

EVALUACIÓN TÉCNICA EN EL APROVECHAMIENTO DEL BIOGÁS PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DE ESTIÉRCOL DE ANIMAL DEL SECTOR PECUARIO EN COLOMBIA

Santiago Enrique Cruz Cuellar
Manuel Ricardo Ocaña García
François Herrera Jacquelin / Director
Zully Esmeralda Gómez Rosales / Codirector

Resumen

Este trabajo analiza la viabilidad técnica de utilizar el biogás de estiércol animal para la generación termoeléctrica a pequeña escala en Colombia, abordando la doble problemática de la diversificación de la matriz energética y el impacto ambiental de los residuos ganaderos. La metodología empleada fue una revisión bibliográfica que incluyó: la caracterización de los sistemas productivos de los sectores bovino, porcino y aviar; el análisis de las propiedades fisicoquímicas de sus excretas (como la relación C/N); el estudio de las fases y tecnologías de la digestión anaerobia; y el cálculo del potencial energético actualizado con datos del Censo Pecuario Nacional a 2024.

Entre los principales hallazgos, se determinó que el potencial técnico nacional asciende a 900 GWh/año, capaz de cubrir el 1.13% de la demanda eléctrica del país. Se identificó que los sectores porcino y avícola son los más viables por su alto nivel de tecnificación, que facilita la recolección de biomasa. Además, se constató que mientras el estiércol bovino posee una relación C/N (entre 13 y 33) adecuada para la digestión directa, la porcínaza (entre 5 y 13) y gallinaza (entre 9 y 13) requieren co-digestión para un proceso eficiente. Se concluye que el aprovechamiento de estos residuos contribuye a los esfuerzos para fomentar la economía circular y la seguridad energética en Colombia.

Palabras clave: biogás, estiércol pecuario, digestión anaerobia, generación termoeléctrica, pequeña escala, viabilidad técnica, Colombia.

TECHNICAL EVALUATION OF THE USE OF BIOGAS FOR ENERGY GENERATION FROM ANIMAL MANURE IN THE LIVESTOCK SECTOR IN COLOMBIA

Abstract

This paper analyzes the technical feasibility of using biogas from animal manure for small-scale thermoelectric generation in Colombia, addressing the dual challenges of energy matrix diversification and the environmental impact of livestock waste. The methodology used was a literature review that included: characterization of production systems in the bovine, swine, and poultry sectors; analysis of the physicochemical properties of their manure (such as the C/N ratio); study of the phases and technologies of anaerobic digestion; and calculation of the energy potential updated with data from the National Livestock Census to 2024. Among the main findings, it was determined that the national technical potential amounts to 900 GWh/year, capable of covering 1.13% of the country's electricity demand. The swine and poultry sectors were identified as the

most technically viable due to their high level of technological development, which facilitates biomass harvesting. Furthermore, it was found that while bovine manure has a C/N ratio (between 13 and 33) suitable for direct digestion, pig manure (between 5 and 13) and chicken manure (between 9 and 13) require co-digestion for efficient processing. It is concluded that the utilization of these wastes contributes to efforts to promote the circular economy and energy security in Colombia.

Keywords: biogas, livestock manure, anaerobic digestion, thermoelectric generation, small-scale, technical viability, Colombia.

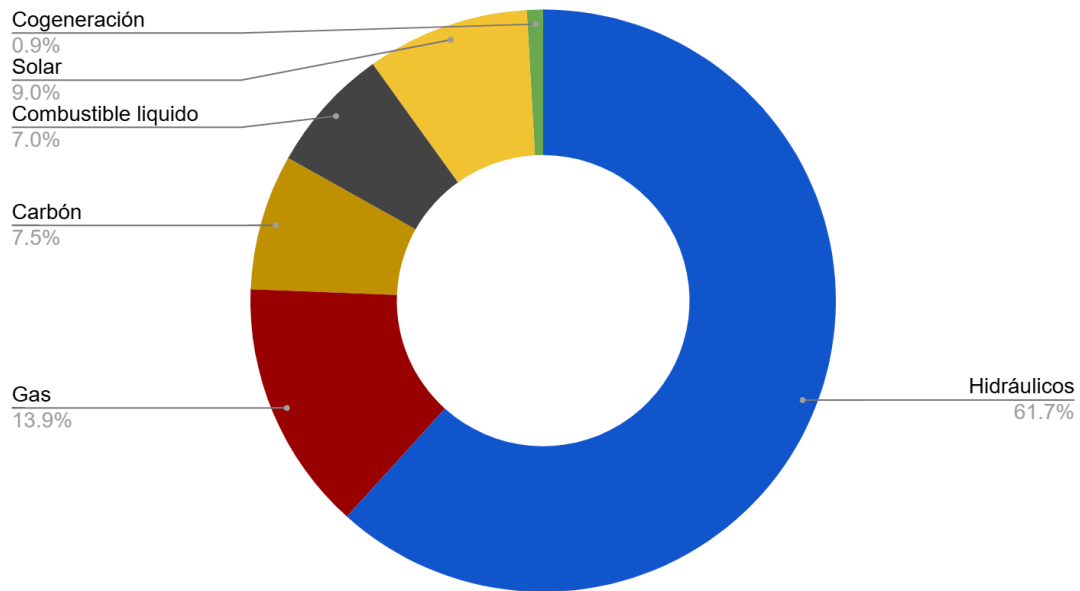
1. Introducción

La dependencia energética mundial sigue siendo un desafío crítico, particularmente en países donde las fuentes no renovables, como los combustibles fósiles, predominan en la matriz energética. En Colombia, según el Reporte Integral de Sostenibilidad, Operación y Mercado del operador XM, como se ilustra en la Figura 1, el 70% de la capacidad instalada de energía proviene de fuentes renovables, de las cuales el 61.7% corresponde a generación hidroeléctrica, mientras que solo el 9% abarca la solar (XM, 2024). Esta problemática de la dependencia energética de Colombia en la generación hidroeléctrica limita la diversificación de la matriz energética. A pesar de este panorama, el sector pecuario continúa siendo una fuente significativa de residuos orgánicos, generando entre 330 y 350 TJ de residuos agrícolas anuales (López Martínez et al., 2018).

El potencial energético de estos residuos es considerable. Utilizando estimaciones actualizadas, el potencial teórico podría superar los 103,000 TJ/año. Para calcular el potencial técnico aprovechable, se deben considerar los porcentajes de confinamiento animal, como el 96.2% para el sector avícola y el 65.7% para el porcino, cifras reportadas por López et al. (2018). Con base en estos datos, el potencial técnico actualizado se estima por encima de los 10,500 TJ/año. Asumiendo una eficiencia de conversión eléctrica del entre 20% y 30%, (equipos pequeños), esta biomasa podría generar aproximadamente 900 GWh/año (López Martínez et al., 2018). Esta cifra representa un 1.13% de la demanda eléctrica nacional, que para 2023 fue de 79,985 GWh (XM, 2023). Dicho aporte subraya la creciente relevancia del biogás pecuario, no solo como fuente de energía, sino también como una solución fundamental para la mitigación de impactos ambientales derivados de la gestión inadecuada de residuos, como la contaminación de aguas y suelos. El biogás pecuario se presenta como una alternativa estratégica que contribuye significativamente a la mitigación ambiental y a la necesaria diversificación de la matriz energética de Colombia.

Figura 1

Matriz energética en Colombia 2024



Fuente: Elaboración propia con base en (XM, 2024).

El aprovechamiento de la biomasa proveniente de los residuos orgánicos del sector pecuario representa una alternativa con potencial para contribuir al mercado energético del país. Estos residuos, si no son gestionados adecuadamente, contribuyen a la contaminación del suelo y el agua por la acumulación de nutrientes como nitrógeno y fósforo (Powers, 2009) e incrementan las emisiones atmosféricas, representando aproximadamente el 50% de las emisiones de amoníaco debido a las altas tasas de volatilización (NRC, 2003). En este contexto, el biogás emerge como una alternativa sostenible y viable, derivada de la digestión anaeróbica de biomasa animal, ofreciendo una solución dual: la mitigación de las emisiones contaminantes y la generación de energía renovable (Tejada Guzmán, 2022). Este artículo, basado en una revisión bibliográfica, tiene como objetivo analizar la viabilidad técnica del biogás en el sector pecuario, evaluando la caracterización de la biomasa y determinar cuál tipo de biomasa animal resulta más eficiente para su producción.

En Colombia, la generación de energía a partir de biogás ya está establecida en proyectos como el relleno sanitario Doña Juana y la planta Tequendama Biogás. Estos recursos, que utilizan residuos sólidos urbanos y aguas residuales tratadas, registraron una generación neta de 3.52GWh (Doña Juana) y 0.03GWh (Tequendama Biogás) durante el año 2024 (XM, 2024). Este biocombustible se produce mediante la digestión anaerobia de la materia orgánica, y existe un potencial considerable para su obtención en el país a partir de estiércol de animal (biomasa residual pecuaria). Así mismo, en América Latina el aprovechamiento de estiércol animal ha sido una estrategia para la gestión de residuos y la generación de energía descentralizada. Países como Brasil y Argentina lideran la implementación de proyectos a gran escala y escala industrial, donde el biogás se utiliza para la cogeneración de electricidad, calor e incluso para la producción de biometano vehicular (Probiomasa, 2020). Estudios en Ecuador y Perú han evaluado el potencial de co-digestión de estiércol porcino y bovino, demostrando que el estiércol porcino ofrece un

mayor potencial de producción de biogás por unidad de masa (Durazno Coronel, 2018; Meza Acosta & Romero Comas, 2023).

Los residuos orgánicos generados en la agricultura, el sector pecuario y otros procesos biológicos representan un recurso aprovechable para la generación de energía, según la Ley 1715 de 2014 (Congreso de Colombia, 2014). Sin embargo, la falta de incentivos y de información técnica ha limitado la investigación y adopción de tecnologías que permitan su aprovechamiento como fuente primaria de energía (Tejada Guzmán, 2022). En este contexto, la evaluación del potencial energético del biogás producido a partir de heces animales en el sector agropecuario colombiano es clave para diversificar la matriz energética y reducir la dependencia de fuentes no renovables. Su implementación mediante digestión anaerobia no solo contribuye a la seguridad energética y la mitigación del cambio climático, sino que también fomenta un modelo de economía circular, optimizando los recursos en áreas rurales y promoviendo un desarrollo energético descentralizado.

Este biocombustible se obtiene a través de un proceso denominado digestión anaeróbica, el cual consiste en la descomposición microbiológica de la materia orgánica en ausencia de oxígeno. Este proceso se basa en la descomposición microbiológica de la materia orgánica, en ausencia de oxígeno, involucrando la acción secuencial de bacterias hidrolíticas, acidogénicas, acetogénicas y metanogénicas. Las bacterias transforman los compuestos orgánicos complejos en biogás, compuesto principalmente por metano (CH_4) y dióxido de carbono (González y Forero, 2021). La digestión anaeróbica se lleva a cabo en biodigestores, dispositivos herméticos donde se introducen los residuos pecuarios mezclados con agua, controlando las condiciones óptimas de temperatura, pH y tiempo de retención hidráulico (HRT) para maximizar la producción de biogás. (FAO et al., 2011).

En 2019, el sector agropecuario colombiano representó el 6.74% del PIB del país, dentro del cual, el sector pecuario aportó un 28.9% (ICA, 2019). Esta cifra subraya la relevancia del sector pecuario dentro del contexto agrícola y su contribución a la economía nacional. La magnitud de esta contribución económica establece la importancia del sector y el potencial impacto que la producción de biogás a partir de sus residuos podría generar. Adicionalmente, el sector agropecuario y agroindustrial demostró un dinamismo significativo en el comercio exterior, con exportaciones que alcanzaron los \$6.116 millones de dólares en el primer semestre de 2022, lo que significó un aumento del 38.8% en comparación con el mismo periodo de 2021 (UPRA, 2024). Si bien este dato engloba tanto la agricultura como la agroindustria, sugiere una tendencia positiva de crecimiento económico en el sector primario, lo que podría influir favorablemente en el desarrollo de industrias relacionadas, como la producción de biogás.

El presente análisis establece la correlación entre la caracterización de los animales del sector pecuario y la calidad de la biomasa residual generada. Para esta evaluación, se consideran factores biológicos como la alimentación, el metabolismo y el volumen de excretas producidas (Gerber, et al., 2013). Posteriormente, se evaluará el impacto de estas características en las propiedades físicas y químicas de la biomasa. Esto incluye el contenido de humedad, relación carbono-nitrógeno (C/N) y carga orgánica biodegradable, parámetros fundamentales para la eficiencia del proceso de digestión anaeróbica (Mata Alvarez et al., 2014).

A continuación, se analizarán las propiedades del biogás obtenido, como su composición química, poder calorífico y presencia de impurezas, con el fin de determinar su viabilidad como fuente de energía en comparación con combustibles convencionales (Tejada Guzmán, 2022). Finalmente, se realizará un estudio del proceso de refinamiento del biogás, considerando tecnologías de purificación y acondicionamiento para su uso en aplicaciones energéticas específicas, lo que permitirá evaluar su viabilidad técnica dentro del sector pecuario y su contribución a un modelo de economía circular (Pettersson & Wellinger, 2009).

2. Metodología

La metodología empleada fue una revisión bibliográfica que incluyó: la caracterización de los sistemas productivos de los sectores bovino, porcino y aviar; el análisis de las propiedades fisicoquímicas de sus excretas (como la relación C/N); el estudio de las fases y tecnologías de la digestión anaerobia; y el cálculo del potencial energético actualizado con datos del Censo Pecuario Nacional a 2024. El presente trabajo emplea una metodología de revisión bibliográfica y documental de carácter analítico y cuantitativo. El estudio consolida la información técnica, físico-química y energética para evaluar el potencial teórico y técnico de aprovechamiento del biogás a partir de estiércol animal en Colombia. El desarrollo se estructura en fases secuenciales, donde cada capítulo emplea criterios de análisis específicos que se describen a continuación.

Caracterización del sector bovino, sector porcino y sector aviar en Colombia

Este capítulo desarrolla la caracterización de los sectores pecuarios mediante la revisión de fuentes oficiales nacionales. El proceso inicia con la recopilación de cifras poblacionales recientes provenientes del Instituto Colombiano Agropecuario (ICA, 2024, 2025) y del Censo Pecuario Nacional, estableciendo la población ocupada para cada subsector. El análisis procede a identificar los sistemas de producción predominantes (extensivos, semi-intensivos, intensivos) y sus respectivas tasas de confinamiento con base en la literatura técnica (López et al., 2018). Finalmente, se revisan los factores biológicos y de manejo (alimentación, metabolismo, volumen de excretas) que determinan la calidad de la biomasa residual como materia prima para la digestión anaerobia (Gerber et al., 2013).

Digestión Anaerobia de Sustratos Orgánicos para la Producción de Energía y Métodos para su Implementación Práctica

La construcción de este capítulo se fundamenta en la revisión sistemática de literatura especializada en bases de datos académicas y reportes de organismos internacionales. La búsqueda se centra en la descripción de las cuatro fases bioquímicas de la digestión anaerobia (hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis) y en la identificación de los parámetros fisicoquímicos que rigen el rendimiento del proceso, tales como la relación carbono-nitrógeno (C/N) y el contenido de humedad. Posteriormente, el estudio examina las soluciones tecnológicas viables para la implementación práctica en contextos pecuarios, revisando el diseño y la operación de sistemas de biodigestores aplicables a sustratos con alto contenido de humedad (Chen et al., 2015).

Evaluación Técnica del Biogás a Partir de Biomasa Pecuaria en Colombia

Este capítulo ejecuta el cálculo cuantitativo del potencial energético aprovechable. El desarrollo se basa en la aplicación del modelo de balance de masas (ecuación del potencial) a los subsectores pecuarios. Este modelo integra la población ocupada actualizada con los factores técnicos de rendimiento específicos (producción de estiércol y rendimiento de biogás por kilogramo de sólidos volátiles), manteniendo la base metodológica de López et al. (2018). Se realiza una distinción metodológica explícita entre el Potencial Teórico (con recolección del 100%) y el Potencial Técnico (aplicando la tasa de confinamiento real). Finalmente, el cálculo se convierte a unidades de producción eléctrica (GWh/año), asumiendo la eficiencia de conversión estándar de equipos comerciales.

Discusión

La sección de Discusión desarrolla un análisis comparativo de los hallazgos del potencial energético y la viabilidad técnica. Se contrastan los resultados actualizados del potencial teórico y técnico con las estimaciones previas de la literatura nacional (Suárez y Rincón, 2020) y con los objetivos de la política energética del país (UPME, 2022). El desarrollo de la discusión evalúa la factibilidad de aprovechamiento del biogás pecuario, examinando las implicaciones de las diferencias en la tasa de confinamiento entre especies y discutiendo las limitaciones técnicas y operacionales identificadas en la revisión. La sección integra las conclusiones biológicas, técnicas y energéticas para establecer el rol del biogás en la diversificación de la matriz eléctrica nacional.

3. Resultados

Caracterización del sector bovino, sector porcino y sector aviar en Colombia

El sector pecuario colombiano comprende la cría de diversas especies animales con fines de producción de alimentos (carne, leche, huevos), pieles y otros subproductos (IPA SAS, 2022). Las actividades pecuarias están influenciadas por factores geográficos, climáticos, culturales y socioeconómicos que varían a lo largo del territorio nacional (Bravo Parra et al., 2021). Los datos censales, como los proporcionados por el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA), se consolidan anualmente y son el resultado de la recopilación de información proveniente de registros de vacunación, gremios de productores, visitas de vigilancia del ICA y registros de entidades territoriales como las Unidades Municipales de Asistencia Técnica Agropecuaria (UMATAS) y secretarías de desarrollo (ICA, 2025).

Tabla 1

Población histórica de animales del sector pecuario en Colombia.

Sector	2025	2024	2023	2022	2021	2020
Bovino	30.344.182	29.194.104	29.642.539	29.301.392	27.973.390	28.245.262
Porcino	21.336.552	10.639.149	9.658.204	9.658.204	5.950.113	6.710.666
Aviar	216.109.090	208.331.156	215.217.692	222.130.788	210.541.160	201.600.918
Bufalino	538.574	563.372	485.141	415.713	414.637	338.567
Ovino	1.689.875	1.792.245	1.819.247	1.805.877	1.779.697	1.682.767
Caprino	1.112.002	1.148.240	1.155.721	1.149.054	1.136.839	1.034.615
Equino	964.426	1.482.286	1.575.512	1.600.415	1.684.630	1.584.776

Nota. Elaboración propia con base en (ICA, 2025).

En el presente estudio se seleccionaron los sectores bovino, porcino y aviar como objeto de análisis, dado que estos concentran la mayor proporción de la población pecuaria nacional, los tipos de producción y sus características se facilitan las condiciones técnicas para la implementación de sistemas de aprovechamiento energético mediante digestión anaerobia. Según datos del Censo Pecuario Nacional 2024 del Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) y como se observa en la Tabla 1, la ganadería bovina es la principal actividad pecuaria en Colombia, con una población de 29,194,104 animales distribuidos en 638,941 predios. Los departamentos con mayor concentración de ganado bovino son Antioquia (11%), Meta (8%), Casanare (8%), Córdoba (8%) y Caquetá (7%) (ICA, 2024), la porcicultura reúne 10,639,149 de animales, concentrándose el 64.3% en los departamentos de Antioquia (33%), Valle del Cauca (13%), Cundinamarca (8%), Meta (7%), y Córdoba (4%). (ICA, 2024). Los datos del Censo del ICA clasifican la producción porcina en varios sistemas. Traspatio, con 152,069 predios (79% del total). (ICA, 2024). Comercial Familiar, con 35,797 predios (19%). (ICA, 2024). Comercial Industrial, con 4,025 predios (2%). (ICA, 2024) y Producción Tecnificada, con 784 granjas (0.4%). (ICA, 2024). Finalmente, la avicultura es una de las actividades pecuarias más dinámicas. El número de aves para el año 2024 fue de 208,331,156, con una alta tecnificación y concentración en regiones como Santander, Valle del Cauca y Cundinamarca. (ICA, 2024). Sus sistemas de producción se clasifican en Traspatio que representa 462,034 predios (99% del total), con 9,299,387 aves (4% del total) (ICA, 2024) y Tecnificados (engorde, levante, postura, material genético) representando 6,032 predios (1%), con 199,031,769 aves (96% del total) (ICA, 2024).

La magnitud en la generación de residuos orgánicos, así como el grado de tecnificación de estos sectores, permite suponer una mayor viabilidad en términos de volumen de biomasa disponible, eficiencia en la recolección de excretas y factibilidad de integración de biodigestores en los sistemas productivos. La elección de estos sectores responde, por tanto, a criterios de representatividad, disponibilidad de sustrato y potencial de impacto en la transición hacia modelos de producción más sostenibles (Petersson & Wellinger, 2009; UPME, 2011).

Tabla 2*Tipos de sistema productivo por sector.*

Sector	N° de cabezas	Producción por		Representación	Fuente
		N° de cabezas	cabeza (kg/año)		
Bovino	29.194.104	4417,2	Sistemas extensivos	45,8%	(DANE, 2021), (UPME, 2011)
			Sistemas semi-intensivos	15%	
			Sistemas intensivos	9,6%	
Porcino	10.639.149	74,76	Traspatio	9%	(ICA, 2024), (UPME, 2011)
			Comercial familiar	12%	
			Comercial industrial	17%	
			Tecnificada	62%	
Aviar	208.331.156	30	Traspatio	4%	(ICA, 2024), (UPME, 2011)
			Tecnificada	96%	

Fuente: Elaboración propia con base en (DANE, 2021), (ICA, 2024) y (UPME, 2011).

En el contexto de la ganadería bovina en Colombia, los principales bienes generados son la carne y la leche, los cuales constituyen la base de la contribución del sector bovino a la seguridad alimentaria nacional (IPA SAS, 2022). Se identifican varios modelos de explotación clasificados de acuerdo con su finalidad. La cría, que representa aproximadamente el 35% de los hatos, está enfocada en la obtención de terneros (Bravo Parra et al., 2021). La ceba constituye cerca del 20% de los hatos, dedicada al engorde de animales para sacrificio (Bravo Parra et al., 2021). Sistema doble propósito, predominante con el 39% de los hatos, está orientado a la generación simultánea de carne y leche (Bravo Parra et al., 2021). Finalmente las fincas integradas con ciclo completo que abarcan cría, levante y ceba (Bravo Parra et al., 2021). Así mismo, las unidades de producción bovina en Colombia varían significativamente en cuanto a su escala, nivel de tecnificación y tipo de manejo, lo que define un espectro desde esquemas campesinos y de minifundio hasta explotaciones tecnificadas y de latifundio (Bravo Parra et al., 2021).

Desde la perspectiva del nivel tecnológico, los sistemas bovinos pueden clasificarse en sistemas extensivos que se caracterizan por el uso de grandes extensiones de tierra por animal, una baja inversión en tecnología e insumos, y una mano de obra predominantemente familiar o con baja calificación (Bravo Parra et al., 2021). Sistemas semi-intensivos que combinan el pastoreo con una suplementación alimenticia estratégica e implican una mayor inversión en el mejoramiento de praderas, infraestructura básica y, en ocasiones, en el mejoramiento genético del

hato (Bravo Parra et al., 2021) y los sistemas intensivos los cuales requieren una alta inversión por unidad de área y por animal, el uso de tecnología avanzada, praderas mejoradas con alta carga animal y una suplementación constante con concentrados y otros alimentos balanceados, pueden incluir prácticas de confinamiento o semiconfinamiento (Bravo Parra et al., 2021).

Las unidades de producción porcina en Colombia presentan una marcada heterogeneidad en cuanto a su escala y nivel de tecnificación, lo que permite diferenciar desde sistemas de traspatio hasta explotaciones altamente tecnificadas (Siza et al., 2021). La clasificación del Instituto Colombiano Agropecuario (ICA, 2024) basada en el censo pecuario de 2024, permite caracterizar los sistemas productivos en producción de traspatio, producción comercial familiar, producción comercial industrial, producción tecnificada. La primera se asocia típicamente con la producción campesina o de subsistencia, caracterizándose por ser no tecnificadas, de muy pequeña escala (minifundios), con un bajo número de animales por unidad, infraestructura mínima y prácticas de manejo tradicionales (Siza et al., 2021). La segunda categoría engloba granjas de tamaño pequeño a mediano que orientan su producción principalmente al mercado, representando una transición entre la producción campesina de traspatio y sistemas más formalizados (Siza et al., 2021). La tercera está compuesta por operaciones de una mediana a gran escala y con un grado de organización y tecnificación superior al de los sistemas comerciales familiares, acercándose a modelos empresariales (Siza et al., 2021). Finalmente, la producción tecnificada se trata de explotaciones altamente tecnificadas, usualmente de gran escala, que se distinguen por una inversión significativa en infraestructura moderna, genética de alto rendimiento, nutrición de precisión y prácticas de manejo enfocadas en la maximización de la eficiencia productiva y la bioseguridad (Siza et al., 2021).

Al igual que en otros sectores pecuarios, la producción avícola en Colombia muestra una dualidad entre sistemas tradicionales de pequeña escala y sistemas altamente tecnificados de gran escala. El Instituto Colombiano Agropecuario (ICA, 2025) clasifica las unidades de producción en dos. La producción de traspatio se caracteriza por un bajo número de aves por unidad, infraestructura mínima o rústica, y un manejo tradicional, con una producción destinada principalmente al autoconsumo familiar o a la venta en mercados locales muy pequeños (ICA, 2024) y la producción tecnificada se trata de operaciones altamente especializadas y tecnificadas, a menudo de gran escala (que podrían considerarse latifundios en términos de capacidad instalada y volumen de producción), enfocadas en la producción industrial de carne (granjas de pollos de engorde) o de huevos (granjas de gallinas ponedoras) (FENAVI, 2018).

Tabla 3

Propiedades de las biomásas.

Sector	Contenido de humedad	Sólidos Totales (ST)	Sólidos Volátiles (SV)	Relación Carbono/Nitrógeno (C/N)	Fuente
Bovino	(71-89) %	(11-29) %	(36-73) %	(13-33) %	(1), (3), (7), (8), (9) y (10)
Porcino	(67-76) %	(24-33) %	(50-80) %	(5-13) %	(3), (6), (8) y (10)
Aviar	(18-76) %	(24-82) %	(20-40) %	(9-13) %	(2), (4), (5), (8) y (10)

Fuente: Elaboración propia con base en: 1. (Bernal Calderón y Orozco Aguirre, 2019), 2. (Carhuacho et al., 2015), 3. (Castro Molano et al., 2019), 4. (Duharte Rodríguez, 2021), 5. (Estrada Pareja, 2005), 6. (Flotats Ripoll, 2001), 7. (Mesinas, 2018), 8. (Reyes Aguilera y Pérez Castellón, 2019), 9. (Sánchez Roque, 2023), 10. (UPME, 2011).

Las propiedades fisicoquímicas de la biomasa pecuaria determinan la viabilidad y el diseño de los sistemas de digestión anaerobia. Los estiércoles bovino y porcino se caracterizan por un alto contenido de humedad (entre 70 y 90 % y entre 67 y 76 %, respectivamente), lo que los posiciona como sustratos ideales para tecnologías de digestión por vía húmeda, las más extendidas en el sector (Bernal Calderón y Orozco Aguirre, 2019; UPME, 2011). En contraste, la biomasa aviar presenta una humedad muy variable y generalmente inferior (entre 18 % y 76 %), resultando en un mayor contenido de sólidos totales que puede requerir manejos diferenciados como la co-digestión (Estrada Pareja, 2005). A pesar de estas diferencias, los tres tipos de biomasa poseen una alta fracción de sólidos volátiles, indicando una elevada cantidad de materia orgánica disponible para ser convertida en biogás.

El parámetro químico más crítico para la estabilidad del proceso biológico es la relación Carbono/Nitrógeno (C/N). El estiércol bovino presenta una relación casi óptima entre 13 y 33 % (UPME, 2011), lo que favorece un proceso de digestión estable. Por el contrario, los sustratos porcinos y aviar se caracterizan por una baja relación C/N, con valores entre 5 y 13% y entre 9 y 13%, respectivamente (Reyes Aguilera y Pérez Castellón, 2019; UPME, 2011). Esta condición representa un desafío técnico significativo debido al riesgo de inhibición del proceso por altas concentraciones de amoníaco. Esto implica que, si bien son ricos en materia orgánica, el aprovechamiento energético de los residuos porcinos y aviares a menudo requiere un control de proceso más estricto o la co-digestión con materiales ricos en carbono para balancear la mezcla y asegurar la viabilidad del sistema.

En Colombia, el ICA reportó para 2017 una población de 23,5 millones de bovinos, 5,3 millones de porcinos y 185 millones de aves (Parrales Ramírez et al., 2019). Esta actividad genera aproximadamente 2 kg por cada 100 kg de peso porcino y 8 kg de estiércol por cada 100 kg de peso bovino, representando una importante fuente potencial para biogás. El aprovechamiento de estas excretas contribuye a objetivos ambientales y socioeconómicos: generación de energía renovable en zonas rurales (Montenegro Orozco et al., 2016), reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2021), y producción de

biofertilizantes que mejoran la sostenibilidad agropecuaria (Sánchez Marín, 2019). Los sistemas intensivos facilitan la recolección concentrada de excretas, optimizando la viabilidad de proyectos de biogás. La co-digestión de diferentes tipos de estiércoles puede aumentar la producción de biogás entre 25% y 400% comparado con la mono-digestión (Castro Molano et al., 2019). Los sistemas extensivos y de traspatio, aunque presentan mayores desafíos, también deben considerarse en estrategias nacionales por su amplia distribución (Parrales Ramírez et al., 2019).

Digestión Anaerobia de Sustratos Orgánicos para la Producción de Energía y Métodos para su Implementación Práctica.

La producción pecuaria genera residuos orgánicos que pueden aprovecharse para producir biogás mediante digestión anaerobia (DA). Este proceso ofrece tres beneficios principales: generación de energía renovable, reducción de contaminación ambiental y producción de biofertilizantes (Parrales Ramírez et al., 2019). La digestión anaerobia transforma la materia orgánica en biogás compuesto principalmente por metano (50-75%) y dióxido de carbono (25-40%) (Castro Molano et al., 2019). Es un proceso biológico complejo mediante el cual la materia orgánica es descompuesta por consorcios microbianos y arqueas en ausencia de oxígeno, generando biogás, un combustible renovable, y un efluente estabilizado denominado digestato (González y Forero, 2021; FAO et al., 2011). Este proceso representa una tecnología clave para el tratamiento de residuos orgánicos, como el estiércol animal, permitiendo la recuperación de energía y nutrientes (Campos y Flotats, 2012; López Martínez et al., 2018).

La conversión anaeróbica de materia orgánica compleja a metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2) ocurre a través de una serie de etapas bioquímicas secuenciales, llevadas a cabo por diferentes grupos de microorganismos que actúan en sintrofia (Deublein & Steinhauser, 2008; Díaz et al., 2002). Tradicionalmente, el proceso se describe en cuatro fases principales: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (González y Forero, 2021; FAO et al., 2011). En la hidrólisis, macromoléculas orgánicas complejas (polímeros como carbohidratos, proteínas y lípidos) son hidrolizadas a compuestos orgánicos solubles más simples (monómeros como azúcares, aminoácidos y ácidos grasos) por la acción de enzimas extracelulares secretadas por bacterias hidrolíticas (Campos y Flotats, 2012; Bischofsberger et al., 2005). Esta fase puede ser limitante para sustratos con alta proporción de material lignocelulósico. La acidogénesis implica la fermentación de los monómeros solubles por bacterias acidogénicas, produciendo principalmente ácidos grasos volátiles (AGV) como acético, propiónico y butírico, además de alcoholes, CO_2 e hidrógeno (H_2) (Deublein & Steinhauser, 2008; Díaz et al., 2002). Durante la acetogénesis, las bacterias acetogénicas convierten los AGV de cadena larga y alcoholes en acetato, H_2 y CO_2 (González y Forero, 2021; FAO et al., 2011). Esta etapa es termodinámicamente sensible y requiere bajas presiones parciales de H_2 , mantenidas gracias al consumo de este por parte de las arqueas metanogénicas (Bischofsberger et al., 2005). Finalmente, en la metanogénesis, las arqueas metanogénicas producen metano. Existen dos rutas principales: la metanogénesis hidrogenotrófica, que utiliza H_2 y CO_2 para formar CH_4 , y la metanogénesis acetoclástica, que convierte el acetato en CH_4 y CO_2 (Campos y Flotats, 2012; Deublein & Steinhauser, 2008). La metanogénesis acetoclástica suele ser la ruta dominante en la digestión de estiércoles (FAO et al., 2011). El éxito del proceso global depende del equilibrio y la cooperación entre estos distintos consorcios microbianos (Díaz et al., 2002).

La eficiencia de la digestión anaerobia y la producción de biogás dependen significativamente de las características fisicoquímicas del sustrato alimentado al biodigestor (Olaya y González, 2009). Uno de los parámetros más críticos es la relación Carbono/Nitrógeno (C/N), que debe mantenerse en un rango óptimo, generalmente entre 20 y 30, para asegurar el balance nutricional de los microorganismos (FAO et al., 2011; Deublein & Steinhauser, 2008). Los estiércoles animales, especialmente los de aves y cerdos, a menudo presentan una relación C/N baja (inferior a 20), lo que puede conducir a la acumulación de amoníaco (NH_3) e inhibición del proceso metanogénico (Nielsen & Angelidaki, 2008).

Para ajustar la relación C/N y mejorar la eficiencia del proceso, frecuentemente se recurre a la co-digestión, que consiste en mezclar el estiércol con otros sustratos orgánicos (cosustratos) ricos en carbono, como residuos agrícolas (pajas, bagazos), residuos de alimentos o lodos de plantas de tratamiento (Angelidaki & Ellegaard, 2003; López Martínez et al., 2018). La co-digestión no solo equilibra los nutrientes, sino que también puede aumentar la producción de biogás al proporcionar una mezcla de sustratos más diversa y mejorar la capacidad buffer del sistema (Nielsen & Angelidaki, 2008). Además, la introducción de un inóculo adecuado, que es una fuente de microorganismos anaerobios activos (generalmente digestato de un reactor en operación o estiércol fresco), es esencial para iniciar el proceso de digestión, especialmente en reactores nuevos o tras periodos de inactividad (FAO et al., 2011; Díaz et al., 2002). Otros factores relevantes del sustrato incluyen el contenido de sólidos totales (ST) y sólidos volátiles (SV), el pH, la alcalinidad y la ausencia de compuestos inhibidores en altas concentraciones (Olaya y González, 2009).

La eficiencia de la digestión anaerobia es sensible a diversas condiciones operativas. La temperatura regula la tasa metabólica de los microorganismos, definiendo rangos óptimos mesofílicos ($30\text{-}40^\circ\text{C}$) o termofílicos ($50\text{-}60^\circ\text{C}$) con diferentes cinéticas de proceso (FAO et al., 2011). El pH es crítico, especialmente para las arqueas metanogénicas que son sensibles a condiciones ácidas ($\text{pH} < 6.5$), pudiendo inhibirse por acumulación de ácidos grasos volátiles (Deublein & Steinhauser, 2008). La relación Carbono/Nitrógeno (C/N) debe estar balanceada (idealmente 20-30:1) para evitar la limitación de nutrientes o la inhibición por amoníaco (FAO et al., 2011). Finalmente, el Tiempo de Retención Hidráulico (TRH), el tiempo promedio que el sustrato permanece en el reactor, debe ser suficientemente largo para permitir la degradación completa de la materia orgánica, pero no tanto como para limitar la eficiencia volumétrica del reactor (Olaya y González, 2009).

La implementación práctica de la digestión anaerobia se realiza en reactores denominados biodigestores, existiendo diversas tecnologías adaptadas a diferentes escalas de producción y condiciones locales (González y Forero, 2021). Los biodigestores en fincas ganaderas y porcinas contribuyen a reducir emisiones de gases de efecto invernadero. Según la FAO (Food and Agriculture Organization), estas tecnologías pueden ayudar al sector ganadero a disminuir hasta en un 30% su producción de gases causantes del calentamiento global (Contexto Ganadero, 2024). El uso de biogás reduce significativamente las emisiones de metano, un gas con potencial de calentamiento global 25 veces mayor que el CO_2 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2021). La concentración de animales en sistemas tecnificados facilita la recolección de excretas y la implementación de biodigestores. Colombia cuenta con más de 500 biodigestores de bajo costo operando con estiércol porcino y bovino, principalmente para cocción de alimentos (Parrales Ramírez et al., 2019). Estos sistemas domésticos son accesibles para pequeños y medianos

productores por su diseño simple y bajo costo (Castro Molano et al., 2019). El uso de biogás reduce la dependencia de combustibles fósiles y disminuye costos energéticos. Un biodigestor puede proporcionar suficiente biogás para una familia de cuatro personas, representando un ahorro mensual superior a 120.000 pesos colombianos en GLP (Contexto Ganadero, 2024). Además, reduce enfermedades respiratorias causadas por la inhalación de humo de leña en espacios cerrados. La selección de la tecnología depende de factores como la cantidad y tipo de estiércol, el clima, la disponibilidad de recursos económicos y técnicos, y el uso final previsto para el biogás y el digestato (Olaya y González, 2009; Campos, 2011).

Los sistemas de pequeña escala están orientados principalmente a explotaciones agropecuarias familiares o comunitarias, con el propósito de satisfacer necesidades energéticas básicas (cocción, iluminación) y obtener biofertilizante (digestato) para uso local (Beteta y González, 2005; Chará et al., 2002). Estos sistemas suelen ser de bajo costo y construcción relativamente sencilla, utilizando materiales locales siempre que sea posible (FAO et al., 2011). Los diseños más comunes a pequeña escala son los digestores tubulares de plástico (polietileno), popularizados en países de Latinoamérica por su bajo costo y facilidad de instalación y mantenimiento (Beteta y González, 2005; Chará et al., 2002; Pedraza et al., 2002). Consisten en una bolsa tubular de plástico semienterrada o apoyada en una zanja, con tuberías de entrada y salida. Otros diseños incluyen los digestores de cúpula fija (tipo chino) y los de cúpula flotante (tipo indio), que requieren construcción civil (ladrillo, cemento) y representan una inversión inicial mayor, pero ofrecen mayor durabilidad (FAO et al., 2011; Olaya y González, 2009). El objetivo principal es la producción de biogás para autoconsumo energético (reemplazo de leña o gas licuado de petróleo - GLP) y la obtención de digestato como fertilizante orgánico mejorado (Beteta & González, 2005; FAO et al., 2011). El manejo suele ser simple, requiriendo la carga diaria de estiércol diluido con agua y la descarga del digestato. Es crucial mantener la hermeticidad del sistema y realizar un mantenimiento básico, como la limpieza periódica de lodos acumulados y la revisión de posibles fugas (Chará et al., 2002; FAO et al., 2011).

Los sistemas a mediana y gran escala se implementan en explotaciones pecuarias de mayor tamaño (granjas porcinas o avícolas intensivas, grandes explotaciones lecheras) o en plantas centralizadas que tratan residuos de varias granjas (Angelidaki & Ellegaard, 2003). El propósito principal suele ser la generación de energía eléctrica y/o térmica para autoconsumo o venta a la red, además del tratamiento de grandes volúmenes de residuos y la producción de fertilizantes (Deublein & Steinhauser, 2008). Se utilizan reactores más sofisticados y de mayor volumen, construidos generalmente en concreto y acero. Los diseños comunes incluyen los Reactores Completamente Agitados (CSTR - Continuously Stirred Tank Reactor), adecuados para sustratos líquidos o semilíquidos como purines, que cuentan con sistemas de mezcla mecánica o hidráulica y control de temperatura (Bischofsberger et al., 2005; Dennis & Burke, 2001). También se emplean reactores de Flujo Pistón (Plug Flow), que son canales largos y estrechos adecuados para estiércoles más espesos (ej. bovino), donde el material fluye lentamente de la entrada a la salida sin mezcla longitudinal (Dennis & Burke, 2001; Olaya y González, 2009). Otros sistemas incluyen reactores de lecho fijo, lecho fluidizado o UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) para efluentes más diluidos (Deublein & Steinhauser, 2008). Tiene los propósitos de maximizar la producción de biogás para generación de energía (electricidad y calor en sistemas de cogeneración - CHP), cumplir normativas ambientales de manejo de residuos, y producir digestato de alta calidad para su comercialización o uso agrícola extensivo (FNR, 2010; Angelidaki & Ellegaard, 2003). Requieren un manejo más tecnificado, con sistemas automatizados de alimentación, control

de parámetros clave (temperatura, pH, carga orgánica, mezcla), monitoreo del proceso y gestión del biogás (almacenamiento, limpieza) y del digestato (separación sólido-líquido, almacenamiento, aplicación) (Bischofsberger et al., 2005; FNR, 2010). Estos sistemas implican una mayor inversión inicial y costos operativos, pero ofrecen mayor eficiencia y control del proceso (Deublein & Steinhauser, 2008).

Evaluación Técnica del Biogás a Partir de Biomasa Pecuaria en Colombia

La evaluación técnica del biogás generado a partir de la biomasa residual del sector pecuario en Colombia es crucial para dimensionar su aporte potencial a la matriz energética nacional y fomentar su aprovechamiento sostenible. Este capítulo se fundamenta en el análisis del estudio "La biomasa residual pecuaria como recurso energético en Colombia" de López et al. (2018), actualizando sus hallazgos con datos más recientes y detallando los aspectos técnicos para la utilización eficiente del biogás.

El análisis del aprovechamiento energético de la biomasa pecuaria en Colombia parte del contexto de su matriz eléctrica, la cual ha mantenido una alta dependencia de fuentes hidroeléctricas (~70%) y termoeléctricas (~30%), con una participación limitada de renovables no convencionales (UPME, 2023). En este escenario, los residuos ganaderos, que superan los 80 millones de toneladas anuales, representan un recurso energético descentralizado y constante (MADR, 2022). La conversión de esta biomasa se enfoca en la digestión anaerobia, método idóneo para sustratos con alto contenido de humedad (>75%), como el estiércol fresco (Chen et al., 2015). Bajo este enfoque, el potencial energético teórico total del país, que asume el aprovechamiento completo de los residuos, se ha estimado en cerca de 75,000 TJ/año (López Martínez et al., 2018).

La estimación del potencial energético se fundamenta en el balance de masas, el cual diferencia claramente entre dos niveles de estimación: el Potencial Teórico y el Potencial Técnico. El Potencial Teórico se define como la bioenergía que se puede obtener a partir de la biomasa residual considerada teóricamente disponible dentro de los límites físicos determinados. Por su parte, el Potencial Técnico es la fracción del potencial teórico disponible considerando las condiciones y limitaciones actuales de recolección y tecnificación. El cálculo del potencial energético se realiza mediante la siguiente ecuación (UPME, 2023):

$$PE_{BRP} = NA * MS * SV * B_o * PCI_{CH_4}$$

PE_{BRP} : Potencial energético biomasa residual pecuaria [TJ /año]

NA : Número de animales [cabezas]

MS : Materia seca [kg MS/cabeza-año]

SV : Sólidos volátiles [kg sv/kg materia seca]

B_o : Producción de biogás [m³ /Kg SV]

PCI_{CH_4} : Poder calorífico inferior del metano [TJ/m³]

Para una evaluación pragmática, es fundamental distinguir entre el potencial teórico y el potencial técnico, que considera únicamente la biomasa recuperable de explotaciones con cierto nivel de tecnificación (Suárez y Rincón, 2020). Este potencial se calcula en aproximadamente 25.401 TJ/año, lo que representa cerca del 15% del potencial teórico total. Considerando una

eficiencia de conversión a electricidad del 20% (López Martínez et al., 2018), este recurso podría generar cerca de 1.410 GWh/año, equivalente a entre el 1% y 1.5% de la producción eléctrica nacional. Un hallazgo clave es la contribución por especie, mientras el ganado bovino domina el potencial teórico por su gran población, los sectores avícola y porcino lideran el potencial técnico debido a sus sistemas de producción en confinamiento, que facilitan la recolección y el manejo del estiércol.

Tabla 4

Potencial energético biomasa residual pecuaria 2025

Sector	Potencial Teórico		Confinamiento	Potencial Técnico	
	TJ/año	GWh/año		TJ/año	GWh/año
Bovino	167.268	46.463	9.60%	16.058	4.460
Porcino	2.866	796	62.00%	1.777	494
Aviar	7.882	2.189	96.00%	7.567	2.102
Total	178.016	49.449		25.401	7.056

Fuente: Elaboración propia con base en (López Martínez et al., 2018) y (UPME, 2011)

En la actualización de la estimación del potencial energético derivado de la biomasa pecuaria en Colombia, se calcularon las proyecciones utilizando cifras poblacionales recientes, manteniendo como base metodológica los factores de producción de estiércol y el rendimiento de biogás establecidos por López et al. (2018). En el caso del ganado bovino, la población proyectada para 2025 asciende a 30.344.182 cabezas (ICA, 2025), lo que implica un potencial energético teórico de aproximadamente 167.268 TJ/año. De manera similar, el sector porcino ha mostrado un crecimiento sustancial, alcanzando una población de 21.336.552 animales en 2025 (ICA, 2025), lo cual se traduce en un potencial teórico estimado de 5.748 TJ/año. De la misma manera, para el año 2024 el sector avícola presentó una población de 216.109.090 de aves, que corresponde a un potencial de 8.176 TJ/año. Al consolidar estas cifras, el potencial energético teórico total de los subsectores pecuarios más relevantes supera los 187.000 TJ/año, un dato que se alinea con las proyecciones de aprovechamiento de biomasa para la transición energética del país (UPME, 2022). Este potencial representa un recurso energético endógeno y constante, cuyo aprovechamiento podría contribuir a la diversificación de la matriz eléctrica nacional, actualmente dependiente en un 66.8% de la generación hidráulica.

El resultado del potencial técnico aprovechable se deriva de la aplicación de un criterio de pragmatismo energético, donde solo se considera la biomasa recuperable de los sistemas pecuarios. Por esta razón, se selecciona e incorpora en el cálculo el porcentaje de confinamiento real de cada especie. Aunque el ganado bovino lidera el potencial teórico por su gran volumen poblacional, su tasa de confinamiento es la más baja, reflejando que solo los animales en sistemas intensivos (ceba o lechería estabulada) contribuyen al potencial técnico. Este bajo porcentaje se debe a la dificultad de estandarizar las prácticas de recolección en los sistemas bovinos predominantes (extensivos y

semi-intensivos), lo que limita su aprovechamiento. En contraste, los sectores porcino y avícola lideran la contribución efectiva al biogás gracias a sus altos índices de confinamiento y la centralización de sus excretas, confirmando que el aporte técnico se prioriza donde la viabilidad operativa es mayor.

La eficiencia del aprovechamiento del biogás depende de múltiples factores, desde la composición del sustrato hasta la tecnología de conversión final. Es importante tener en consideración los requerimientos del sustrato y de co-digestión, las condiciones operativas del biodigestor y la purificación y acondicionamiento del biogás. La relación Carbono/Nitrógeno (C/N) del sustrato es un parámetro crítico, con un rango óptimo entre 20:1 y 30:1 para evitar la inhibición por amoníaco o la limitación de nutrientes. Estiércoles como el avícola y porcino a menudo tienen relaciones C/N bajas, por lo que la co-digestión con materiales ricos en carbono (residuos agrícolas, por ejemplo) es una estrategia recomendada para mejorar la eficiencia y la producción de metano, como señalan Nielsen & Angelidaki (2008). La caracterización adecuada de la biomasa, incluyendo el porcentaje de humedad y sólidos volátiles, es fundamental (Mata Alvarez et al., 2014). El control de parámetros como la temperatura (mesofílica: 30-40°C; termofílica: 50-60°C), pH (idealmente 6.5-7.5 para metanogénesis), Tiempo de Retención Hidráulico (TRH) y Tasa de Carga Orgánica (TCO) es esencial para maximizar la producción de biogás y su contenido de metano (FAO et al., 2011; Deublein & Steinhauser, 2008). Un TRH adecuado, por ejemplo, asegura la completa degradación de la materia orgánica sin limitar la eficiencia volumétrica del reactor (Olaya y González, 2009). La mezcla dentro del biodigestor también juega un rol importante en la eficiencia del proceso (Bischofsberger et al., 2005). El biogás crudo contiene principalmente metano (CH₄, 50-75%) y dióxido de carbono (CO₂, 25-50%) (González y Forero, 2021), además de impurezas como sulfuro de hidrógeno (H₂S), vapor de agua, amoníaco (NH₃), y trazas de otros gases. Para su uso energético eficiente, especialmente en motores o para su inyección a redes de gas, es necesario un proceso de purificación (upgrading) para aumentar la concentración de metano y remover componentes indeseables (Petersson & Wellinger, 2009). La remoción de H₂S es crítica debido a su alta corrosividad y toxicidad (Petersson & Wellinger, 2009); se recomienda que su concentración sea inferior a 50 ppm para la mayoría de las aplicaciones de combustión.

4. Discusión

El análisis de viabilidad para el aprovechamiento del biogás en Colombia no ofrece una respuesta uniforme para todos los subsectores pecuarios; por el contrario, revela una clara diferenciación entre ellos. La viabilidad no puede medirse únicamente por el potencial energético teórico, sino que debe ponderarse por la factibilidad técnica de la recolección de biomasa y las características fisicoquímicas del sustrato (Parrales Ramírez et al., 2019). Este enfoque multidimensional permite jerarquizar los sectores y concluir que el animal con el mayor potencial bruto no es necesariamente el más viable para la implementación de proyectos energéticos a escala.

El sector bovino, a pesar de representar la mayor fuente de potencial energético teórico del país con más de 167.000 TJ/año debido a su masiva población, presenta la menor viabilidad práctica para proyectos de mediana y gran escala. La razón fundamental es su modelo de producción predominantemente extensivo, con ganado en pastoreo. Esta dispersión geográfica del recurso hace que la recolección sistemática y centralizada del estiércol sea logísticamente compleja y económicamente inviable (Suárez y Rincón, 2020). Por lo tanto, el potencial técnico

aprovechable del sector bovino se limita a las operaciones con sistemas de semiestabulación o lecherías especializadas. Esta limitación resulta en un bajo factor de confinamiento (9.6%) y hace que su contribución al potencial técnico nacional sea marginal, limitando su aprovechamiento a aplicaciones de pequeña escala.

En contraste, los sectores avícola y porcino emergen como los candidatos más viables y los principales contribuyentes al potencial técnico del país. Ambas industrias se caracterizan por una alta concentración de animales en instalaciones confinadas. Esta condición resuelve el principal obstáculo del sector bovino: la recolección de la biomasa. Con tasas de confinamiento que superan el 96.2% para el avícola y alcanzan el 65% para el porcino, estos sectores aseguran la mayor recuperación de excretas. Por ello, el potencial técnico generado por las excretas de porcinos 3.563 TJ/año y aves 7.849 TJ/año lidera la matriz del potencial técnico aprovechable. Esta característica intrínseca, que convierte a las granjas en núcleos ideales para la gestión centralizada del estiércol, impulsa el desarrollo de proyectos energéticos de escala media y grande (FENAVI, 2018).

La idoneidad de cada sustrato, sin embargo, depende de sus propiedades fisicoquímicas. El estiércol bovino y porcino, con alto contenido de humedad (~85-95%), son ideales para la digestión anaerobia por vía húmeda. En cambio, la biomasa aviar es un sustrato más seco (~40% de sólidos) que a menudo exige co-digestión y presenta un bajo ratio Carbono/Nitrógeno (C/N) que puede causar inhibición por amoníaco (Bernal Calderón y Orozco Aguirre, 2019). Aunque el biogás resultante es similar en todos los casos (55-70% de metano), el gas de origen porcino y aviar suele tener mayor concentración de sulfuro de hidrógeno (H₂S), un compuesto corrosivo que exige un tratamiento de limpieza crítico antes de su uso (Petersson & Wellinger, 2009).

Al comparar directamente los dos sectores más promisorios, el sector porcino presenta una ventaja técnica decisiva sobre el avícola, posicionándolo como el más viable de los tres. El estiércol porcino (purines) es un sustrato líquido o semilíquido, lo que facilita su manejo, bombeo y alimentación en biodigestores de flujo continuo, la tecnología más extendida y optimizada (Manrique et al., 2015). Por otro lado, el residuo avícola (gallinaza) es un sustrato sólido que presenta mayores desafíos técnicos, además, en Colombia gran parte de la gallinaza producida en el sector avícola se comercializa en el mercado agrícola debido a su uso como abono orgánico, lo que representa una competencia directa para su destinación energética, ya que los productores priorizan su venta como enmienda agrícola frente a su recolección para biodigestión (González et al., 2020). En consecuencia, la simplicidad operativa y la compatibilidad con la tecnología de biogás estándar hacen que el sector porcino ofrezca el camino más directo y con menor riesgo técnico para desarrollar proyectos de bioenergía rentables y escalables en Colombia.

Actualmente, se requiere una revisión y actualización de la normativa existente para el desarrollo de biogás, con el fin de superar las limitaciones que actualmente enfrenta como fuente renovable de energía (Velásquez, 2021). Se debe simplificar el acceso a los incentivos tributarios y financieros ya establecidos en la Ley 1715 de 2014, extendiéndolos de manera efectiva a proyectos de pequeña y mediana escala, que son predominantes en el sector pecuario (Ortiz et al., 2019). En cuanto a la tecnificación, se recomienda fomentar la estandarización en los diseños de biodigestores, usando modelos de bajo costo y fácil operación, que han demostrado ser efectivos en zonas rurales (Cruz & Oviedo, 2019). Debe complementarse con programas de capacitación para los productores, para asegurar el buen manejo de la tecnología y la gestión de los

subproductos. Finalmente, la promoción de proyectos piloto debe enfocarse en la co-digestión de estiércol porcino y avícola con otros residuos orgánicos disponibles localmente, lo que permite optimizar la producción de biogás y mitigar los riesgos asociados a la variabilidad de la biomasa pecuaria (LEDS LAC, 2024). Estos proyectos deben ser concebidos como modelos demostrativos que faciliten la escalabilidad y la réplica, contribuyendo a la diversificación de la matriz energética y a la gestión ambiental sostenible de los residuos pecuarios en el país.

Referencias

- Angelidaki, I. & Ellegaard, L. (2003): *Codigestion of manure and organic wastes in centralized biogas plants: status and future trends*. Appl. Biochem. Biotechnol
- Bernal Calderón, J. P. y Orozco Aguirre, J. P. (2019). *Comparación del estiércol bufalino y bovino como potenciales inóculos en el proceso de digestión anaerobia*. Universidad Pontificia Bolivariana.
<https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/8441/39175.pdf?sequence=1>
- Beteta, T. C. y González, J. A. (2005). *Manual de construcción y uso de biodigestores tubulares plásticos*. Guía Técnica No. 7. Universidad Nacional Agraria, Managua.
<http://repositorio.una.edu.ni/2412/1/nf04b562.pdf>
- Bischofsberger, W., Dichtl, N., Rosenwinkel, K. H., Seyfried, C. F. & Böhnke, B. (2005). *Anaerobtechnik*. Springer Verlag. Berlin-Heidelberg
- Bravo Parra, A. M., Valencia, J. B., Carbonari, D. E., Vélez, A. F., Céspedes, J., García Botina, M. J., Díaz, N., Charry Camacho, A., Jäger, M., Hurtado, J. J. y Tapasco Alzate, J. (2021). *La Ganadería en Colombia*. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit [GIZ] GmbH & Alianza CIAT-Bioversity.
https://www.giz.de/en/downloads/GIZ_CIAT_GanaderiaPag_sencillas_web.pdf
- Campos, C. (2011). *Metodología para determinar los parámetros de diseño y construcción de biodigestores para el sector cooperativo y campesino*. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias. Vol 20. núm 2.
- Campos, E. y Flotats, X. (2012). *Procesos biológicos: La digestión anaerobia y el compostaje*. Editorial Díaz de Santos. Tratamiento y valorización energética de residuos
- Carhuancho, F., Ramírez, J., & Guerrero, J. (2015). *Gestión ambiental de residuos avícolas mediante digestión anaerobia para la producción de fertilizantes orgánicos líquidos*. Anales Científicos, 76(2), 231-237

- Castro Molano, L. P., Parrales Ramírez, Y. A. y Escalante Hernández, H. (2019). *Co-digestión anaerobia de estiércoles bovino, porcino y equino como alternativa para mejorar el potencial energético en digestores domésticos*. Revista ION. 32(2)
- Chará, J., Pedraza, G. y Conde, N. (2002). *Instalación y mantenimiento de biodigestores plásticos*. CIPAV
- Chen, Y., Cheng, J. J. & Creamer, K. S. (2015). *Inhibition of anaerobic digestion process: A review*. Bioresource Technology. 99(10). <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.01.057>
- Congreso de Colombia. (2014). Ley 1715 de 2014. Diario Oficial. 49150
- CONtexto Ganadero. (2024). *Los biodigestores como solución sostenible para ganaderos*. CONtexto Ganadero. <https://www.contextoganadero.com/porcicola/los-biodigestores-como-solucion-sostenible-para-ganaderos>
- Cruz, J. T., & Oviedo, K. M. (2019). *Aprovechamiento de la biomasa residual pecuaria en Colombia*. Mare Ingenii, 1(1), 1-10
- Cuenca Jiménez, N. J., Chavarro Miranda, F. y Díaz Gantiva, O. H. (2008). *El sector de ganadería bovina en Colombia. Aplicación de modelos de series de tiempo al inventario ganadero*. Revista Facultad de Ciencias Económicas: Investigación y Reflexión. XVI(1)
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2021). *Caracterización de la actividad ganadera a partir del aprovechamiento estadístico de registros administrativos: 1er Ciclo Nacional de Vacunación 2021* (Boletín técnico). DANE. https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/agropecuario/caracterizacion-ganadera/boletin_1er-ciclo-vacunacion-2021.pdf
- Dennis, A. & Burke, P. A. (2001). *Dairy Waste Anaerobic Digestion Handbook*. Environmental Energy Company. Olympia WA. USA
- Deublein, D. & Steinhauser, A. (2008). *Biogas from Waste and Renewable Resources. An introduction*. Wiley-VCH, Verlag GmbH & Co. KGaA. Weinheim, Germany
- Díaz, M., Espitia, S. y Molina, F. (2002). *Digestión anaerobia: Una aproximación a la tecnología*. Universidad Nacional de Colombia. http://www.bdigital.unal.edu.co/43178/2/9587011961_Parte%201.pdf
- Duarte Rodríguez, W. L. (2021). *Estimación del potencial de biogás a partir de la gallinaza*. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, 30(1)

- Durazno Coronel, A. D. (2018). *Valoración de estiércol bovino y porcino en la producción de biogás en un biodigestor de producción por etapas*. Universidad Politécnica Salesiana
- Estrada Pareja, M. M. (2005). *Manejo y procesamiento de la gallinaza*. Revista Lasallista de Investigación. 2(1). <https://www.redalyc.org/pdf/695/69520108.pdf>
- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe [FNR]. (2010). *Guide to Biogas: From Production to Use*. Biogasportal. https://energypedia.info/images/4/46/Guide_to_Biogas-From_Production_to_Use.pdf
- FAO, MINENERGIA, PNUD, y GEF. (2011). *Manual del Biogás*. Proyecto CHI/00/G32. 120. <http://www.fao.org/docrep/019/as400s/as400s.pdf>
- Federación Nacional de Avicultores de Colombia [FENAVI]. (2018). *La avicultura*. Revista Nacional de Avicultura. 250. <https://fenavi.org/wp-content/uploads/2018/05/revista-250.pdf>
- Flotats Ripoll, X. (2001). *Digestión anaerobia de purines de cerdo y co-digestión con residuos de la industria alimentaria*. Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya
- Gerber, P. J., Steinfeld, H., Henderson, B., Mottet, A., Opio, C., Dijkman, J., Falcucci, A. & Tempio, G. (2013). *Tackling climate change through livestock: A global assessment of emissions and mitigation opportunities*. Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO]. <https://www.fao.org/3/i3437e/i3437e.pdf>
- González, E., y Forero, E. (2021). *Fundamentos del proceso de digestión anaeróbica*. En E. González y E. Forero (Eds.), *Biogás: nanotecnología, beneficios y producción* (cap. 1). Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
- González, H., Pérez, L., & Rojas, C. (2020). *Gestión de residuos avícolas en sistemas productivos colombianos: alternativas para el aprovechamiento sostenible*. Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias. 33(1). <https://doi.org/10.17533/udea.rccp.v33n1a05>
- Instituto Colombiano Agropecuario [ICA]. (2019). *Diagnóstico del sector lácteo en Colombia*. <https://www.ica.gov.co/getattachment/71681b1c-2715-4a9d-b893-192348714211/Diagnostico-del-sector-lacteo-en-Colombia.aspx>
- Instituto Colombiano Agropecuario [ICA]. (2024). *Censos Pecuarios Nacional*. <https://www.ica.gov.co/areas/pecuaria/servicios/epidemiologia-veterinaria/censos-2016/censo-2018>

- Instituto Colombiano Agropecuario [ICA]. (2025). *Censos Pecuarios Nacional*.
<https://www.ica.gov.co/areas/pecuaria/servicios/epidemiologia-veterinaria/censos-2016/censo-2018>
- IPA SAS. (2022). *¿Cuáles son las actividades pecuarias en Colombia?*.
<https://www.ipasas.co/2022/07/08/cuales-son-las-actividades-pecuarias-en-colombia/>
- LEDS LAC. (2024). *De la práctica a la política: análisis de las barreras a la inversión en biogás en Colombia y las medidas para abordarlas*. Unidad de Planeación Minero Energética (UPME)
- López Martínez, G., Buriticá Arboleda, C. y Silva Lora, E. (2018). *La biomasa residual pecuaria como recurso energético en Colombia*. 12(2). <https://doi.org/10.14483/22484728.14066>
- Manrique, I., Muñico, A., Sierra, D., Soriano, W. y Torre, D. (2015). *La obtención de biogás por fermentación anaerobia a partir de estiércol de porcino a nivel laboratorio*. Universidad Nacional del Centro de Perú. <https://es.scribd.com/doc/293911321/obtencion-de-Biogas-Por-Fermentacion-Anaerobia-a-Partir-deEstiercol-de-Porcino-a-Nivel-Laboratorio>
- Mata-Alvarez, J., Dosta, J., Macé, S. & Astals, S. (2014). *Codigestion of solid wastes: A review of its uses and perspectives including modeling*. Critical Reviews in Biotechnology. 34(1). <https://doi.org/10.3109/07388551.2012.726361>
- Mesinas, C. M. (2018). *Caracterización fisicoquímica de excreta bovina para producir biogás, en una granja de ciudad Valles, SLP*. Revista Electrónica de Divulgación de la Investigación, 10(2)
- Meza Acosta, K. I. y Romero Comas, O. F. (2023). *Potencial de la codigestión anaeróbica de sustratos y estiércol porcino hacia la producción de metano*. Revista de Investigación, Desarrollo e Innovación, 13(1)
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural [MADR]. (2022). *Informe de gestión del sector agropecuario 2022*. Gobierno de Colombia. <https://www.minagricultura.gov.co/>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021). *Guía de biogás sector porcícola*. <https://economiecircular.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/09/guia-biogas-sector-porcicola-ministerio-de-ambiente-desarrollo-sostenible.pdf>
- Montenegro Orozco, K. T., Rojas Carpio, A. S. y Cabeza Rojas, I. (2016). *Potencial de biogás de los residuos agroindustriales generados en el departamento de Cundinamarca*. Revista ION

- National Research Council [NRC]. (2003). *Air emissions from animal feeding operations: Current knowledge, future needs*. The National Academies Press.
<https://doi.org/10.17226/10586>
- Nielsen, H. B. & Angelidaki, I. (2008). *Codigestion of Manure and Organic Wastes in Centralized Biogas Plants: Process imbalances and limitations*. Water Sci. Technol
- Olaya, Y. y González, L. O. (2009). *Fundamentos para el diseño de biodigestores*. Universidad Nacional de Colombia.
<http://www.bdigital.unal.edu.co/7967/4/luisoctaviogonzalezsalcedo.20121.pdf>
- Ortiz, D. L. P., Botero-Londoño, M. A., & Osorio-Cadavid, E. (2019). Biomasa residual pecuaria: revisión sobre la digestión anaerobia como método de producción de energía y otros subproductos. *Revista UIS Ingenierías*, 18(4), 187-198
- Parrales Ramírez, Y. A., Escalante Hernández, H. y Castro-Molano, L. P. (2019). *Co-digestión anaerobia de estiércoles bovino, porcino y equino como alternativa para mejorar el potencial energético en digestores domésticos*. *Revista ION*
- Pedraza, G., Chará, J., Conde, N., Giraldo, S. y Giraldo L. (2002). *Evaluación de los biodigestores en geomembrana y plástico de invernadero en clima medio para el tratamiento de aguas residuales de origen porcino*. *Livestock Research for Rural Development*
- Petersson, A. & Wellinger, A. (2009). *Biogas upgrading technologies – developments and innovations*. IEA Bioenergy Task 37. <https://www.ieabioenergy.com/publications/biogas-upgrading-technologies-developments-and-innovations/>
- Powers, W. (2009). *Environmental Challenges Ahead for the U.S. Dairy Industry*. Florida Dairy Production Conference. núm 46.
http://www.eenews.net/public/25/9867/features/documents/2009/02/24/document_gw_0
- Probiomasa. (2020). *Lecciones aprendidas en proyectos de biomasa y biogás en Argentina*. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca
- Reyes Aguilera, E. A. y Pérez Castellón, E. (2019). *Caracterización de las propiedades físicoquímicas de las excretas de ganado, caballo, cerdo y gallinaza para la generación de biogás*. *Revista Científica de FAREM-Estelí*
- Sánchez Marín, J. (2019). *Aprovechamiento energético y material mediante digestión anaerobia de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos que se producen en el barrio Moravia - Medellín*. Universidad de Antioquia.

<https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstreams/a6249711-8977-41a2-b61a-05ff8e83deb1/download>

- Sánchez Roque, Y. (2023). *Caracterización fisicoquímica de residuos orgánicos del estado de Chiapas, México, destinados a la producción de biogás*. Revista Politécnica, 19(37), 135-146
- Siza, L. F., Díaz Castañeda, K. D., Dueñas Moreno, A. F. y Gómez Correa, A. F. (2021). *Cadena de producción de carne porcina en Colombia*. Universidad Cooperativa de Colombia. <https://repository.ucc.edu.co/bitstreams/7899d55d-0217-4f52-992f-5392d584cb3c/download>
- Suárez, J. C. y Rincón, L. E. (2020). *Estimación del potencial energético de la biomasa pecuaria en Colombia*. Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia. 95. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.20200123>
- Tejada Guzmán, P. (2022). *Energías renovables en Colombia: avances para la transición energética*. Asociación Ambiente y Sociedad. Serie Justicia Climática. núm 3
- Unidad de Planeación Minero Energética [UPME]. (2011). *Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia*. <https://www1.upme.gov.co/siame/Paginas/atlas-del-potencial-energetico-de-la-biomasa.aspx>
- Unidad de Planeación Minero Energética [UPME]. (2022). *Plan energético nacional: Colombia 2022–2050. Transición energética justa*. Ministerio de Minas y Energía de Colombia. <https://www1.upme.gov.co/>
- Unidad de Planeación Minero Energética [UPME]. (2023). *Informe de gestión 2022–2023*. Ministerio de Minas y Energía de Colombia. <https://www1.upme.gov.co/>
- Unidad de Planificación Rural Agropecuaria [UPRA]. (2024). *Exportaciones agropecuarias de Colombia alcanzan USD 962 millones en febrero, un aumento del 12,5 %*. <https://upra.gov.co/es-co/saladeprensa/Paginas/Exportaciones-agropecuarias-de-Colombia-alcanzan-USD-962-millones-en-febrero,-un-aumento-del-12,5---.aspx>
- Velásquez, N. Y. R. (2021). Políticas y normas sobre energías renovables para el desarrollo de biogás en Colombia. Una revisión. Revista de Derecho, 56, 1-20
- XM. (2023). *Reporte Integral de Sostenibilidad, Operación y Mercado 2023*. https://www.xm.com.co/sites/default/files/documents/Reporte%20Integral%20de%20Sostenibilidad%2C%20Operaci%C3%B3n%20y%20Mercado%202023_XM.pdf

XM. (2024). *Reporte Integral de Sostenibilidad, Operación y Mercado 2024*.

<https://www.xm.com.co/reporte-integral-de-sostenibilidad-operacion-y-mercado-2024>