

Generación de biogás y estruvita a partir de residuos porcinos: Una alternativa para granjas autosostenibles en Santander¹

Mayorga García Myriam Yamile²

Ortega Tapias Emperatriz³

Angélica María Candela/ Directora⁴

Resumen

En el departamento de Santander se generan diversos tipos de residuos ganaderos; por ejemplo, los cerdos excretan en términos de su peso vivo, aproximadamente un 80% de nitrógeno y fósforo y cerca del 90% del potasio de su ración, lo cual hace del estiércol una materia prima excelente para fertilizante del suelo y otros subproductos como biogás y alimento de animales. En la actualidad, se hace indispensable buscar alternativas energéticas amigables con el medio ambiente que permitan disminuir la huella de carbono con respecto a la producción de energía fósil, eléctrica, etc.; y que al mismo tiempo aprovechen los residuos porcinos que no generan valor agregado ni beneficios económicos. Sin embargo, existe desconocimiento de las diferentes estrategias de Digestión Anaerobia (DA) que permiten la valorización de las excretas porcinas en la región. Para ello se analizaron alternativas como los sistemas de Digestión y CoDigestión Anaerobia (CoDA) que permitan aprovechar los residuos porcinos generados en el departamento de Santander y que beneficiarían a las familias del sector rural, mediante granjas autosostenibles energéticamente. Por tanto, se identificaron las metodologías y paquetes tecnológicos que maximizan el rendimiento en los sistemas DA en la agroindustria porcícola utilizadas a nivel mundial, y así evaluar la factibilidad de su desarrollo en el departamento de Santander. Para tal fin se consultaron diferentes documentos usando motores de búsqueda en donde se incluyeron términos como: digestión, codigestión, digestores anaerobios, residuos porcinos, biogás. Finalmente se evaluaron los factores más importantes que influyen en la implementación de un paquete tecnológico de los sistemas de biodigestión anaeróbica optimizado a partir de los residuos disponibles en la región mediante una Matriz de decisión. Como resultado se seleccionó el sistema de codigestión anaerobia de estiércol porcino con bagazo de caña panelera en un biodigestor tipo bolsa bajo condiciones de operación aproximadas de: $T=25^{\circ}\text{C}$, $\text{pH}=6,5$, $\text{C/N}=24$, con un rango de 80-95% SV para generación de biogás y fertilizante.

Palabras claves: co-digestión, anaerobia, residuos porcinos, biogás, biorrefinería.

Generation of biogas and struvite from pig waste: An alternative for self-sustainable farms in Santander

Abstract

Various types of livestock waste are generated in the department of Santander; for example, pigs excrete in terms of their live weight about 80% nitrogen and phosphorus and about 90% potassium from their ration, making manure an excellent raw material for soil fertilizer and other by-products such as biogas and animal feed. At present, it is essential to look for environmentally friendly energy alternatives that allow reducing the carbon footprint with respect to the production of fossil energy, electricity, etc.; and at the same time take advantage of pig waste that does not generate added value or economic benefits. However, there is ignorance of the different strategies of Anaerobic Digestion (DA) that allow the

¹ Artículo científico presentado como opción de grado para optar por el título de maestría en ciencias y tecnologías ambientales.

² Química, Esp. Evaluación y Gerencia de Proyectos, Universidad Industrial de Santander. Mag. Ciencias y Tecnologías Ambientales, Universidad Santo Tomás, myriam.mayorga01@ustabuca.edu.co

³ Ingeniera Química, Universidad América. Esp. Química ambiental, Universidad Industrial de Santander. Mag. Ciencias y Tecnologías Ambientales, Universidad Santo Tomás, emperatriz.ortega@ustabuca.edu.co

⁴ Universidad Industrial de Santander. Mag. Experimentación Química, Máster en Ciencias y Tecnologías Químicas, PhD. en Ciencias. Angelica.candela01@ustabuca.edu.co

valorization of porcine excreta in the region. To this end, alternatives such as Anaerobic Digestion and Co-Digestion (CoAD) systems were analyzed to take advantage of the pig waste generated in the department of Santander and that would benefit families in the rural sector, through self-sustainable energy farms. Therefore, the methodologies and technological packages that maximize the performance in the AD systems in the pig agroindustry used worldwide were identified, and thus evaluate the feasibility of their development in the department of Santander. For this purpose, different documents were consulted using search engines where terms such as digestion, codigestion, anaerobic digesters, porcine waste, biogas were included. Finally, the most important factors that influence the implementation of a technological package of anaerobic biodigestion systems optimized from the residues available in the region were evaluated through a Decision Matrix. As a result, the anaerobic co-digestion system of pig manure with sugarcane bagasse was selected in a bag-type biodigester under approximate operating conditions of: $T=25^{\circ}\text{C}$, $\text{pH}=6.5$, $\text{C/N}=24$, with 80% -95% SV for biogas and fertilizer generation.

Keywords: Co-digestion, Anaerobic, Pig Waste, Biogas, Biorefinery

Introducción

En la actualidad el mundo es un gran consumidor de combustibles fósiles para la generación de energía, lo cual incide en el aumento de emisiones de Gases Efecto Invernadero (GEI), pero a su vez se convierte en un desafío científico global en la búsqueda de recursos energéticos que sean renovables, verdes y sostenibles bajo un ámbito económico y tecnológico.

Mundialmente existen muchas actividades económicas, entre ellas una de las industrias más importantes es la crianza de animales (vacunos, porcinos, cuyes, etc.), que generan un volumen importante de material fecal o estiércol, el cual ha sido objeto de estudio a lo largo de los años para su empleo como materia prima. (España Q., 2018) Caso específico es la producción de cerdo siendo China el mayor productor mundial de carne de cerdo, superando los 50 millones de toneladas que equivalen a un 46%, seguida de la Unión Europea, con un poco más del 20%, Estados Unidos con un 11% aproximadamente y el mayor productor de América Latina, Brasil con un 4% de la producción mundial (Cubillos, 2022).

En Colombia el volumen de carne en canal y el número de cerdos sacrificados ha venido aumentando significativamente pasando de 350 mil toneladas aproximadamente en el año 2017 a 450 mil toneladas en el año 2021, con 1039 municipios productores a nivel nacional con presencia en 32 departamentos, siendo el departamento de Antioquia el que presentó mayor producción de carne en canal en el año 2021, seguido de Caldas, Tolima, Valle del Cauca y Quindío. Se espera que la producción de carne de cerdo crezca cerca de 8%, impulsada por las mejoras en la crianza de animales y la mayor intensificación de los sistemas de producción. (AGROSAVIA, 2023).

El crecimiento de este tipo de mercado contribuye directamente al aumento de estiércol, que está ligado a la contaminación de agua, suelo, malos olores, insalubridad y sanciones por incumplimiento de la normativa respecto a la disposición de estos residuos; siendo considerado el sector porcícola una de las principales fuentes de emisión de GEI como el metano y el óxido nitroso. Este impacto ambiental, se debe a que el 80% de los predios son granjas de traspatio o pequeños sistemas de producción de emprendimiento familiar y que solo el 20% son granjas tecnificadas que concentran alrededor del 90% de la producción porcícola nacional. Por tanto, investigadores proponen que los residuos generados se reutilicen para la producción de energía

renovable y fertilizantes para las propias granjas, llegando a reducir así la contaminación ambiental y mejorando la producción y eficiencia de las plantas. (DIARIO, 2022)

En la Imagen 1 se muestra el proceso de obtención de combustible a partir de la biomasa residual, el cual se caracteriza por ser un ciclo cerrado. Esto es una gran ventaja en lugar de utilizar como fuente los hidrocarburos ya que la biomasa no modifica la cantidad de CO_2 de la atmósfera. Si bien, existen otros subproductos que forman parte de los ingredientes de una lluvia ácida (óxidos de azufre, por ejemplo), las cantidades liberadas en el proceso de conversión no son para nada significativas como para ser causantes de ese efecto (González J., 2010)

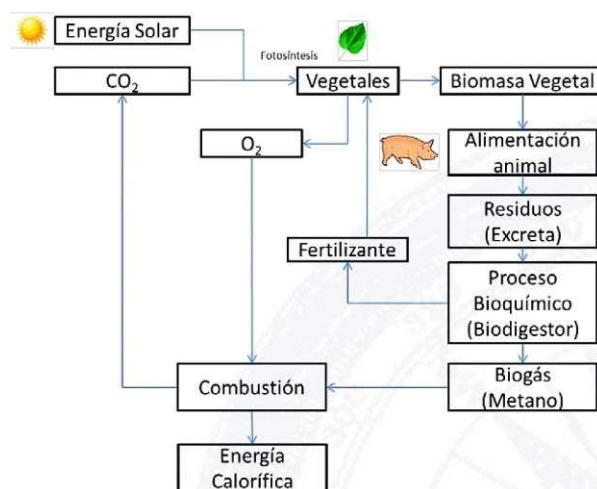


Imagen 1. Ciclo de Carbono resumido en un proceso de extracción de energía de biomasa animal.

Fuente: González J., 2010

En algunos casos en los que se implementan tecnologías de sistemas de Digestión Anaerobia (DA), éstas se abandonan ya sea por desconocimiento técnico adecuado en el proceso o por poco acceso a los servicios básicos como agua, gas y energía que presentan las zonas rurales en Santander. Sin embargo, la disponibilidad de la porcina y demás residuos resultantes de la actividad porcícola, con su alto poder calorífico, el país tiene una gran oportunidad de aprovechar y generar biogás a pequeña y mediana escala para el beneficio de muchos; ya que se estimó el potencial energético de la biomasa residual porcina en Colombia de 4308,46 TJ/año con una producción de 2.803.111 Ton/año, según la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME, 2017) (PorkColombia & Minambiente, 2020)

El potencial energético de un sustrato determinado depende de su contenido de sólidos volátiles (SV), y de la manera en que se desarrolle el proceso de digestión. Para el caso de la biomasa generada en las granjas porcícolas, el potencial energético varía, dependiendo de si se utiliza estiércol sólido, estiércol líquido (principalmente orina), o una mezcla de estiércol, orina y agua de lavado (porcino). Se calcula que una tonelada de estiércol de cerdo puede generar hasta 60 m^3 de biogás, mientras que una tonelada de purín puede generar 36 m^3 de biogás y una tonelada de estiércol líquido (orina) sólo 25 m^3 de biogás (PorkColombia & Minambiente, 2020)

Por consiguiente, con esta publicación se pretende dar a conocer las mejores alternativas que existen para maximizar el rendimiento y productos de valor agregado en los sistemas de DA a partir de residuos porcícolas, mediante el análisis de referentes bibliográficos que brinden información sobre las condiciones y productos generados, optimizando paquetes tecnológicos y su integración en el modelo de negocios familiares agrícolas en el departamento de Santander,

propendiendo por la integración de las corrientes generadas en nuevos procesos agroindustriales para aumentar el valor agregado de productos agrícolas en las fincas; lo cual conlleva a dar respuesta a la siguiente pregunta problema: *¿Cuál es el paquete tecnológico de digestión anaerobia que se requiere para la producción de biogás y fertilizante en las granjas porcinas como modelo de negocio familiar en el departamento de Santander?*

Metodología del análisis y recolección de datos

Mediante el uso de la estrategia PICO (Cuadro 1), se recurrió a la ecuación de búsqueda la cual permite obtener información confiable de base de datos, artículos y boletines científicos, entre otros; orientando así a la construcción de la pregunta de investigación y la búsqueda bibliográfica a través de la identificación de variables que definen la ecuación para visualizar el estado actual del tema de investigación y las tendencias sobre el aprovechamiento de los residuos porcinos.

Cuadro 1. Estrategia de búsqueda PICO

Etapa 1		Aprovechamiento de residuos porcinos	
Etapa 2	Problema de estudio	P: Población	Residuos porcinos
		I: Intervención	Digestión y Co-Digestión Anaerobia
		C: Control	Paquetes tecnológicos
		O: Outcome (Resultado)	Rendimiento de los sistemas de Digestión y Co-Digestión Anaerobia
Etapa 3	Planteamiento de búsqueda por variables	P: Población	Residuos porcinos, estiércol de cerdo.
		I: Intervención	Digestión Anaerobia, Co-Digestión Anaerobia, Bio-refinería
		C: Control	Tecnologías para la producción de biogás y fertilizante
		O: Outcome (Resultado)	Rendimiento de los sistemas de Digestión y Co-Digestión anaerobia
Etapa 4	Clave de búsqueda avanzada	("Waste swine" OR "swine manure") AND ("anaerobic digestion" OR "anaerobic co-digestion") AND ("biogas production" OR "fertilizer production")	

Fuente: Bergin SM, Wraight P. Silver

Se utilizó la base de datos SCOPUS (Elsevier, B.V., 2023) por su confiabilidad y fácil acceso. La ecuación de búsqueda TITLE-ABS-KEY (*"Waste swine" OR "swine manure"*) AND (*"anaerobic digestion" OR "anaerobic co-digestion"*) AND (*"biogas production" OR "fertilizer production"*) arrojó un total de 187 documentos. Estos documentos se limitaron a los artículos mostrados en los últimos diez años (2013-2023), quedando un total de 110 documentos, los cuales se analizaron teniendo en cuenta los aportes más significativos como el tipo de sistema (Digestión Anaerobia y Codigestión Anaerobia), productos (biogás y fertilizante) y los sustratos disponibles en dichas regiones reconociendo así los mejores parámetros de operación.

Finalmente, se clasificaron los paquetes tecnológicos y se evaluaron para definir aquellos que presentan ventajas como bajo costo y mejores condiciones de operación para la producción de biogás, con el fin que se implementen en granjas del departamento de Santander como opciones de autosostenibilidad. Además, se recolectó información de Google Scholar y páginas web sobre indicadores relacionados con la producción y el potencial energético de la biomasa residual porcina a nivel nacional y departamental, donde la caracterización de la biomasa residual permitió evaluar las condiciones operativas con respecto al biodigestor y la producción de biogás.

Resultados y Discusión

- Digestión Anaerobia (DA).** Para dimensionar un paquete tecnológico autosostenible, es necesario comprender los fundamentos en DA, también conocida como metanización o producción de biogás; que se caracteriza por la degradación de la materia orgánica mediante la acción de un conjunto de microorganismos en ausencia de oxígeno. Como resultado final del desarrollo de este proceso se obtiene por un lado el biogás, que es la mezcla de dióxido de carbono (30-40%), y metano (60-70%) con trazas de otros elementos; y por otro lado, un efluente rico en componentes fertilizantes (N, P, K), que generalmente recibe el nombre de digestato o biol. La producción de metano es la parte fundamental del proceso por su alto valor energético; por tanto, el proceso controlado de DA es uno de los más idóneos para el aprovechamiento energético de los residuos orgánicos. (Fernández, 2016)

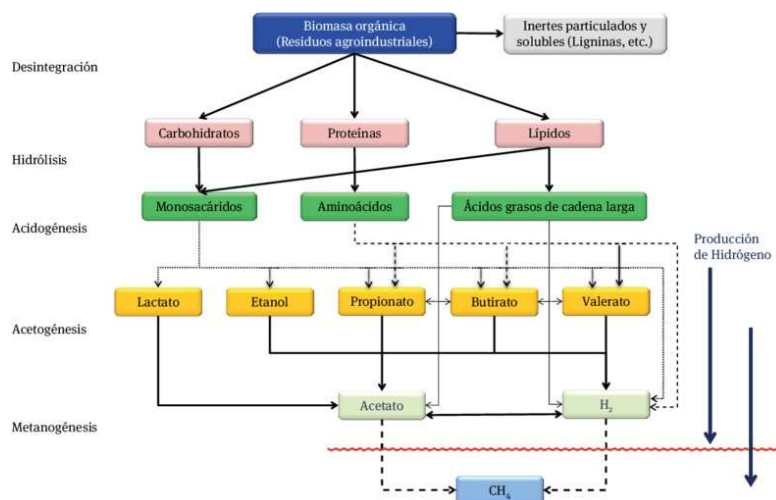


Imagen 2. Esquema de la Digestión Anaerobia de Materia Orgánica Fuente: Tomado de (Álvarez V. et al., 2019)

La Imagen 2 representa los componentes del proceso DA a través de las distintas fases. Según la fase del proceso (*hidrólisis - acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis*), las condiciones bacterianas se ven afectadas por parámetros ambientales que influyen en la DA como el pH y alcalinidad, el potencial redox, el requerimiento de Nutrientes (Relación Carbono/Nitrógeno), presencia de tóxicos e inhibidores; y también por parámetros operacionales o de funcionamiento como: temperatura, agitación, tiempo de retención hidráulico (TRH), y velocidad de carga orgánica (VCO). De hecho, muchas de las reacciones ocurren simultáneamente sin una separación clara de fases, por lo que deben coordinarse entre sí de la mejor manera posible para asegurar que el proceso en conjunto se desarrolle sin problemas. (Fernández, 2016)

La Digestión Anaerobia (DA) es una tecnología que presenta ventajas sobre otros tratamientos de residuos orgánicos y procesos bioenergéticos. Asimismo, la Codigestión Anaeróbica (CoDA) consiste en la digestión de una mezcla de dos o más sustratos con características complementarias, de modo que la producción de biogás se mejora a través de sustrato conjunto y en comparación con la monodigestión, la codigestión anaerobia ofrece varias ventajas como la mejora del equilibrio de nutrientes y la relación C/N, la mitigación de efectos inhibitorios debido a sustancias tóxicas a través de la dilución y la mejora cinética de la producción de metano. (Hagos et al., 2017)

- **Caracterización del Sustrato – Producción de biogás.** Los procesos de digestión anaerobia pueden ser húmedos o secos, dependiendo del contenido de Sólidos Totales (ST), el cual estima el porcentaje de materia seca que hay en un sustrato después de remover toda el agua que este contenga por medio de un proceso de evaporación. Los ST están conformados a su vez por los sólidos inertes (SI) y los sólidos orgánicos (SO), siendo estos últimos, los sólidos degradables, también conocidos como sólidos volátiles (SV), y los que así serán utilizados por las bacterias como fuente de alimento durante todo el proceso de fermentación anaerobia (Martí H., 2019). La Tabla 1 muestra algunas características que se deben tener en cuenta para producir un biogás de calidad.

% ST ¹	Relación Estiércol/Agua ²	pH ³	Fermentación Mesofílica (°C) ⁴			Fracción de Metano ⁵	Rendimiento de Biogás ⁶
15-49	1:4 (1 kg estiércol: 4 litros de agua)	6.5 – 7.5	Mínima 15 – 20	Óptima 25 – 35	Máxima 35 – 45	60%	120 – 450 m ³ /t SV

Fuente: Tomado Guía de Biogás para el Sector Porcícola en Colombia, 2020. (31-41). 1,4 (FAO, 2011); 2,3 (Martí Herrero, J, 2019); 5,6 (GIZ, MINENERGÍA, 2012)

Según estudios internacionales (Fernández, 2016), se diseñó y se estudió un sistema de generación de biogás mediante Codigestión Anaerobia capaz de tratar de manera centralizada los purines de la comarca agraria de la Sierra de Cádiz, usando como sustrato purines (lechones, cerdas, cerdos de cebo) codigeridos con glicerina, y bajo las siguientes condiciones de operación: 86.18 t residuo/día, purín de la mezcla (96%) 82,73 t /día, cosustrato glicerina (4%)

3.45 t/día, agua: 91.76 %, ST: 82.40%, SV:68.00%. Se encontró que esta mezcla genera 53.04 Nm³ CH₄/t. la temperatura media del fluido de entrada y salida del biodigestor es de 22.5°C en un reactor de mezcla continuo.

Un sistema de digestión anaerobia utilizando aguas residuales porcinas con las siguientes características: pH entre 6.5 -7.5, DQO total (g/L) 6.0 – 50, DQO soluble (g/L) 4.2 – 21.8, DBO (g/L) 5.1 – 15.6, N-total (g/L) 2.1 – 4.8, N-HN⁺4 (g/L) 1.2 – 3.3, P-total (g/L) 1.5 – 4.3, ST (g/L) 8.5 – 53.9, SST (g/L) 8.2 – 42.5 y SSV (g/L) 2.5 – 31.9; dio como resultado un efluente que condujo el biogás hasta un motogenerador de electricidad, que potencialmente puede producir hasta 43.200 kW-h si se mantiene en operación constante durante un mes (Álvarez V. et al., 2019)

La producción de biogás a partir de estiércol bovino, relación 1:1 (estiércol, agua) es de 44,7 L y a partir de estiércol porcino, en la misma relación es de 60, 2 L; revelando que el estiércol porcino realiza la producción de biogás a los 20 días de retención; y la mezcla de estiércol bovino con porcino a una temperatura aproximada de 14,4°C, con tiempo de retención de 30 días, generó una producción de biogás de 57,35 L de buena calidad, lo cual demuestra la importancia de los sustratos en un sistema de CoDA. (Villanueva et al., 2019)

Según (L., M. Martínez, 2015) argumenta que el ganado porcino produce 4 kg de estiércol fresco por día por cabeza, por lo que cada cerdo es capaz de producir 0,33 m³ de biogás útil diario. La temperatura incidió significativamente siendo una de las ventajas del proceso, ya que el estudio se realizó bajo un clima tropical entre 22°C y 35°C, con un tiempo de digestión aproximadamente de 20 días, para una producción total de estiércol de 360 kg.

El sustrato comprende productos de origen tanto animal como vegetal que se producen en cualquier proceso agroindustrial, agropecuario o agrícola. Un estudio demuestra que el tratamiento en dos etapas de la fracción orgánica de residuos sólidos (FORSU) por codigestión anaerobia húmeda con un 25% de estiércol vacuno es viable. Para una producción de 0,06 kg/hab.-día con un contenido de sólidos totales de 30,9 ± 5,3%, de los cuales el 81,7 ± 0,6 % son

sólidos volátiles; en el reactor de lote alcanzó una remoción de sólidos volátiles del 44,1 % mientras que en el reactor UASB removió un 81,2 % de DQO, dando en 60 días una productividad total estimada de $5,37 \text{ L}_{\text{CH}_4} \cdot \text{kg}_{\text{SV}}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ (Benítez Fonseca et al., 2020)



Imagen 3. Cultivos con Potencial Agrícola en Santander

Fuente: Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural y Sociedad de Agricultores de Colombia (2021)

En la Imagen 3 se destaca una alta producción de caña panelera en Santander y es uno de los cultivos que tiene mayor importancia socioeconómica en Colombia, ya que es el segundo productor de panela a nivel mundial después de la India (FAO, 2007). A nivel nacional, la disponibilidad de la biomasa residual en el sector agrícola se estimó con respecto a la producción del producto principal, destacándose en Santander la palma de aceite (200.180,0 t/año) y la caña panelera (226.294,0 t/año) (RAPE, 2020, pág.31). El bagazo es considerado como el residuo fibroso obtenido en el proceso de la extracción de azúcar de la caña por medio de molinos o trapiches, lo cual representa entre el 25% y 40% del total de la caña que se procesa y corresponde a cuatro fracciones: fibra (45%), sólidos insolubles (2-3%), sólidos solubles (2-3%) y agua (50%). (Vanegas S., 2016)

La evaluación del tipo de residuo comprende las especies más representativas de una región, donde la biomasa residual según sus características fisicoquímicas determine una producción de biogás con alto potencial. Estudios demuestran que la evaluación del potencial de residuos orgánicos (fracción orgánica de residuos sólidos municipales, estiércol porcino, cascarilla y mazorca de cacao, residuos de la industria de bebidas de frutas embotelladas y rastrojos de arroz) de diferentes sectores productivos en Colombia, reportó una producción específica acumulada de gas alrededor de $497 \text{ ml CH}_4/\text{g VS}$, obteniendo la mejor en términos de producción de biogás la que contiene cacao, frutas y estiércol porcino ($\text{C/N} = 24$) (Cabeza et al., 2016)

El municipio de Páramo en el departamento de Santander se caracteriza por sus actividades agrícolas y pecuarias; por tanto, el aprovechamiento de los subproductos de café y los desechos porcinos ha sido objeto de estudio por parte de estudiantes de la Universidad Libre de Colombia. La Tabla 2 muestra la alta producción de biogás a partir del estiércol porcino y la codigestión de estiércol porcino y desechos de café en una relación 70:30 fue la mejor. La Tabla 3 estratifica la cantidad de predios y el total de cerdos en el departamento de Santander como un referente importante para este estudio.

Tabla 2. Análisis Comparativo en la producción de biogás a partir de dos sustratos

Tipo de producto para carga	Temperatura (°C)	Tiempo de Retención (días)	Carga Diaria (kg)	Biogás producido (litros)
Desechos de Café (vegetal)	20	37	5.67	141.75
Estiércol Porcino (animal)	20	37	5.67	289.17
Mezcla 50% animal, 50% vegetal	20	37	5.67	215.84
Mezcla 70% animal, 30% vegetal	20	37	5.67	244.97
Mezcla 70% vegetal, 30% animal	20	37	5.67	185.95

Fuente: (Chacón B. & Rodríguez C., 2021)

Tabla 3. Población Porcina Nacional por Estrato Productivo según Categoría 2023

	Estrato	Total, Predios	Hembras Cría	Hembras Reemplazo	Machos Productores	Porcino Levante y Ceba	Total, Cerdos
Departamento de Santander	Traspatio	793	504	305	133	6212	7154
	Comercial Familiar	724	2622	742	558	27110	31032
	Comercial Industrial	246	5018	751	491	101678	107938
	Producción Tecnificada	7	1122	152	25	25491	26790
	Total	1770	9266	1950	1207	160491	172914

Fuente: <https://www.ica.gov.co/areas/pecuaria/servicios/epidemiologia-veterinaria/censos-2016/censo-2018>

- **Factores que influyen en el proceso de biodigestión.** Existen diversos factores que afectan el proceso de biodigestión anaerobia como la *temperatura*, el *pH*, el *sustrato* y los *tiempos de retención*; ya que el sustrato o la materia orgánica (MO) a utilizar no sólo se relaciona con la cantidad de metano obtenido sino también con la calidad del biogás producido. (Sidartha, 2020) En efecto, se pueden estimar diversos parámetros para cada tipode sustrato, indicando qué tan apto resulta ser para la generación de biogás.

El incremento de la temperatura de 35°C a 50°C en un reactor donde se mantuvo en fase termófila durante 32 días (etapa de transición) impactó la producción de gas y la diversidad microbiana, obteniendo una baja producción de metano. Por tanto, la regulación de la temperatura como estrategia operativa es importante en la activación de microorganismos y la aceleración de la bioconversión de residuos de biomasa durante la digestión anaeróbica. Para aplicaciones industriales, el régimen de temperatura adecuado debe considerar el tiempo de adaptación microbiana para reconstruir una red estable y funcional en AD (Lv et al., 2022)

La mayoría de los compuestos orgánicos solubles limitan la velocidad en la acetogénesis y metanogénesis en comparación con la acidogénesis. Sin embargo, la hidrólisis es la reacción más lenta para materiales recalcitrantes a la degradación, como la biomasa lignocelulósica. Unaforma común de mejorar la eficiencia de la digestión de estos materiales es con un pretratamiento para convertir el sustrato inicial en compuestos solubles; lo que puede resultar en la acumulaciónde ácidos grasos volátiles (AGV), caída del pH, e incluso la pronta terminación de la reacción. (Venkiteshwaran, 2016) La transferencia directa de electrones (DIET) entre especies ha sido reconocida como un medio más rápido y estable para transportar equivalentes reductores entre bacterias y arqueas, demostrando un gran potencial para mejorar los pasos limitantes de la velocidad durante la DA (Wang et al., 2021)

Según las características fisicoquímicas se determina que la caña de azúcar puede ser utilizada para la digestión anaerobia, ya que los resultados obtenidos de 91.40% de SV y 19.43%

de ST se encuentran en el rango establecido. Cabe resaltar que la variación de la producción debiogás utilizando como cosustrato residuos de caña de azúcar es muy similar a la registrada consolo excretas porcinas, dando resultados efectivos para una completa funcionalidad de la finca Fundo Bonito en Puerto Gaitán–Meta, utilizando el biogás producido no solo para la cocción de alimentos sino también para consumo mismo de los propietarios del predio. (Sánchez N., 2021)

- **Potencial de biogás (PB).** Una de las formas para determinar el PB es usando referentes bibliográficos que estiman el potencial bioquímico de metanización a partir del análisis composicional que se quiere evaluar: sólidos totales (ST) y/o sólidos volátiles (SV), composición elemental (C, O, H, N), composición de fracciones orgánicas (grasas y aceites, lignina, proteínas y carbohidratos), entre otros. Según ejemplo tomado de (PorkColombia & Minambiente, 2020), inicialmente se debe conocer el inventario de la granja y el peso promedio por grupo etéreo, como se observa en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Ejemplo para la determinación del potencial de biogás

Grupo Etéreo	Número de Animales	Peso promedio=peso salida-peso entrada (kg)
Lechones lactantes	80	6 – 1 = 5
Precebo	180	30 – 6 = 24
Levante	90	65 – 30 = 35
Ceba	90	110 – 65 = 45
Hembras de reemplazo	18	180 – 60 = 120
Hembras de cría	22	250*
Machos	1	300 – 60 = 240

*Se considera peso promedio de las hembras en gestación y en lactancia

Según los datos dados y teniendo en cuenta que una unidad animal (UA) equivale a 113,7 kg de peso vivo, mediante ecuaciones se determina: Masa ganadera (M)=19.820 kg, UA=174,32 y Porcinaza generada=3.312 ton/año. Se considera que cada animal genera 19 ton/año y que la porcinaza tiene un 6% de materia seca (MS), además de un 80% de SV y 20% de cenizas, se calculan los sólidos volátiles (SV) de la granja dando un resultado de 158,98 ton/año. La cantidad de biogás (B) que se produce a partir de los (SV) calculados para esa cantidad de porcinaza es de 63.592 m³, de los cuales 38.155 m³ son de metano (CH₄). Lo equivalente a 104.5 m³ al día de metano, si la digestión anaerobia se lleva a cabo en un *biodigestor de flujo continuo*, dimensionado y operado correctamente. (PorkColombia & Minambiente, 2020)

(Álvarez V. et al., 2019) estimó el potencial de producción de metano (PPM), su equivalente a diésel y electricidad considerando la capacidad instalada de crianza de cerdos en Sonora – México, encontrando los siguientes parámetros: estiércol porcino=3.5 kg/día, capacidad instalada en granjas=1591891 cerdos, cantidad total de residuos base húmeda=5571618 kg/día, cantidad total de residuos base seca=557161 kg/día, PPB=139290 kg/día de biogás, PPM=83574 kg/día, un volumen de metano=127638 m³/día, este metano equivale a 49.395 L/día de diésel y un potencial de producción de electricidad de 525216 kWh.

Una investigación en Santander, evaluó el potencial de biometanización (PBM) y la sinergia (Φ) en mezclas de diluciones de estiércol bovino, equino y porcino. Los resultados demostraron que en el proceso de mono-digestión, los potenciales de biometanización en volumen de gas a condiciones normales fueron 10.44 N l CH₄/kg sv; 14.50 N l CH₄/kg sv; y 17.09 N l CH₄/kg sv para el estiércol bovino, porcino y equino respectivamente. Las mezclas que contenían estiércol equino presentaron el mejor potencial energético (mezcla equino porcino) y el efecto sinérgico más alto (mezcla equino bovino). A partir del potencial energético, los usuarios de los biodigestores domésticos podrán disponer de diferentes escenarios de codigestión de mezclas de estiércoles, para un mejor rendimiento en la producción de biogás. (Castro M. et al., 2019)

El principal objetivo de la codigestión en el proceso de digestión anaeróbica es mejorar su eficiencia. También muestra algunas ventajas obvias que incluyen: efecto sinérgico de los microorganismos; dilución de compuestos tóxicos potenciales; superar las posibles deficiencias de la digestión anaeróbica que se realizan cuando se utilizan como monosustratos; mayor carga de materia orgánica biodegradable; y, en consecuencia, acelerar el proceso y aumentar los rendimientos de biogás. (Abudi et al., 2020)

El alto contenido de metales pesados en el estiércol de cerdo puede inhibir la producción de biogás y aumentar el riesgo de contaminación ambiental. Un estudio revela que la paja de arroz cruda y pretratada es un excelente sustrato de codigestión y adsorbente natural. Durante la digestión anaeróbica, la adición de paja de arroz fue beneficiosa para la producción de biogás y la pasivación de metales pesados, pero se debe estudiar el contenido de metales pesados en los sustratos y el costo del pretratamiento. Los metales pesados fueron los primeros en transformarse en una fase sólida a través de la adsorción y fueron pasivados durante el período pico de producción de biogás. La digestión anaeróbica podría alterar las fracciones de metales pesados en un solo sistema (estiércol porcino) y en la codigestión de paja y estiércol, que se ve afectada por el pH, la temperatura y el tiempo de retención hidráulica. (Xiang et al., 2021)

La codigestión anaeróbica por lotes de hojas de mango (ML) y estiércol de cerdo (PM) a 37°C con cinco relaciones ML:PM diferentes (1:0, 3:1, 1:1, 1:3 y 0:1) fueron evaluados por primera vez utilizando cinco modelos cinéticos diferentes (cinético de primer orden, cono, Gompertz modificado, logístico y de transferencia) siendo el modelo de cono el que se ajustó mejor a la evolución real del metano. Los resultados de producción de metano demostraron que la adición de PM mejoró mucho la producción de metano de ML. La relación 1:3 (ML:PM) fue la mezcla óptima, cuya producción de metano fueron de 196, 37, 24 y 66%, superior a las de otras proporciones de mezcla (1:0, 3:1, 1:1 y 0:1), respectivamente. Estos resultados verificaron que la codigestión de ML y PM es un proceso prometedor en la aplicación práctica tanto para la producción de energía renovable como para la mejora del medio ambiente. (Abudi et al., 2020)

Según estudios realizados en la Costa de México, se evaluó el efecto sinérgico de la codigestión de biomasa de sargazo (S) con estiércol porcino (PM) en términos de alcanzar el máximo potencial de biometano (BMP) mediante cinco proporciones diferentes (100S-0PM, 65S-35PM, 50S-50PM, 30S-70PM y 0S-100PM). Los resultados mostraron un efecto sinérgico significativo de la codigestión en la mejora de BMP de 79,5% a 160,4% con respecto a los tratamientos de monodigestión. El BMP más alto fue de 441.47 ml CH₄·gramo⁻¹ VS en el tratamiento 50S-50PM, el cual registró una relación C/N de 16:8. Este estudio demostró que la codigestión de biomasa de sargazo con estiércol de cerdo tiene el potencial para el manejo sostenible de ambos residuos y también facilitó un aumento en el rendimiento de metano. (Rivera-Hernández et al., 2022)

El Centro de Innovación y Desarrollo Tecnológico del Sector Eléctrico (CIDET, 2019) estima que el potencial técnico aprovechable corresponde al 26% de la demanda nacional de gas natural con respecto a datos del Balance Energético Colombiano. Las biomásas con mayor potencial de aprovechamiento son: *vinaza de caña de azúcar, avícola, palma de aceite, residuos sólidos urbanos orgánicos y porcícola*; la ganadería tiene el mayor potencial teórico (71.771 TJ/año), sin embargo, debido a que en el país se practica la ganadería extensiva, esto dificulta la recolección.

- **Biodigestores familiares.** Un biodigestor de bajo costo es un sistema sencillo y accesible que incide positivamente en varios aspectos sobre la vida familiar, económica y productiva de los pequeños y medianos productores. Un predio familiar que disponga diariamente de 20 kilos de estiércol fresco con acceso a agua, aunque no sea potable, durante la mayor parte

del año, puede construir un biodigestor de bajo costo obteniendo: biogás para cocinar, iluminar y calentar; biofertilizante natural y gratuito que mejora el rendimiento de los cultivos hasta un 30%; salud para toda la familia; higiene, eliminando olores e infecciones; beneficio ecológico y tecnología sostenible. (RedBioLAC, 2020)

En Colombia las granjas porcícolas se dividen en dos procesos principales el proceso de cría (hasta un peso aproximado de 30 kg) y el de ceba (levante y engorde hasta un peso de 110 a 125 kg. (Piñeiro N. & Bermejo M., 2015) El ciclo productivo es muy importante a la hora de evaluar el biodigestor, ya que la biomasa residual que se obtiene en las granjas porcícolas se debe al manejo dado en las distintas granjas, como lo es el lavado, el tipo de material que se usa como cama o el tipo de alimento del cerdo. También se debe a los procesos que se realizan en la granja, ya que hay granjas donde solo se dedican a la etapa de cría del cerdo, otras se dedican solo a la etapa del cebo y otras que son mixtas donde se manejan ambos procesos juntos o por separado obteniendo dos tipos de porcínaza. (Patarroyo M., 2022)

El proceso de biodigestión requiere de características como: ubicación y tamaño, composición de la biomasa, temperatura, continuidad de producción, utilidad, cogeneración de calor, incluyendo la eliminación de agua y otras partículas inherentes al proceso (Sierra G. et al., 2017). El tiempo de permanencia depende también de las características del sustrato y del contenedor. La temperatura de la región donde se instale el biodigestor influye inversamente proporcional al tiempo de retención, que se asimila con el tiempo que tarda la carga diaria en cruzar el biodigestor hasta ser evacuado. (Martí H., 2019) Es primordial mantener un microclima cálido en el biodigestor, por lo cual una estrategia para aumentar la temperatura y mantenerla constante es la construcción de una estructura liviana forrada con plástico de invernadero, que también restringe el acceso de animales que puedan dañarlo. (Rivas S. et al., 2010)

La importancia de abordar el análisis comparativo de la producción de biogás a partir de biodigestores alimentados con desechos orgánicos como el estiércol porcino y desechos del café como la pulpa, radica en que estos sectores están presentes en la región y son efectivos para el aprovechamiento de los residuos y la generación del propio combustible para el uso de los agricultores en sus viviendas, además de disminuir con esta tecnología, la inadecuada disposición de dichos residuos. (Chacón B. & Rodríguez C., 2021) En procesos de codigestión para calcular el sustrato principal, se debe considerar el biogás producido por el estiércol animal, ya que como residuo entrante líquido sirve como medio de transporte de los cosustratos, por lo que la cantidad de biogás/kg de estiércol fresco depende básicamente de su composición (%SV) y de la producción del biogás introducido en el digestor/Kg SV. (Daniel & Aldana, 2017)

Uno de los más reconocidos casos de éxito en la implementación de biodigestores, es el reportado por el sector porcícola, con Aliar - La Fazenda en Puerto Gaitán (Meta), donde con la instalación de 4 biodigestores de flujo continuo, alimentados con los residuos de cerca de 72.800 cerdos de ceba, se generan 136.528 metros cúbicos de biogás al día, que pueden ser utilizados para la generación eléctrica (Universidad Nacional de Colombia & TECSOL, 2018). Para pequeñas comunidades, explotaciones pecuarias o agroindustriales, se recomienda el biodigestor de flujo continuo de balón o bolsa. (CEPAL., 2019) Este biodigestor es colocado en la superficie o en una fosa, según el tamaño y es útil para tratar en promedio 130 kg de desechos diarios. (Chaput, 2007)

- **Estruvita.** Los purines de cerdo tienen elevado contenido en nitrógeno (N) y fósforo (P) y pueden ser recuperados en forma de estruvita ($\text{NH}_4\text{MgPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), que es un mineral fácil de esparcir con un alto contenido de fósforo y puede producirse con una mínima contaminación. A través de un proceso de precipitación controlado, se pueden producir gránulos de estruvita para su uso agrícola como un fertilizante de fosfato de amonio y magnesio. (Tortajada C., 2021). El digestato obtenido en el proceso DA contiene un efluente rico en N y P que se elimina del reactor después de la recuperación del biogás. (Corona E., 2020). El digestato se almacena en contenedores y es un producto de excelente calidad como fertilizante vegetal con un alto contenido de macronutrientes para las plantas que incluyen N, P, K y S, y diversos micronutrientes además de materia orgánica. (Drosg et al., 2015)

El digestato se puede aprovechar aplicándolo directamente a la tierra, o separándolo en una fracción sólida que se somete a un proceso de compostaje y una fracción líquida que contiene gran cantidad de nutrientes, nitrógeno y fósforo principalmente, la cual se utiliza en actividades agrícolas como fertilizante orgánico. (Marroquín M., 2018). Sin embargo, son varias las tecnologías de recuperación de nutrientes que han surgido y que en algunos de los casos están en fase de desarrollo, entre las que destacan las de recuperación de nitrógeno mediante desorción o *stripping* y las de recuperación conjunta de nitrógeno y fósforo como estruvita. (Hidalgo et al., 2017). No obstante, mientras que la tecnología de *stripping* se aplica prácticamente para la eliminación de amonio, la precipitación de estruvita tiene la ventaja de recuperar de forma simultánea amonio y fósforo. (Hidalgo et al., 2016)

Las características fisicoquímicas del digestato varían, dependiendo en gran medida de la naturaleza y composición de los sustratos, así como de los parámetros operacionales del proceso de DA. Según la información proporcionada por numerosos autores (Fouda, 2011; Möller & Müller, 2012; Risberg et al., 2017; Tambone et al., 2010; Zirkler et al., 2014), el digestato generalmente tiene menor contenido en sólidos totales (ST) y carbono orgánico total (COT), menor proporción de carbono a nitrógeno (C/N) y menor viscosidad que los purines. Por el contrario, el valor del pH y la proporción de NH_4^+ son más altos en el digestato. (Corona E., 2020) Una de las limitaciones para recuperar estruvita del estiércol y el purín es la heterogeneidad entre sustratos, que dependen del tipo de animales, especificidades geográficas y pretratamientos (separador mecánico, digestión anaeróbica, etc.). (García et al., 2020)

Algunos estudios recomiendan que la cantidad de fósforo necesaria para producir estruvita es de 364.71 kg/día. Cuando no se cuenta con esa cantidad, se decide añadir la diferencia requerida para la cristalización, lo cual permite que se alcance la remoción total de este nutriente presente en el agua residual. Por ejemplo, un estudio realizado en la granja porcina del Valle del Yaqui, a través de implementar un proceso de cristalización de estruvita después de un proceso de digestión anaerobia, llegó a una eliminación mayor de 80% en N y P adicionando 364 Kg/d de fósforo, ya que la granja solo producía 16.47 Kg/d, presentando una factibilidad económica positiva. (Velásquez Z., 2022)

Conclusiones

En Santander, se producen 33.945 ton de cacao, 48.028 ton de café, 2.073.097 ton de caña panelera y 379.850 ton de palma de aceite. (Agronet, 2021). De la producción de cacao se obtiene la cáscara de la mazorca (mayor biomasa residual=70% del fruto), el exudado del mucílago y la cáscara de la semilla. El contenido de cenizas de la mazorca oscila entre 6,4 y 8,4% p/p con un alto contenido de minerales (K, Ca, Mg y P), ofreciendo la posibilidad de sustituirlos fertilizantes convencionales. (Lu et al., 2018).

GENERACIÓN DE BIOGÁS Y ESTRUVITA

En la producción de *café*, se utiliza la cascarilla de café en biodigestores para obtener biogás además de lodo residual como bioabono; el biogás puede presentar una composición aproximada de 65,2% de metano, 29,7% de bióxido de carbono y 5 % de otros gases. El lodo residual orgánico contiene: N=1.508-1.942%, P=0.765-1.373%, K=0.46-1.83%, garantizando su uso como abono. (Romero L. & Mamani P., 2013). Se estima que para una producción de 942.327 t/año de *café*, se producen 2.008.192 t/año, 193.460 t/año y 2.849.596 t/año de residuos de pulpa, cisco y tallos respectivamente. (Núñez C., 2012), lo cual representa el 20,53% de cisco de cascarilla de *café*. Además, se estima que cada ton de frutos de café genera alrededor de 0,18 ton de cascarilla (Álvarez H., 2016).

Cenipalma señala que aproximadamente un 64% del peso de la cosecha es biomasa sólida. El biogás aprovecha la biomasa líquida (25%) representada principalmente por los efluentes de las plantas extractoras y la captura del metano de sus piscinas de oxidación o biodigestores. Una producción de 753.075 ton de aceite de palma con 65.667 ton de aceite de palmiste origina 794.805 ton de tusa, 189.239 de cuesco y 454.174 ton de fibra, para producir más de 68 millones de m³ de biogás. (Osorio F., 2013) Durante el proceso de extracción el volumen de biomasa que se genera corresponde alrededor del 41% en peso de racimo de fruta fresca (RFF). (Cárdenas M. et al., 2010)

El *bagazo de caña de azúcar* es un material lignocelulósico constituido principalmente por 29.80% de celulosa, 20.61% de hemicelulosa y 5.70% de lignina, con alto contenido de cenizas (2.14%). (Williams & Herrera, 2022). Una hectárea de caña de azúcar equivale a un 40,03% de bagazo. A partir de 101,93 Kg de caña de azúcar se obtuvo 42,86 Kg de bagazo, lo cual equivale aproximadamente al 42,05% de la masa total. Por tanto, se puede afirmar que, en una tonelada de caña de azúcar, se obtendrían aproximadamente 0,4205 toneladas de bagazo. (Acevedo T. & Rojas Q., 2017).

La utilización de biomásas a partir de residuos porcinos y agrícolas en granjas familiares para la producción de energía es una opción económica, social y ambientalmente sostenible. El uso de la porcina para la generación de biogás y biol., ayuda a cerrar el ciclo de materiales en el sector porcícola, y se convierte en un ejemplo de economía circular que genera valor agregado al tiempo que reduce los residuos e impactos. (Pork Colombia & Minambiente, 2020). El Cuadro 3 recopila la información necesaria para la realización de un paquete tecnológico teniendo en cuenta los cultivos con potencial agrícola en Santander donde los residuos seleccionados equivalen a aquellos subproductos que representan la biomasa residual más significativa para la obtención de biogás según la evaluación de variables económicas, ecológicas y social.

Cuadro 3. Matriz de Alternativas de Residuos Agrícolas como Cosustrato

Variables	Económicas		Ecológicas		Social	
Producto Agrícola en Santander / Residuo	Producción (ton)	Financiación Proyectos	Biomasa (t/año)	Biogás (C/N)	Estruvita % P	Predios Familiares
Cacao / Mazorca (70%)	33.945	Asociación	23.762	59,57 ^a	0,15 ^a	18.000
Café / Cascarilla (20.53%)	48.028	Cenicafé	9.860	30,00 ^d	0,76	38.351
Caña Panelera / Bagazo (42.05%)	2.073.097	Cenicaña	871.737	25,00 ^c	1,30 ^f	6000
Palma de Aceite / Biomasa líquida (25%)	379.850	Cenipalma	94.963	19,82 ^e	0,06 ^b	1132

^a(Tabarez H., 2023), ^b(Elbersen, 2013), ^c(Sumardiono et al., 2023), ^d(Du et al., 2021), ^e(Angarita M. & Rivera R., 2021), ^f(Arias C. et al., 2021). Predios familiares reportados en su orden: <https://natura.org.co/asi-se-han-fortalecido-los-cacaoteros-de-santander-a-traves-del-monitoreo-climatico/>, <https://santander.federaciondecacafeteros.org/cafe-de-santander/>, (Torres G. et al., 2022), <https://fedepalma.org/wp-content/uploads/2023/06/Palma-de-aceite-en-Colombia-Santander.pdf>

Un estudio realizado propone usar el bagazo de caña de azúcar como filtro para los residuos de la crianza de cerdos. Normalmente, la crianza porcina concentra varios agentes contaminantes para el suelo, aire y agua. Los estudios en esta área demuestran que este compost orgánico aumenta la capacidad de retención de agua, la porosidad y estimula la propagación de microorganismos útiles en el control de fitopatógenos. Así mismo, después que el bagazo es utilizado como filtro y sometido a un proceso de compostaje, el material resultante puede ser utilizado en la fertilización de cultivos agrícolas sin riesgos

GENERACIÓN DE BIOGÁS Y ESTRUVITA

sanitarios debido a la presencia de metales pesados. (López B. et al., 2017)

Cuadro 4. Resultados Matriz de Alternativas de Biomosas principales en Santander

Variables	Económicas (3)		Ecológicas (2)			Social (1)	Puntaje*
Producto Agrícola / Residuo	Producción	Financiación	Biomasa	Biogás	% P	Predios	
Cacao / Mazorca	1	3	2	1	3	4	28
Café / Cascarilla	1	5	1	5	4	5	43
Caña / Bagazo	5	5	5	5	5	3	63
Palma de Aceite / BS	3	5	3	3	1	1	39

*Valor dado al residuo multiplicado por el factor de ponderación asignado a cada una de las variables.

Fuente: Autores

Con base en el mayor puntaje obtenido (Cuadro 4) y dando cumplimiento al objetivo de la investigación, se diseñó el siguiente paquete tecnológico: un sistema de codigestión anaerobia, como sustrato principal estiércol porcino y cosustrato el bagazo de caña panelera. Teniendo en cuenta que el biodigestor más apropiado para zonas rurales en Santander es el de tipo bolsa, las mejores condiciones de operación aproximadas serían: T=25°C, pH=6,5, C/N=24; con un rango de biomasa residual de 80-95% S.V para generar una alta producción de biogás y fertilizante.

Se recomienda la instalación de biodigestores en granjas familiares dedicadas a la producción comercial de panela y de cerdos, para que el biogás obtenido en el biodigestor por medio del bagazo de caña más el estiércol de los cerdos, genere la energía necesaria para el funcionamiento del mismo trapiche. El departamento de Santander consta de 4 provincias: La *Comunera* que tiene 227 trapiches, se benefician 1.892 familias con 5.903 hectáreas en caña y una producción de 386.823 ton/año; la *Guanentina* que tiene 281 trapiches, se benefician 1.624 familias con 7.140 hectáreas en caña y una producción de 503.324 ton/año; la de *Vélez* que tiene 245 trapiches, se benefician 2.432 familias con 8.714 hectáreas en caña y una producción de 596.806 ton/año y la *García Rovira* que cuenta con 3 trapiches, se benefician 49 familias con 230 hectáreas en caña y una producción de 13.800 ton/año. (Torres G. et al., 2022)

Referencias bibliográficas

- Abudi, Z. N., Hu, Z., & Abood, A. R. (2020). Anaerobic co-digestion of mango leaves and pig manure: performance assessment and kinetic analysis. *Springer-Verlag GmbH Alemania, Parte de Springer Nature*. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00665-6>/Published
- Acevedo T., C. E., & Rojas Q., E. D. (2017). Cuantificación del Potencial Energético de los Residuos Agrícolas de la Caña de Azúcar en el Departamento de Cundinamarca. *Monografía, Universidad Distrital Francisco José de Caldas*.
- Álvarez H., A. B. (2016). *Caracterización Fisicoquímica de varios Residuos Agroindustriales y sus mezclas para la Producción de Biocombustibles*.
- Álvarez V., L. H., García Reyes, R. B., Ulloa Mercado, R. G., Arellano Gil, M., & García González, A. (2019). Potencial biotecnológico para la valorización de residuos generados en granjas

GENERACIÓN DE BIOGÁS Y ESTRUVITA

- porcinas y cultivos de trigo. *Entreciencias: Diálogos En La Sociedad Del Conocimiento*, 7(21), 4–7. <https://doi.org/10.22201/enesl.20078064e.2019.21.70799>
- Angarita M., D. H., & Rivera R., E. (2021). *Factibilidad Técnica para Producir Biogás a partir de un Proceso de Digestión Anaerobia en el tratamiento de Aguas Residuales de la Industria de la Palma Aceitera (POME)*. Universidad Antonio Nariño.
- Arias C., Q., López S., R., Sainz R., L. R., Verdecia C., M. V., & Löberman E., B. (2021). Potencial Fertilizante de Cenizas de Bagazo de Caña de Azúcar de Industrias Azucareras. *Revista Cubana de Química*, 33. No.3(sept-dic).
- Benitez F., M., Abalos Rodríguez, A., & Rodríguez Pérez, S. (2020). Co- digestión anaerobia de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos y su lixiviado. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 22(2), 70–81. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v22n2.70345>
- Cabeza, I., Thomas, M., Vásquez, A., Acevedo, P., & Hernández, M. (2016). Anaerobic co- digestion of organic residues from different productive sectors in Colombia: Biomethanation potential assessment. *Chemical Engineering Transactions*, 49, 385–390. <https://doi.org/10.3303/CET1649065>
- Cárdenas M., E., Yáñez A., E., & Cárdenas M., M. (2010). Power Generation and Use of Biomass at Palm Oil Mills in Colombia. *Revista Palmas*.
- Castro M., L. del P., Parrales-Ramírez, Y. A., & 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), 29–39. <https://doi.org/10.18273/revion.v32n2-2019003>
- CEPAL. (2019). *Evaluación e implementación de proyectos piloto de biodigestores en El Salvador*. www.cepal.org/apps
- Chacón B., P., & Rodríguez C., A. (2021). Análisis de Producción de Biogás a partir de Desechos de Café vs Desechos Porcinos en la Finca “Villa Juliana” en la Vereda El Moral del Municipio de Páramo, Santander. *Especialización En Gestión Ambiental*.
- Chaput, P. (2007). *Uso y Manejo de los Biodigestores de Bolsa*.
- Corona E., F. (2020). *Estudio de la Recuperación de Nutrientes presentes en Efluentes de Digestión Anaerobia en forma de Estruvita*. Escuela de Doctorado Universidad de Valladolid.
- Drosg, B., Fuchs, W., Al, T., Madsen, S. M., & Linke, B. (2015). Nutrient Recovery by Biogas Digestate Processing. *IEA Bioenergy*, 5.
- Du, N., Li, M., Zhang, Q., Ulsido, M. D., Xu, R., & Huang, W. (2021). Study on the biogas potential of anaerobic digestion of coffee husks wastes in Ethiopia. *Waste Management and Research*, 39(2), 291–301. <https://doi.org/10.1177/0734242X20939619>
- Elbersen, W. (2013). Residuos de aceite de palma disponibles para la bioeconomía, junto con el reciclaje de nutrientes. *Palabras clave. Revista Palmas*, 34. Tomo II., 61.
- España Q., E. J. (2018). *Aprovechamiento del Estiércol de Vacuno para la Elaboración de Biogás como Propuesta al Manejo Adecuado de los Residuos Pecuarios en la Granja Ecológica Linderos*. Universidad de Huanuco Facultad de Ingeniería-Escuela Académico Profesional de Ingeniería Ambiental.
- Fernández, G. L. (2016). *Selección y dimensionado de un sistema de generación de biogás mediante digestión anaerobia de purines codigeridos con glicerina*. 12–20. <http://hdl.handle.net/10498/18784>
- García, C., Supervisor, I., & Calvet Sanz, S. (2020). *Un modelo de negocio para la recuperación de estruvita a partir de purines de cerdo*. Universidad Politécnica de Valencia.
- Hagos, K., Zong, J., Li, D., Liu, C., & Lu, X. (2017). Anaerobic co-digestion process for biogas production: Progress, challenges and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 1485–1496. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2016.11.184>
- Hidalgo, D., Corona, F., Martín-Marroquín, J. M., del Álamo, J., & Aguado, A. (2016). Resource recovery from anaerobic digestate: struvite crystallisation versus ammonia stripping.

- Desalination and Water Treatment*, 57(6), 2626–2632. <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.1001794>
- Hidalgo, D., Marroquín M., J. M., Corona, F., Santiuste, J., & Antolín, G. (2017). Técnicas disponibles para Recuperación de Nutrientes a partir de Residuos. *RETEMA*.
- López B., E., Andrade R., A. J., Suárez H., M., González C., O., & De La Figal Costales G., A. (2017). *Propiedades de un compost obtenido a partir de residuos de la producción de azúcar de caña Properties of a compost obtained starting from residuals of the production of sugarcane* *Revista Centro Agrícola*. 44(3), 49–55. <http://cagricola.uclv.edu.cu>
- Lu, F., Rodriguez-Garcia, J., Van Damme, I., Westwood, N. J., Shaw, L., Robinson, J. S., Warren, G., Chatzifragkou, A., McQueen Mason, S., Gomez, L., Faas, L., Balcombe, K., Srinivasan, C., Picchioni, F., Hadley, P., & Charalampopoulos, D. (2018). Valorisation strategies for cocoa pod husk and its fractions. In *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry* (Vol. 14, pp. 80–88). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2018.07.007>
- Ly, Z., Lyu, P., Li, K., Song, F., Zhang, Z., Yang, Y., & Yu, H. (2022). High temperature shock threatens methane production via disturbing microbial interactions in anaerobic digestion. *Science of the Total Environment*, 846. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157459>
- Marroquín M., J. M. (2018). *Valorización de Residuos Agroalimentarios y Ganaderos mediante Digestión Anaerobia. Codigestión de residuos del tratamiento de aceites vegetales usados con purín porcino*. Escuela de Doctorado Universidad de Valladolid.
- Martí H., J. (2019). *Biodigestores Tubulares: Guía de Diseño y Manual de Instalación*.
- Martínez L., M. (2015). Producción potencial de biogás en juanajuato. *Nova Scientia*, 7(15), 96–115.
- Núñez C., D. (2012). *Using agricultural waste for the production of biofuels (departamento del Meta-Colombia)*.
- Osorio F., C. E. (2013). Uso integral de la biomasa de palma de aceite. *Revista Palmas*, 34. Tomo II, 315–323.
- Patarroyo M., L. M. (2022). *Diseño de Biodigestor a partir de Porcinaza-Proyecto Integral de grado para optar el título de Ingeniero Químico*.
- Piñeiro N., C., & Bermejo M., G. (2015). Guía de Mejores Técnicas Disponibles para el Sector Porcícola en Colombia. *PigCHAMP Pro-Europa*. <https://www.porkcolombia.co/wp-content/uploads/2018/07/Guia-MTD-en-la-Porcicultura-de-Colombia.pdf>
- PorkColombia, & Minambiente. (2020). *Cartilla-Biogás-Porkcolombia*.
- Rivas S., O., Vargas, M., & Watson R., G. (2010). Biodigestores: factores químicos, físicos y biológicos relacionados con su productividad. *Tecnología En Marcha*, 23, 39–46.
- Rivera-Hernández, Y., Hernández-Eugenio, G., Balagurusamy, N., & Espinosa-Solares, T. (2022). Sargassum-pig manure co-digestion: An alternative for bioenergy production and treating a polluting coastal waste. *Renewable Energy*, 199, 1336–1344. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.09.068>
- Romero L., R., & Mamani P., R. (2013). Obtención de Biogás como fuente de Energía Renovable a partir de los subproductos del Café. *Rev. Investig. Altoandina*, 15, 241–252.
- Sánchez N., D. A. A. A., S. A. (2021). *Implementación de un Biodigestor Alimentado por Excretas Porcinas con co-sustrato de Caña de Azúcar en la Finca Agropecuaria Fundo Bonito en Puerto Gaitán - Meta*.
- Sidhartha, R., Zania; M. J. C. G. S. F. G. A. (2020). *Guía de Biogás para el Sector Porcícola en Colombia - Fondo Nacional de la Porcicultura*. 1–95.
- Sierra G., H., Arellano G., L., Dorado D., A., Fortuny, M., Gabriel, D., & Hernández, S. (2017). *Purificación y usos del biogás. /Purification and use of biogas*. <https://www.researchgate.net/publication/316656176>
- Sumardiono, S., Matin, H. H. A., Sulistianingti, I., Nugroho, T. Y., & Budiyono, B. (2023). Effect of physical and biological pretreatment on sugarcane bagasse waste-based biogas production. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.01.372>

GENERACIÓN DE BIOGÁS Y ESTRUVITA

- Tabarez H., K. V. (2023). *Evaluación de Extracción de Pectinas y Producción de Biogás a partir de Residuos Generados en la Obtención de Cacao de la Asociación ACEFUVÉR*. Universidad de Antioquia. Facultad de Ingenierías.
- Torres G., M. J., Duarte Muñoz, M., Milena Salazar Beleño, A., Andrea Carreño Castaño, L., & María Pacheco, M. (2022). *Análisis de la Situación actual de la Industria de Transformación de la Caña de Azúcar en Santander*. www.unipaz.edu.co
- Tortajada C., L. (2021). *Uso de la Estruvita como Fertilizante, un Ejemplo de Economía Circular en la Gestión de Purines*.
- Vanegas S., C. M. (2016). *Manejo del Bagazo en la Agroindustria de la Caña Panelera en el Nordeste Antioqueño a partir de la Gestión Integral de Residuos: Estudio de Caso Municipiode Yolombó*. 1–118.
- Velásquez Z., M. A. (2022). *Captura y remoción de fósforo de efluentes agrícolas en la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano para su recuperación como estruvita*.
- Venkiteshwaran, K., Milferstedt, K., Hamelin, J., Zitomer, D. H. (2016). Scopus - Resultados de búsqueda de documentos. *Bioaumento de Digestores Anaeróbicos Para Aumentar La Producción de Metano. WEFTEC 2016 - 89ª Exposición Técnica y Conferencia Anual de La Federación Del Medio Ambiente Del Agua 1*, 5633–5635. <https://www-scopus-com.crai-ustadigital.usantotomas.edu.co/results/results.uri?sort=plff&src=s&stl=Venkiteshwaran+K&sid=e10ae6d5a42679c45c2f46de0725e397&sot=b&sdt=b&sl=27&s=FIRSTAUTH%28Venkiteshwaran+K%29&origin=searchbasic&editSaveSearch=&yearFrom=Before+1960&yearTo=Present>
- Villanueva, V., Gabriel, P., Hervias, V., Angel, M., En, B., Ambiental, I., Rojas, M. L., Jairo, J., Montilla, M., & Lindsay, P. (2019). *Eficacia del biogás elaborado con estiércol de ganado bovino y porcino del camal municipal de Moyobamba 2019*.
- Wang, Z., Wang, T., Si, B., Watson, J., & Zhang, Y. (2021). Accelerating anaerobic digestion for methane production: Potential role of direct interspecies electron transfer. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 145). Elsevier L
td.<https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111069>
- Williams, O., & Herrera, G. (2022). *Caracterización fisicoquímica preliminar para potenciales usos como material de construcción del bagazo de caña de azúcar industrial del valle del Chira y artesanal del distrito de Montero, Ayabaca, Piura Tesis para optar el Título de Ingeniero Civil*.
- Xiang, S., Lu, F., Liu, Y., & Ruan, R. (2021). Pretreated rice straw improves the biogas production and heavy metals passivation of pig manure containing copper and zinc. *Journal of Cleaner Production*, 315. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128171>

Otras Referencias

AGRONET (2021) – Ministerio de Agricultura Red de Información del Sector Agropecuario Colombiano. Acceso directo en: <https://agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=1>

AGROSAVIA (2021) - Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria. Descomposición y liberación de nutrientes en biomasa por poda de cacao (*Theobroma cacao* L.) en Rionegro, Santander, Colombia. <https://www.redalyc.org/journal/437/43768194013/html/>

AGROSAVIA (2023) – Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. *Contexto de Cadena Cárnica Porcina. Pág. 1, 2 y 5*. En Línea: https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/37944/Ver_Documento_37944.pdf?sequence=1&isAllowed=y

GENERACIÓN DE BIOGÁS Y ESTRUVITA

Bergin SM, Wraight P. Silver based wound dressings and topical agents for treating diabetic foot ulcers. *Cochrane Database Syst Rev* 2006(1):CD005082

CIDET (2019). <https://cidet.org.co/disponibilidad-de-biomasa-residual-y-su-potencial-en-colombia/>

Cubillos, Reinaldo (2022). *Ranking de países productores de carne de cerdo – proyección 2022*. Director General de 333 Latinoamérica. <https://es.linkedin.com/pulse/ranking-de-pa%C3%ADses-productores-carne-cerdo-2022-reinaldo-cubillos>

Daniel, M., & Aldana, M. (2017). XXIV Simposio Peruano de Energía Solar y del Ambiente (XXIVSPES), Huaraz, 13 -17.11.2017. 13–17.
<http://www.perusolar.org/wpcontent/uploads/2017/11/PRESENTACION-XXIV-SPES.pdf>

DIARIO (2021). *Estiércol Porcino será Fuente de Energía en Colombia*. Diario Criterio. Bogotá, Colombia. Acceso Libre en: <https://diariocriterio.com/estiercol-porcino-fuente-de-energia-renovable/>

FAO (2007). Producción de panela como estrategia de diversificación en la generación de ingresos en áreas rurales de América Latina. Roma. Recuperado de: http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/ags/publications/AGSF_WD6s.pdf

González J. (2010). Energías Renovables: Infraestructura para granjas porcinas. México. Editorial Reverté. Dirección web: <http://razasporcinas.com/pigmarket/categoria-producto/desechos-y-efluentes/>. Tomado de: Martínez (2015).

RAPE (2020). Biomasa en la Región Central. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Grupo de Investigación Xué. Semillero de Investigación Barión. En Línea: <https://regioncentralrape.gov.co/wp-content/uploads/2020/05/Cptl06-BIOMASA-EN-LA-REGIO%CC%81N-CENTRAL.pdf>

RedBioLAC (2020). Texto extraído del documento elaborado por Jaime Martí Herrero para el programa IDEASS de Naciones Unidas. En línea: <http://redbiolac.org/los-biodigestores/>