conocimiento requerido
CSTR	Alta	Reactor cerrado con mezcla mecánica, control automatizado de pH, temperatura y OLR. Requiere	Alta eficiencia, mezcla homogénea, permite co-	Alto costo de construcción y energía para mezcla;	Técnico especializado

		sensores y agitación continua.	digestión y operación continua.	requiere monitoreo constante.	
UASB	Media-Alta	Flujo ascendente; separación de fases; diseño hidráulico preciso; requiere control de caudal y biomasa.	Alta eficiencia volumétrica; operación continua; bajo mantenimiento del lodo.	No apto para residuos muy sólidos; diseño más sensible a sobrecargas hidráulicas.	Técnico con experiencia en hidráulica.
Biodigestor tipo batch	Baja	Sistema cerrado, carga única por ciclo; sin necesidad de mezcla constante; construcción simple.	Bajo costo; mantenimiento mínimo; adecuado para pruebas o zonas rurales.	Producción discontinua; menor control del proceso; requiere múltiples tanques para continuidad.	Usuario básico capacitado.
Biodigestor tipo tubular (flujo pistón)	Baja-media	Tubo horizontal o semienterrado (PVC o concreto); flujo unidireccional sin mezcla interna; sellado hermético.	Construcción simple; bajo mantenimiento; adecuado para climas cálidos.	Difícil control del pH y temperatura; baja homogeneidad del sustrato.	Operador con formación técnica básica.

Biodigestor tipo domo fijo	Media	Cámara subterránea de mampostería con domo de gas fijo; presión por desplazamiento del efluente.	Duradero (>20 años); bajo mantenimiento; buena retención térmica.	No permite inspección interna; requiere mano de obra calificada en albañilería; reparaciones difíciles.	Técnico
Biodigestor tipo campana flotante	Media	Tanque de digestión con campana metálica o plástica flotante; gasómetro móvil regula presión.	Permite visualización del volumen de gas; presión constante; buen rendimiento en pequeñas granjas.	Corrosión de campana metálica; mantenimiento periódico; costo medio.	Usuario capacitado / técnico
Biodigestor es híbridos o portátiles	Alta	Diseños modulares con materiales plásticos, sensores integrados (pH, T, presión), sistemas eléctricos o de monitoreo remoto.	Compactos, transportables, permiten generación eléctrica y monitoreo remoto.	Mayor costo por sensores; dependencia energética; durabilidad limitada.	Ingeniero o técnico avanzado.

5. Discusión de resultados

La Revisión Sistemática de Literatura (RSL) analizada establece que la co-digestión anaeróbica (ACoD) representa una evolución técnica frente a la mono-digestión, permitiendo un incremento en el rendimiento de metano de entre el 20% y 60% al optimizar el balance de nutrientes (C:N) y estabilizar el proceso. No obstante, al contrastar este hallazgo con estudios específicos, surgen contradicciones significativas sobre la universalidad de este beneficio. Por ejemplo, mientras la RSL y diversos autores sugieren que la mezcla de estiércol con casi cualquier residuo rico en carbono mejora el rendimiento, En el estudio (Eliasson et al., 2023) contradice esta noción al reportar que no se observaron efectos sinérgicos al co-digerir estiércol bovino con carbohidratos (almidón) o proteínas (albúmina), encontrando sinergia únicamente cuando se utilizaron lípidos como el aceite de colza. Esto sugiere que la composición específica del co-sustrato es mucho más crítica de lo que la literatura general suele admitir.

En cuanto a los parámetros operativos, existe un consenso general de que la producción de biogás es altamente dependiente de la temperatura, operando óptimamente en rangos mesofílicos (35-40 °C) o termofílicos (50-60 °C). La literatura tradicional advierte que por debajo de los 20 °C la producción cae drásticamente y casi cesa a los 10 °C. Sin embargo, el estudio (Rajagopal, 2025) presenta una contradicción disruptiva al demostrar que es posible mantener una producción de metano robusta y estable en condiciones de baja temperatura (20-24.5 °C), incluso manejando cargas de nitrógeno extremadamente altas (hasta 12.5 g N/L) que normalmente se considerarían inhibitorias. Este hallazgo desafía la creencia de que las bajas temperaturas son una barrera insalvable para el tratamiento de sustratos ricos en nitrógeno, atribuyendo el éxito a la adaptación a largo plazo de la flora microbiana.

La intensidad de la mezcla es otro punto de debate técnico identificado entre los estudios. Por un lado, la mezcla es fundamental para evitar gradientes de pH, temperatura y asegurar la distribución de nutrientes. No obstante, se identifica una contradicción sobre la práctica de la agitación continua: varios investigadores demuestran que una mezcla vigorosa y constante es perjudicial, ya que rompe los flóculos microbianos y las delicadas relaciones sintróficas necesarias para la metanogénesis,

Los estudios (B. Singh et al., 2020, 2021) concluyen que la mezcla intermitente es superior, ya que reduce el consumo energético y mejora la calidad del biogás, contradiciendo los diseños que favorecen la agitación permanente como estándar de eficiencia.

Respecto al uso de suplementos para controlar inhibidores, se observa una contradicción importante relacionada con la digestión anaeróbica seca ($TS > 20\%$). Mientras que en sistemas de digestión húmeda se ha comprobado que la adición de oligoelementos (TE) como selenio y cobalto estabiliza los reactores y previene la acumulación de ácidos grasos volátiles, el estudio (Rocamora et al., 2025) encontró que estos mismos suplementos fueron ineficaces para recuperar digestores en sistemas secos con un contenido de sólidos superior al 40%. Esta discrepancia se atribuye a la limitada difusión y biodisponibilidad de los nutrientes en medios con muy poca agua, lo que invalida en estos contextos las recomendaciones estándar basadas en sistemas líquidos.

Finalmente, la integración de nanotecnología para mejorar la transferencia directa de electrones interespecies (DIET) muestra resultados mixtos que generan contradicción. Aunque muchos estudios reportan que las nanopartículas de hierro (nZVI) potencian significativamente el metano, otras investigaciones advierten que las partículas en escala nanométrica pueden tener un efecto tóxico al dañar las membranas celulares de los metanógenos, sugiriendo que el micro-hierro (de mayor tamaño) podría ser más seguro y efectivo. Además, el estudio (Parralejo Alcobendas et al., 2023) indica que, en regímenes semicontinuos, el uso de nanopartículas no siempre produce incrementos estadísticamente significativos en la producción en comparación con tratamientos térmicos convencionales, lo que pone en duda su rentabilidad costo-beneficio de forma universal.

6. Conclusiones

La revisión sistemática de literatura sobre los sistemas de producción de biogás a partir de estiércol de ganado permitió tener una visión general sobre los estudios previos realizados sobre la producción de biogás en el cual se realizó el análisis de 63 documentos publicados entre los años 2017 y 2025, garantizando transparencia, reproducibilidad y sesgos en la selección.

En primer lugar, se destaca a la digestión anaeróbica convencional, es decir con un solo sustrato, que sigue siendo la más utilizada a día de hoy, sin embargo, la co-digestion anaeróbica ha ganado terreno gracias a la capacidad de optimizar el balance entre el carbono y el nitrógeno, estabilizar el proceso y aumentar el rendimiento del gas metano entre un 20% y 60% frente a la mono-digestion, evidenciando una evolución a los sistemas tradicionales.

En impactos ambientales, sociales y económicos, se evidenció que la producción de biogás a partir de estiércol de ganado ayuda a la reducción de gases de efecto invernadero y a la creación de abonos naturales para nutrir la tierra y cultivos de los campesinos. En términos sociales y económicos, se pueden reducir costos energéticos en sistemas rurales y ayudar a la producción energética para consumo. En costos de inversión se identifica que no existe mucha información sobre esta en los documentos.

En factores que afectan en la eficiencia de los sistemas, se identificó que la temperatura y el pH son las variables que más importan a la hora de la producción del biogás, lo que corrobora que la estabilidad microbiológica es lo principal de todo el rendimiento energético, así como los materiales o sustratos utilizados y la presencia de inhibidores como el amoníaco que pueden potenciar o limitar la producción de gas metano demostrando que la eficiencia no depende solo del diseño o tipo de biodigestor utilizado sino de una mezcla de variables físicas, químicas y biológicas

Por otra parte, se verifico que los biodigestores de cúpula fija, campana flotante y flujo continuo son los más utilizados, pero la tendencia demuestra que los sistemas evolucionaran a

diseños más complejos con control automatizado de parámetros que mejoren la estabilidad microbiana.

En resumen, la revisión sistemática brinda un panorama completo de los avances y obstáculos en el ámbito de la producción de biogás a partir de estiércol de ganado. Aún se encuentran vacíos importantes de información, sobre todo en comparaciones reales sobre la eficiencia en entornos rurales de Latinoamérica ya que la mayoría de investigaciones se hacen en condiciones de laboratorio, lo que limita la investigación directa en zonas como el departamento de Nariño.

7. Bibliografía

- Aamir, M., & Hassan, M. (2025). Influences of Granular Activated Carbon on Methane Production Performance of Cow Manure and Corn Straw in Semi-continuous Stirring Tank Reactor: Organic Loading Rate Optimization and Economic Considerations. *Waste and Biomass Valorization*, 16(8), 4173–4185. <https://doi.org/10.1007/s12649-025-02983-0>
- Abbas, Y., Yun, S., Wang, K., Jamil, M. S., Zhang, X., Peng, C., & Luo, H. (2025). Coal thermal power plant magnetic fly ash as an accelerant for anaerobic digestion of cow dung and aloe peel residue: Optimizing the particle size under static magnetic field. *Chemical Engineering Journal*, 504(August 2024), 158590. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.158590>
- Al-Addous, M., Saidan, M. N., Bdour, M., & Alnaief, M. (2019). Evaluation of biogas production from the co-digestion of municipal food waste and wastewater sludge at refugee camps using an automated methane potential test system. *Energies*, 12(1), 1–11. <https://doi.org/10.3390/en12010032>
- Ali, M. M., Ndong, M., Bilal, B., Yetilmezsoy, K., Youm, I., & Bahramian, M. (2020). Mapping of biogas production potential from livestock manures and slaughterhouse waste: A case study for African countries. *Journal of Cleaner Production*, 256, 120499. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120499>
- Álvarez-Fraga, L., Capson-Tojo, G., Sanglier, M., Hamelin, J., Escudié, R., Wéry, N., García-Bernet, D., Battimelli, A., & Guilayn, F. (2025). A meta-analysis of pathogen reduction data in anaerobic digestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 207, 114982. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114982>
- Amjad, M. H., Mehmood, A., Abbas, Y., Rukh, S., Hussain, M., Hassan, A., Tariq, M., Ahmad, Z., & Yun, S. (2025). The role of mineral bentonite and biochar in improving the performance of anaerobic Co-digestion under mesophilic conditions. *Renewable Energy*, 242(August 2024), 122391. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.122391>
- Astuti, S. P., Purwono, P., & Ulya, A. U. (2025). Electricity and biogas production in portable biodigester microbial fuel cells: Optimum substrate composition and ratio from organic waste. *Ecological Engineering and Environmental Technology*, 26(2), 379–391. <https://doi.org/10.12912/27197050/199508>
- Atelge, M. R., Atabani, A. E., Banu, J. R., Krisa, D., Kaya, M., Eskicioglu, C., Kumar, G., Lee, C., Yildiz, Y., Unalan, S., Mohanasundaram, R., & Duman, F. (2020). A critical review of

- pretreatment technologies to enhance anaerobic digestion and energy recovery. *Fuel*, 270(January), 117494. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117494>
- Azkarahman, A. R., Cysneiros, D., Chatzifragkou, A., & Karatzas, K. A. G. (2025). Anaerobic digestion of whey permeate: Impact of feedstock ratio and organic loading rate in batch and semi-continuous systems. *Heliyon*, 11(4), e42395. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e42395>
- Bhatia, R. K., Ramadoss, G., Jain, A. K., Dhiman, R. K., Bhatia, S. K., & Bhatt, A. K. (2020). Conversion of Waste Biomass into Gaseous Fuel: Present Status and Challenges in India. *Bioenergy Research*, 13(4), 1046–1068. <https://doi.org/10.1007/s12155-020-10137-4>
- Blanco, D., Rubio, E. M., Marín, M. M., & Agustina, B. De. (n.d.). *Propuesta metodológica para revisión sistemática en el ámbito de la ingeniería basada en PRISMA*.
- Bokhary, A., Garrison, R., & Ahring, B. K. (2025). Anaerobic digestion of digested manure fibers: Influence of pretreatment by steam explosion or advanced wet oxidation & steam explosion on the conversion of lignocellulosic components into methane. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 13(1), 115052. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.115052>
- Carrizo, D., & Moller, C. (2018). Methodological structures of systematic literature review in software engineering: A systematic mapping study. *Ingeniare*, 26, 45–54. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052018000500045>
- Cerrillo, M., Guivernau, M., Burgos, L., Riau, V., & Bonmatí, A. (2025). Nano zerovalent iron boosts methane content in biogas and reshapes microbial communities in long-term anaerobic digestion of pig slurry. *Renewable Energy*, 239(August 2024), 122133. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.122133>
- Chaher, N. E. H., Engler, N., Nassour, A., & Nelles, M. (2023). Effects of co-substrates' mixing ratios and loading rate variations on food and agricultural wastes' anaerobic co-digestion performance. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13(8), 7051–7066. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01655-y>
- Chaher, N. E. H., Nassour, A., Hamdi, M., & Nelles, M. (2021). Monitoring of food waste anaerobic digestion performance: conventional co-substrates vs. Unmarketable biochar additions. *Foods*, 10(10). <https://doi.org/10.3390/foods10102353>
- Chen, S., Kong, Z., Qiu, L., Wang, H., & Yan, Q. (2025). Effects of different quorum sensing

- signal molecules on alleviation of ammonia inhibition during biomethanation. *Environmental Research*, 264(P1), 120295. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.120295>
- Chiappero, M., Fiore, S., & Berruti, F. (2022). Impact of biochar on anaerobic digestion: Meta-analysis and economic evaluation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(6), 108870. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108870>
- Choudhury, A. R., Singh, N., Lalwani, J., Srinivasan, H., & Palani, S. G. (2024). Enhancing biomethanation performance through co-digestion of diverse organic wastes: a comprehensive study on substrate optimization, inoculum selection, and microbial community analysis. In *Environmental Science and Pollution Research* (Vol. 31, Issue 23). <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33557-7>
- Dar, R. A., Tsui, T. H., Zhang, L., Smoliński, A., Tong, Y. W., Mohamed Rasmeey, A. H., & Liu, R. (2024). Recent achievements in magnetic-field-assisted anaerobic digestion for bioenergy production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 207(July 2024). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114902>
- Dar, R. A., Tsui, T. H., Zhang, L., Smoliński, A., Tong, Y. W., Mohamed Rasmeey, A. H., & Liu, R. (2025). Recent achievements in magnetic-field-assisted anaerobic digestion for bioenergy production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 207(July 2024). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114902>
- Di Mario, J., Gambelli, A. M., & Gigliotti, G. (2024). Biomethane Production from Untreated and Treated Brewery's Spent Grain: Feasibility of Anaerobic Digestion After Pretreatments According to Biogas Yield and Energy Efficiency. *Agronomy*, 14(12). <https://doi.org/10.3390/agronomy14122980>
- Edenhofer, O., Madrugá, R. P., Sokona, Y., Seyboth, K., Matschoss, P., Kadner, S., Zwickel, T., Eickemeier, P., Hansen, G., Schlömer, S., & von Stechow, C. (2011). Renewable energy sources and climate change mitigation: Special report of the intergovernmental panel on climate change. In *Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139151153>
- Ejigboye, P., Elemile, O., Gana, A., Oladejo, O., Olajide, O., Badejoko, B., Mezue, R., & Gesiye, M. (2025). Anaerobic digestion of *Gliricidia sepium* inoculated with pig dung using a portable bio-digester for process optimization. *Results in Engineering*, 25(November

- 2024), 103550. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103550>
- Elfeki, M., Elbestawy, E., & Tkadlec, E. (2017). Bioconversion of Egypt's agricultural wastes into biogas and compost. *Polish Journal of Environmental Studies*, 26(6), 2445–2453. <https://doi.org/10.15244/pjoes/69938>
- Eliasson, K. A., Singh, A., Isaksson, S., & Schnürer, A. (2023). Co-substrate composition is critical for enrichment of functional key species and for process efficiency during biogas production from cattle manure. *Microbial Biotechnology*, 16(2), 350–371. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.14194>
- Enokida, C. H., Tapparo, D. C., Antes, F. G., Radis Steinmetz, R. L., Magrini, F. E., Sophiatti, I. V. M., Paesi, S., & Kunz, A. (2025). Anaerobic codigestion of livestock manure and agro-industrial waste in a CSTR reactor: Operational aspects, digestate characteristics, and microbial community dynamics. *Renewable Energy*, 238(August 2024), 121865. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.121865>
- Giduthuri, A. T., & Ahring, B. K. (2023). Current Status and Prospects of Valorizing Organic Waste via Arrested Anaerobic Digestion: Production and Separation of Volatile Fatty Acids. *Fermentation*, 9(1). <https://doi.org/10.3390/fermentation9010013>
- Gómez-Quiroga, X., Aboudi, K., Álvarez-Gallego, C. J., & Romero-García, L. I. (2022). Successful and stable operation of anaerobic thermophilic co-digestion of sun-dried sugar beet pulp and cow manure under short hydraulic retention time. *Chemosphere*, 293(September 2021). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133484>
- Kalamaras, S. D., Tsitsimpikou, M. A., Tzenos, C. A., Lithourgidis, A. A., Pitsikoglou, D. S., & Kotsopoulos, T. A. (2025). A Low-Cost IoT System Based on the ESP32 Microcontroller for Efficient Monitoring of a Pilot Anaerobic Biogas Reactor. *Applied Sciences (Switzerland)*, 15(1). <https://doi.org/10.3390/app15010034>
- Kegl, T., Torres Jiménez, E., Kegl, B., Kovač Kralj, A., & Kegl, M. (2025). Modeling and optimization of anaerobic digestion technology: Current status and future outlook. *Progress in Energy and Combustion Science*, 106(August 2024). <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2024.101199>
- Kolodynskij, V., Baltrėnas, P., & Dobeles, G. (2024). Experimental research of biogas production by using a three-stage semi-continuous bioreactor with modified mixer. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 46(1), 8954–8968.

- <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1772909>
- Lee, J. T. E., Khan, M. U., Dai, Y., Tong, Y. W., & Ahring, B. K. (2021). Influence of wet oxidation pretreatment with hydrogen peroxide and addition of clarified manure on anaerobic digestion of oil palm empty fruit bunches. *Bioresource Technology*, 332(January), 125033. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125033>
- Li, G., Luo, T., Xiong, J., Gao, Y., Meng, X., Zuo, Y., Liu, Y., Ma, J., Chen, Q., Liu, Y., Xin, Y., & Ye, Y. (2025). Analysis of Dynamic Biogas Consumption in Chinese Rural Areas at Village, Township, and County Levels. *Agriculture (Switzerland)*, 15(2), 1–17. <https://doi.org/10.3390/agriculture15020149>
- Li, H., Xu, S., Liang, Y., Fu, C., Pang, Y., Tang, Z., Bi, G., & Xie, J. (2025). Effect of biochar on anaerobic co-digestion performance of cellulosic ethanol refinery waste liquor with swine manure. *Journal of Water Process Engineering*, 69(July 2024), 106574. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.106574>
- Li, J., Cheng, D., Huang, J., Kang, J., Jin, B., Novakovic, V., & Sun, Y. (2025). Influence of Additives on Solar-Controlled Anaerobic and Aerobic Processes of Cow Manure and Tomato Waste. *Sustainability (Switzerland)*, 17(4), 1–26. <https://doi.org/10.3390/su17041690>
- Lizama, A. C., Figueiras, C. C., Herrera, R. R., Pedreguera, A. Z., & Ruiz Espinoza, J. E. (2017). Effects of ultrasonic pretreatment on the solubilization and kinetic study of biogas production from anaerobic digestion of waste activated sludge. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 123, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2017.05.020>
- Mahal, Z., & Yabar, H. (2025). A Spatial Modeling Approach for Optimizing the Locations of Large-Scale Biogas Plants from Livestock Manure in Bangladesh. *Land*, 14(1). <https://doi.org/10.3390/land14010079>
- Mirabi, M., Karrabi, M., & Shahnavaz, B. (2024). Anaerobic co-digestion of lignocellulosic/lipidic wastes with cattle manure: Investigating biogas production and methane yield. *Fuel*, 366(October 2023), 131286. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131286>
- Montoro, S. B., Lucas, J., Santos, D. F. L., & Costa, M. S. S. M. (2019). Anaerobic co-digestion of sweet potato and dairy cattle manure: A technical and economic evaluation for energy and biofertilizer production. *Journal of Cleaner Production*, 226, 1082–1091.

- <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.148>
- Mozhiarasi, V., & Natarajan, T. S. (2025). Slaughterhouse and poultry wastes: management practices, feedstocks for renewable energy production, and recovery of value added products. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 15(2), 1705–1728.
<https://doi.org/10.1007/s13399-022-02352-0>
- Mukhuba, M., Roopnarain, A., Moeletsi, M. E., & Adeleke, R. (2020). Metagenomic insights into the microbial community and biogas production pattern during anaerobic digestion of cow dung and mixed food waste. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 95(1), 151–162. <https://doi.org/10.1002/jctb.6217>
- Nabaterega, R., Kieft, B., Hallam, S. J., & Eskicioglu, C. (2022). Fractional factorial experimental design for optimizing volatile fatty acids from anaerobic fermentation of municipal sludge: Microbial community and activity investigation. *Renewable Energy*, 199(July), 733–744. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.08.145>
- Nindhia, T. S., Bidura, I. G. N. G., Sampurna, I. P., & Nindhia, T. G. T. (2025). Utilization of Continuous Anaerobic Digesters for Processing Cattle Dung and Cabbage (*Brassica oleracea*) Waste. *Fermentation*, 11(2), 1–14. <https://doi.org/10.3390/fermentation11020050>
- Obileke, K. C., Mamphweli, S., Meyer, E. L., Makaka, G., & Nwokolo, N. (2021). Development of a mathematical model and validation for methane production using cow dung as substrate in the underground biogas digester. *Processes*, 9(4). <https://doi.org/10.3390/pr9040643>
- Obileke, K., Mamphweli, S., Meyer, E. L., Makaka, G., & Nwokolo, N. (2020). *Design and Fabrication of a Plastic Biogas Digester for the Production of Biogas from Cow Dung*. 2020.
- Pandey, P., Pandey, A., Yan, L., Wang, D., Pandey, V., Meikap, B. C., Huo, J., Zhang, R., & Pandey, P. K. (2021). Dairy waste and potential of small-scale biogas digester for rural energy in India. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(22).
<https://doi.org/10.3390/app112210671>
- Parralejo Alcobendas, A. I., Royano Barroso, L., Cabanillas Patilla, J., & González Cortés, J. (2023). Pretreatment and Nanoparticles as Catalysts for Biogas Production Reactions in Pepper Waste and Pig Manure. *Catalysts*, 13(7). <https://doi.org/10.3390/catal13071029>
- Parsif.al. (2021). *Acerca de Parsifal*. Online. <https://parsif.al/about/>
- Pinheiro, V. E., Wainaina, S., Polizeli, M. de L. T. de M., & Horváth, I. S. (2022). Anaerobic

- digestion of cornmeal – the effect of crude enzyme extract and co-digestion with cow manure. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 16(3), 710–724.
<https://doi.org/10.1002/bbb.2303>
- Rajagopal, R. (2025). Enhancing low-temperature anaerobic digestion of nitrogen-rich feedstocks: Mitigating free ammonia and short-chain fatty acid inhibitions. *Bioresource Technology Reports*, 29, 102032. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2025.102032>
- Repinc, S. K., Deutsch, L., Savić, D., Steinman, F., Danilović, B., & Stres, B. (2021). The impact of crude glycerol from biodiesel production and its trace element content on biomethane production in a batch experiment: Modelling as a step towards an impartial routine comparison of results. *Acta Hydrotechnica*, 34(60), 11–24.
<https://doi.org/10.15292/acta.hydro.2021.02>
- Rocamora, I., Wagland, S. T., Hassard, F., Villa, R., Peces, M., Fotidis, I. A., Simpson, E. W., Fernández, O., & Bajón-Fernández, Y. (2025). Supplementation strategies to control propionic acid accumulation resulting from ammonia inhibition in dry anaerobic digestion: Osmoprotectants, activated carbon and trace elements. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 13(2). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.116015>
- Roubík, H., & Mazancová, J. (2020). Suitability of small-scale biogas systems based on livestock manure for the rural areas of Sumatra. *Environmental Development*, 33(January), 100505. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2020.100505>
- Rupf, G. V., Bahri, P. A., Boer, K. De, & Mchenry, M. P. (2017). AC SC. *Renewable Energy*.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.03.048>
- Saha, C. K., Nime, J., Khatun, M. L., Sharna, T. H., & Alam, M. M. (2025). Rice straw co-digestion potential with cow dung and poultry droppings for maximizing biogas production in Bangladesh. *Heliyon*, 11(4), e42687. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e42687>
- Salehi, B., Wang, L., & Shahbazi, A. (2025). Enhancement of biomethane production during anaerobic digestion of chicken manure using a biocomposite hydrogel with iron-modified biochar. *Environmental Technology and Innovation*, 38(February), 104091.
<https://doi.org/10.1016/j.eti.2025.104091>
- Salehiyoun, A. R., Sharifi, M., Norouzi, O., Dutta, A., Di Maria, F., Zilouei, H., & Mofatteh, S. (2025). Dry anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste in a vertical plug digester: Start-up procedures, digestate recirculation, organic loading rates, and energy

- balance analysis. *Biomass and Bioenergy*, 193(November 2024), 107492.
<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107492>
- Sharma, R., Choudhary, P., Thakur, G., Pathak, A., Singh, S., Kumar, A., Lo, S. L., & Kumar, P. (2025). Sustainable management of biowaste to bioenergy: A critical review on biogas production and techno-economic challenges. *Biomass and Bioenergy*, 196(February), 107734. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.107734>
- Sidi Habib, S., & Torii, S. (2024). Biogas as Alternative to Liquefied Petroleum Gas in Mauritania: An Integrated Future Approach for Energy Sustainability and Socio-Economic Development. *Clean Technologies*, 6(2), 453–470.
<https://doi.org/10.3390/cleantechnol6020023>
- Singh, B., Singh, N., Čonka, Z., Kolcun, M., Siménfalvi, Z., Péter, Z., & Szamosi, Z. (2021). Critical analysis of methods adopted for evaluation of mixing efficiency in an anaerobic digester. *Sustainability (Switzerland)*, 13(12), 1–27. <https://doi.org/10.3390/su13126668>
- Singh, B., Szamosi, Z., & Siménfalvi, Z. (2020). Impact of mixing intensity and duration on biogas production in an anaerobic digester: a review. *Critical Reviews in Biotechnology*, 40(4), 508–521. <https://doi.org/10.1080/07388551.2020.1731413>
- Singh, R. K., Tiwari, G. N., & Sinha, A. S. K. (2025). Thermal modelling of semitransparent photovoltaic thermal and flat plate collector integrated biogas plant for slurry heating: An experimental validation. *Renewable Energy*, 245(February), 122778.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.122778>
- Wang, H., Fu, X., Huang, H., Shen, D., Fan, D., Zhu, L., Dai, X., & Dong, B. (2025). Bioenergy recovery and carbon emissions benefits of short-term bio-thermophilic pretreatment on low organic sewage sludge anaerobic digestion: A pilot-scale study. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 148, 321–335. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2023.08.022>
- Wang, H., Lim, T. T., Duong, C., Zhang, W., Xu, C., Yan, L., Mei, Z., & Wang, W. (2020). Long-term mesophilic anaerobic co-digestion of swine manure with corn stover and microbial community analysis. *Microorganisms*, 8(2).
<https://doi.org/10.3390/microorganisms8020188>
- Zulkifli, Z., Rasit, N., Siddique, M. N. I., & Kongjan, P. (2020). Dry mesophilic and thermophilic semi-continuous anaerobic digestion of cow manure: Effects of solid loading rate on the process performance. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 10(4), 5972–

5977. <https://doi.org/10.33263/BRIAC104.972977>

 UNIVERSIDAD CESMAG NIT: 800.109.387-7 VIGILADA MINEDUCACIÓN	CARTA DE ENTREGA TRABAJO DE GRADO O TRABAJO DE APLICACIÓN – ASESOR(A)	CÓDIGO: AAC-BL-FR-032 VERSIÓN: 1 FECHA: 09/JUN/2022
---	---	---

San Juan de Pasto, 5 de agosto del 2026

Biblioteca
REMIGIO FIORE FORTEZZA OFM. CAP.
Universidad CESMAG
Pasto

Saludo de paz y bien.

Por medio de la presente se hace entrega del Trabajo de Grado / Trabajo de Aplicación denominado Revisión sistemática de literatura de sistemas de producción de biogás mediante estiércol de ganado, presentado por el (los) autor(es) Danilo Gabriel Muñoz Nieves, y Cesar Augusto Zuluaga Trujillo del Programa Académico Ingeniería electrónica al correo electrónico biblioteca.trabajosdegrado@unicesmag.edu.co. Manifiesto como asesor(a), que su contenido, resumen, anexos y formato PDF cumple con las especificaciones de calidad, guía de presentación de Trabajos de Grado o de Aplicación, establecidos por la Universidad CESMAG, por lo tanto, se solicita el paz y salvo respectivo.

Atentamente,


(Firma del Asesor)

Camilo Arturo Lagos Mora
12997039
Ingeniería Electrónica
3008198104
calagos@unicesmag.edu.co

 UNIVERSIDAD CESMAG NIT: 800.109.387-7 VIGILADA MINEDUCACIÓN	AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN DE TRABAJOS DE GRADO O TRABAJOS DE APLICACIÓN EN REPOSITORIO INSTITUCIONAL	CÓDIGO: AAC-BL-FR-031
		VERSIÓN: 1
		FECHA: 09/JUN/2022

INFORMACIÓN DEL (LOS) AUTOR(ES)	
Nombres y apellidos del autor: Danilo Gabriel Muñoz Nieves	Documento de identidad: 1004509153
Correo electrónico: danilo.munozn@gmail.com	Número de contacto: 3187250705
Nombres y apellidos del autor: Cesar Augusto Zuluaga Trujillo	Documento de identidad: 1193108677
Correo electrónico: cesarzuluaga90@gmail.com	Número de contacto: 3156124912
Nombres y apellidos del asesor: Camilo Arturo Lagos Mora	Documento de identidad: 12997039
Correo electrónico: calagos@unicesmag.edu.co	Número de contacto: 3008198104
Título del trabajo de grado: Revisión sistemática de literatura de sistemas de producción de biogás mediante estiércol de ganado	
Facultad y Programa Académico: Sistemas - Ingeniería Electrónica	

En mi (nuestra) calidad de autor(es) y/o titular (es) del derecho de autor del Trabajo de Grado o de Aplicación señalado en el encabezado, confiero (conferimos) a la Universidad CESMAG una licencia no exclusiva, limitada y gratuita, para la inclusión del trabajo de grado en el repositorio institucional. Por consiguiente, el alcance de la licencia que se otorga a través del presente documento, abarca las siguientes características:

- La autorización se otorga desde la fecha de suscripción del presente documento y durante todo el término en el que el (los) firmante(s) del presente documento conserve (mos) la titularidad de los derechos patrimoniales de autor. En el evento en el que deje (mos) de tener la titularidad de los derechos patrimoniales sobre el Trabajo de Grado o de Aplicación, me (nos) comprometo (comprometemos) a informar de manera inmediata sobre dicha situación a la Universidad CESMAG. Por consiguiente, hasta que no exista comunicación escrita de mi(nuestra) parte informando sobre dicha situación, la Universidad CESMAG se encontrará debidamente habilitada para continuar con la publicación del Trabajo de Grado o de Aplicación dentro del repositorio institucional. Conozco(conocemos) que esta autorización podrá revocarse en cualquier momento, siempre y cuando se eleve la solicitud por escrito para dicho fin ante la Universidad CESMAG. En estos eventos, la Universidad CESMAG cuenta con el plazo de un mes después de recibida la petición, para desmarcar la visualización del Trabajo de Grado o de Aplicación del repositorio institucional.
- Se autoriza a la Universidad CESMAG para publicar el Trabajo de Grado o de Aplicación en formato digital y teniendo en cuenta que uno de los medios de publicación del repositorio institucional es el internet, acepto(amos) que el Trabajo de Grado o de Aplicación circulará con un alcance mundial.
- Acepto (aceptamos) que la autorización que se otorga a través del presente documento se realiza a título gratuito, por lo tanto, renuncio(amos) a recibir emolumento alguno por la publicación, distribución, comunicación pública y/o cualquier otro uso que se haga en los términos de la presente autorización y de la licencia o programa a través del cual sea publicado el Trabajo de grado o de Aplicación.
- Manifiesto (manifestamos) que el Trabajo de Grado o de Aplicación es original realizado sin violar o usurpar derechos de autor de terceros y que ostento(amos) los derechos patrimoniales de autor

 UNIVERSIDAD CESMAG NIT: 800.109.387-7 VIGILADA MINEDUCACIÓN	AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN DE TRABAJOS DE GRADO O TRABAJOS DE APLICACIÓN EN REPOSITORIO INSTITUCIONAL	CÓDIGO: AAC-BL-FR-031
		VERSIÓN: 1
		FECHA: 09/JUN/2022

sobre la misma. Por consiguiente, asumo(asumimos) toda la responsabilidad sobre su contenido ante la Universidad CESMAG y frente a terceros, manteniéndose indemne de cualquier reclamación que surja en virtud de la misma. En todo caso, la Universidad CESMAG se compromete a indicar siempre la autoría del escrito incluyendo nombre de(los) autor(es) y la fecha de publicación.

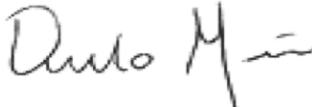
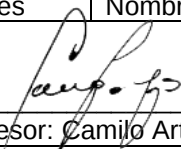
- e) Autorizo(autorizamos) a la Universidad CESMAG para incluir el Trabajo de Grado o de Aplicación en los índices y buscadores que se estimen necesarios para promover su difusión. Así mismo autorizo (autorizamos) a la Universidad CESMAG para que pueda convertir el documento a cualquier medio o formato para propósitos de preservación digital.

NOTA: En los eventos en los que el trabajo de grado o de aplicación haya sido trabajado con el apoyo o patrocinio de una agencia, organización o cualquier otra entidad diferente a la Universidad CESMAG. Como autor(es) garantizo(amos) que he(hemos) cumplido con los derechos y obligaciones asumidos con dicha entidad y como consecuencia de ello dejo(dejamos) constancia que la autorización que se concede a través del presente escrito no interfiere ni transgrede derechos de terceros.

Como consecuencia de lo anterior, autorizo(autorizamos) la publicación, difusión, consulta y uso del Trabajo de Grado o de Aplicación por parte de la Universidad CESMAG y sus usuarios así:

- Permiso(permitimos) que mi(nuestro) Trabajo de Grado o de Aplicación haga parte del catálogo de colección del repositorio digital de la Universidad CESMAG, por lo tanto, su contenido será de acceso abierto donde podrá ser consultado, descargado y compartido con otras personas, siempre que se reconozca su autoría o reconocimiento con fines no comerciales.

En señal de conformidad, se suscribe este documento en San Juan de Pasto a los 05 días del mes de agosto del año 2026

	
Nombre del autor: Danilo Gabriel Muñoz Nieves	Nombre del autor: Cesar Augusto Zuluaga Trujillo
 Nombre del asesor: Camilo Arturo Lagos Mora	