



**Proyección de generación de energía eléctrica a partir de biogás para una granja porcícola
ubicada en Caucasia, Antioquia**

Ana Marcela Mosquera Mena

Monografía presentada para optar al título de Especialista en Gestión Ambiental

Asesora

Elizabeth Ocampo Montoya, Magíster (MSc) en Ingeniería Ambiental

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Especialización en Gestión Ambiental
Medellín, Antioquia, Colombia
2023

Cita	(Mosquera Mena, 2024)
Referencia	Mosquera Mena, A. M. (2024). <i>Proyección de generación de energía eléctrica a partir de biogás para una granja porcícola ubicada en Cauca, Antioquia</i> [Trabajo de grado especialización]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
Estilo APA 7 (2020)	



Especialización en Gestión Ambiental, Cohorte XXIV.

Grupo de Investigación Bioprocesos.

Sede de Investigación Universitaria (SIU).



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

A mi mamá porque todo lo que tengo, hago y sueño es por ella y para ella, no hay otra persona en el mundo a quien pueda admirar y querer más, gracias por aportar tantas cosas lindas a mi vida. A mi tía Maritza por el apoyo económico al igual que al resto de mi familia por el cariño y apoyo. A mis amigos, en especial a Felipe, Maria, Ana, Ale, Santi, Nata, Cris, Lau y Dani, les agradezco de corazón no soltarme la mano a pesar de lo difícil que ha sido este último año, sigo aquí por su compañía y porque escucharme así fuese un minuto ha salvado mi vida. Al grupo de Bioprocesos, sus integrantes y coordinadora Mariana Peñuela por todo el apoyo recibido y por permitirme usar algunos datos del proyecto de investigación para el desarrollo de este trabajo.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero brindado por el Programa Colombia Científica en el marco del denominado Ecosistema Científico (Contrato No. FP44842-218-2018).

Tabla de contenido

Resumen	8
Abstract	9
1. Introducción	10
2. Objetivos	13
2.1 Objetivo general	13
2.2 Objetivos específicos.....	13
3. Marco teórico	14
Digestión anaerobia y biogás	14
Implementación de DA en Colombia y el potencial del sector porcícola	16
Porcicultura en Colombia.....	17
4. Metodología	18
4.1 Cuantificación de excretas porcinas	19
4.2 Identificación y cuantificación de gasto energético eléctrico y/o térmico	19
4.3 Determinación de sólidos totales (ST)	19
4.3 Determinación de sólidos volátiles (SV).....	20
4.4 Cuantificación de la demanda química de oxígeno (DQO)	20
4.5 Medición de la producción de biogás.....	21
4.6 Análisis de la composición de biogás	21
4.7 Proyección de producción de biogás en la granja porcícola	21
5. Resultados y análisis de resultados	23
5.1 Cuantificación de excretas porcícolas	23
5.2 Identificación y cuantificación de gasto energético eléctrico y/o térmico.	24
5.3 Caracterización de la porcínaza para generación de biogás	25
5.4 Proyección de la producción de biogás en la granja porcícola	26

6. Conclusiones28

7. Referencias.....29

Lista de tablas

Tabla 123

Tabla 224

Tabla 326

Lista de figuras

Figura 1.15

Figura 2.18

Figura 323

Figura 425

Resumen

Con el objetivo de alcanzar las metas establecidas por el Gobierno Nacional mediante el Plan Energético Nacional (PEN) para el año 2050, que contempla que un 43% de la capacidad instalada proyectada para este año (42.709 MW) provenga de Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER), se reconoce el significativo potencial de las biomásas para contribuir a este objetivo mediante la generación de biogás a través de la digestión anaerobia. En este contexto, se destaca el potencial de las biomásas, con una capacidad teórica de generación de biogás de 53.544 TJ/año, siendo la porcinoza responsable de 2,12 TJ/año de esta capacidad. El presente estudio aborda la estimación de la generación de energía a partir de biogás utilizando la porcinoza generada en una granja porcícola en el municipio de Caucasia. Para ello, se llevó a cabo un inventario de la población actual de cerdos, se cuantificaron las excretas manualmente durante tres días, seleccionando tres corrales con diez cerdos cada uno. Asimismo, se identificaron las fuentes de consumo de energía eléctrica y térmica. Considerando un rendimiento del proceso para la generación de biogás de 66 L CH₄/kg porcinoza y un factor de eficiencia de conversión a energía eléctrica del 25%, se realizó la proyección correspondiente. Los resultados indican que la granja alberga 1.000 cerdos y que la generación de excretas es de 2,11 kg/cerdo/día, cifra inferior a la reportada en la literatura. Además, la proyección revela que, utilizando los 2.110 kg de excreta generados diariamente, se obtendrían 204 m³ de biogás con una composición de metano aproximada del 68%. Esto permitiría generar 10.395 kWh/mes, suficientes para cubrir el consumo actual de la granja, que asciende a 3.800 kWh/mes.

Palabras claves: biogás, porcinoza, FNCER, metano, energía eléctrica.

Abstract

In order to achieve the goals set by the National Energy Plan (PEN) for 2050, which aims to have 43% of the projected installed capacity (42,709 MW) come from Non-Conventional Renewable Energy Sources (NCRES), it is recognized that biomasses have significant potential to contribute to this objective through the generation of biogas via anaerobic digestion. In this context, biomass stands out as having significant potential, with a theoretical capacity to generate 53,544 TJ/year of biogas. Swine manure alone is responsible for 2.12 TJ/year of this capacity. The present study aims to estimate the energy generation from biogas using swine manure generated in a pig farm located in the municipality of Caucasia. To achieve this, we conducted an inventory of the current pig population and manually quantified excreta for three days, selecting three pens with ten pigs each. The study identified the sources of electrical and thermal energy consumption. The process performance for biogas generation was considered to be 66 L CH₄/kg swine manure with a conversion efficiency factor to electrical energy of 25%. Based on this, it was projected that the farm houses 1,000 pigs and generates excreta at a rate of 2.11 kg/pig/day, which is lower than the literature reported. The projection shows that 204 m³ of biogas, with an approximate methane composition of 68%, could be obtained from the 2,110 kg of excreta generated daily. This would generate 10,395 kWh/month, which is sufficient to cover the farm's current consumption of 3,800 kWh/month.

Key words: biogas, swine manure, NCRES, methane, electrical energy.

1. Introducción

Según las Naciones Unidas (UN, por sus siglas en inglés), se reconocen como energías renovables la energía solar, eólica, geotérmica, hidroeléctrica, oceánica y las bioenergías derivadas de biomásas. Estas se obtienen a partir de fuentes naturales y se caracterizan por ser capaces de regenerarse a una velocidad superior a la que se consumen. Así mismo, Las Naciones Unidas destacan que la generación de energía a partir de estas fuentes, emiten una menor cantidad de gases de efecto invernadero (GEI) en comparación con la emitida mediante quema de combustibles fósiles. Se reporta que los combustibles fósiles, generan el 80% de la energía primaria en el mundo y contribuyen dos tercios de las emisiones globales de CO₂. Es por esto, que la transición energética de los combustibles fósiles a las energías renovables se presenta como una medida esencial para abordar la crisis derivada del cambio climático.

Para la búsqueda de esta transición energética, se encuentra que Colombia, tiene gran potencial de generación a partir de biomásas residuales debido a la vocación agrícola del país, en donde estas biomásas son generadas de las industrias agrícolas y pecuarias. Según la UPME, para el año 2010, en el país se generaron alrededor de 177.361.879 ton/año de biomásas residuales de dichas industrias. Así mismo, se definió que tenían un potencial de técnico de biogás 53.544 TJ/año, equivalente al 25% de la demanda de gas natural para el año 2016 (Plataforma Regional LEDS LAC & Ministerio de Ambiente de Colombia, 2021), haciendo que este fuese una fuente de gran interés para generación de energía. Dentro de las biomásas residuales que se tienen, las excretas de cerdo son unas de las que presentan mejor relación en potencial energético por masa de residuo, con un valor de 1,53 TJ/ton de residuo (Plataforma Regional LEDS LAC & Ministerio de Ambiente de Colombia, 2021).

Para hacer un aprovechamiento de estas biomásas residuales, se han desarrollado diferentes técnicas para su aprovechamiento energético. Las fuentes de energía de biomasa pueden convertirse en compuestos como metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂), mediante procesos químicos, termoquímicos y biológicos (Lora & Andrade, 2009). Entre los métodos biológicos de tratamiento de residuos, la digestión anaeróbica (DA) es un proceso en el que diversos consorcios de bacterias (hidrolíticas, acidogénicas, acetogénicas y metanogénicas) descomponen la materia

orgánica de la biomasa para producir biogás. El biogás es una mezcla gaseosa compuesta principalmente de metano, dióxido de carbono, nitrógeno y trazas de sulfuro de hidrógeno (Deublein & Steinhauser, 2008). Adicionalmente, como subproducto del proceso se genera un digestato o efluente líquido, el cual puede ser estudiado para uso como biofertilizante (Pinto, Barros et al).

De acuerdo con lo anterior, se encontró que, en Colombia, el sector porcícola es importante en la economía nacional y es gran generador de porcínaza, como biomasa residual que podría ser aprovechada energéticamente. Para el año 2022, el sector porcícola representó el 1,4 del PIB agropecuario según informes del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. Así mismo, según estadísticas de La Asociación Colombiana de Porcicultores (PorkColombia) ha mantenido una tasa de crecimiento del 7,1% durante la última década, alcanzando una producción de 5,2 millones de cerdos anuales. Los departamentos de Antioquia, Cundinamarca y Valle del Cauca para el periodo 2019-2020 representaron un total de 75% de la producción nacional porcícola y Antioquia con el 43,4% de la producción nacional, se convierte en una de las regiones más importantes de este sector (PorkColombia, 2020). Por otro lado, de acuerdo con estudios de (Pessuto et al., 2016) un cerdo en promedio produce alrededor de 3,3 kg de estiércol por día, lo que equivale a 2,7 millones de toneladas de excretas por año según la producción actual del país. Con lo anterior, se tiene que el potencial factible de generación de biogás es de 2.120 TJ/año, que puede ser aprovechado para generación de energía eléctrica y/o térmica.

La alta generación de porcínaza estimada en el país, se ha convertido en una problemática ambiental, debido a las diferentes dificultades que conlleva su actual disposición final, que es en tanques o lagunas estiercoleras a cielo abierto. Una de las problemáticas, es la generación de GEI como el CO₂ y CH₄, debido a la degradación de la materia orgánica (Ribeiro et al., 2018), que contribuyen a la contaminación global y a la huella de carbono. Por otro lado, se tiene que el riego sin regulación de las excretas sobre los suelos, como una manera de biofertilización artesanal, por su contenido significativo de nitrógeno, fósforo y potasio (Tang et al., 2019), puede generar una sobreacumulación de nutrientes en los suelos, generando contaminación de los efluentes hídricos subterráneos (He et al., 2005).

Para el año 2022, la oferta energética de Colombia fue 76.905 GWh, de los cuales el 83,6% fue generada por hidroeléctricas, 14.6% por termoeléctricas y el 0,7% por Fuentes No Convencionales de Energías Renovables (FNCER) (Corficolombiana - Investigaciones Económicas, 2023) y según la Asociación de Energías Renovables Colombia- SER Colombia, actualmente se generan en el país a partir de fuentes eólicas, solar fotovoltaica, pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH's) y biomasas, la cantidad de 18,42MW, 455,46MW, 967,08MW, y 209,84 MW, respectivamente. Debido a la dependencia hídrica para la generación de energía del país, y con el propósito de diversificar la matriz energética, el gobierno nacional ha establecido metas ambiciosas en el Plan Energético Nacional (PEN) 2020-2050 y ha desarrollado algunas leyes que incentivan el uso de FNCER.

El PEN plantea que, al final del período se alcance una capacidad instalada de 42.709 MW, distribuidos de la siguiente manera: un 43.2% correspondiente a FNCER, un 37,4% a hidroeléctricas y un 19,2% a termoeléctricas (Corficolombiana - Investigaciones Económicas, 2023). Con esto se busca, evitar racionamientos energéticos por disminución de embalses en épocas de sequía (fenómeno del niño) y evitar incrementos de las tarifas energéticas. De la misma manera, se implementó la Ley 1715 de 2014, que busca promover el desarrollo y aprovechamiento de las FNCER e incluye beneficios para los contribuyentes como: deducción de hasta el 50% del valor de la inversión sobre el impuesto a pagar, depreciación acelerada, exclusión del impuesto al valor agregado (IVA) sobre bienes y servicios del proyecto y exención del pago de derechos de importación sobre maquinaria e insumos destinados a la operación del proyecto (Ley 1715 de 2014, 2014).

En el presente trabajo, se quiere realizar una proyección para la generación de energía, a partir de biogás usando porcinaza como sustrato, para evaluar la sustitución energética parcial o total de una granja porcícola en el municipio de Caucasia.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Realizar la proyección para la generación de energía, a partir de biogás usando porcinaza como sustrato, para evaluación de la sustitución energética parcial o total de una granja porcícola en el municipio de Cauca.

2.2 Objetivos específicos

- Cuantificar la producción de excretas porcícolas en la granja.
- Identificar las fuentes de gasto energético eléctrico y/o térmico de la granja.
- Consolidar los datos de producción de excretas y generación de biogás.
- Realizar la proyección de generación de energía a partir de biogás.

3. Marco teórico

Digestión anaerobia y biogás

Según la Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés) la digestión anaerobia (DA) es un proceso biológico que se da en ausencia de oxígeno, en el cual intervienen diferentes consorcios de bacterias como lo son las hidrolíticas, acidogénicas, acetogénicas y metanogénicas (ver **Figura 1**), que convierten la materia orgánica en una mezcla de gases denominada biogás. (Xu & Li, 2017) reporta que el biogás tiene una composición aproximada de 50%-70% de CH₄, 30%-50% de CO₂ y trazas de otros gases como H₂S, NH₃, H₂O_(v), N₂ y O₂.

(Zhuzhang, 2013) reporta que esta tecnología tiene inicios 1930 en China, en donde algunas empresas impulsaron la implementación de digestores anaerobios para la generación de este biocombustible buscando sustituir el queroseno, utilizado para generar iluminación. Sin embargo, también se encuentra que, aunque en el año 1958 se construyeron miles de digestores de bajo costo, unos años más tarde la mayoría de estos fueron descartados debido a problemas operacionales generados por los materiales de baja calidad y falta de control en los parámetros. Sin embargo, tiempo después se modificaron materiales de construcción, diseños, y se implementó control en las operaciones con lo cual este tipo de montajes se utilizaron para generación de energía eléctrica y suplir de manera total y/o parcial la demanda energética de diferentes granjas, usando también el efluente líquido del proceso como una manera de fertilización de diferentes cultivos de frutas, granos y verduras.

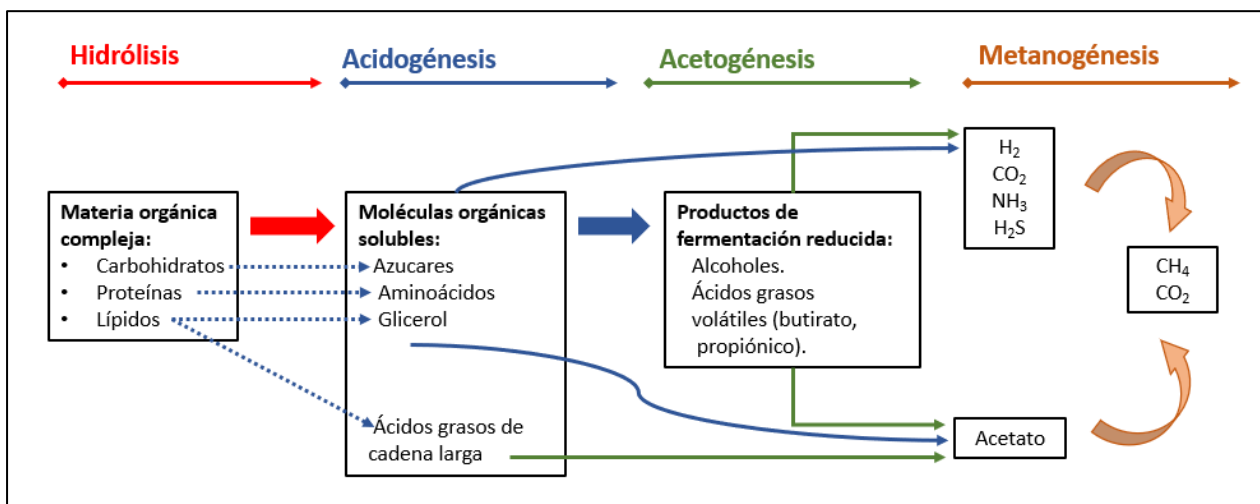
El control de parámetros operacionales en la DA es de suma importancia ya que, al ser un proceso con microorganismos, puede llegar a presentar diferentes tipos de inhibiciones ya sea por exceso o ausencia de diferentes sustancias, que al tener valores por fuera de los rangos óptimos reportados pueden generar toxicidad en el sistema (Chen et al., 2008). El amoníaco es uno de los inhibidores que se presentan con mayor frecuencia en este tipo de sistemas, y se puede presentar como el ion amonio (NH₄⁺) y amoníaco libre (NH₃), para sistemas en fase acuosa. Se reporta en literatura, que esta sustancia en altas concentraciones afecta en mayor proporción a las bacterias

metanogénicas, encontrando que a concentraciones mayores de 4,2 g/L se presenta inhibición total, disminuyendo la producción de metano de alrededor de 56%. Así mismo, otros autores recomiendan una operación por debajo de los 200 mg/L o 1.7 g/L para evitar inhibiciones (Jarrell et al., 1987). Así mismo se encuentra, que este parámetro es importante para los valores de pH y ácidos grasos volátiles (AGV), pues un incremento en la concentración de amoníaco genera una acumulación de AGV y una disminución del pH, que resulta en la disminución de generación de metano y en la acidificación del sistema, que en diferentes ocasiones mata las bacterias (Chen et al., 2008).

Para el proceso de DA se pueden utilizar diferentes sustratos como lo son: residuos agrícolas, residuos forestales y residuos de comida. Se tiene que el proceso de DA al reducir la materia orgánica y generar un biocombustible como el biogás (aportando a las energías renovables), también se puede utilizar como una forma de tratamiento de residuos, ya que disminuyen la carga orgánica de los efluentes (medida con sólidos volátiles o demanda química de oxígeno), convirtiéndola así en una alternativa sostenible para algunas industrias, granjas o empresas, que quieran adoptarla para mitigar los daños al medio ambiente y co-generar energía ya sea desde la parte térmica o eléctrica, permitiendo disminuir costos operacionales (Teng et al., 2014).

Figura 1.

Proceso bioquímico de la digestión anaerobia, tomada de (Cabezas et al., 2015).



Implementación de DA en Colombia y el potencial del sector porcícola

Según (Universidad Nacional & TECSOL, 2018) se tiene que la implementación de biodigestores en Colombia no fue producto de una necesidad energética como pasó en China, sino que se implementó como una solución para el tratamiento de aguas residuales domésticas y agroindustriales y fue tomado como un proceso de producción más limpia. Sin embargo, con el tiempo, diferentes industrias, especialmente del sector agroindustrial, han encontrado la importancia de integrar estos procesos para tratamientos de las biomásas residuales generadas, aprovechamiento del biogás para generación de energía eléctrica y térmica, y el aprovechamiento del efluente líquido del proceso como un posible biofertilizante.

Se estima que para el año 2007 había en el país entre 5500 y 5700 biodigestores, sin embargo, debido a las barreras económicas, falta de capacitaciones y errores en la fase de su diseño, implementación, operación, mantenimiento, en su momento se inviabilizó el uso de esta tecnología para pequeños productores y generó desconfianza en las comunidades para su implementación (Roa et al., 2020). A pesar de esto, en los últimos años este panorama en el país ha ido cambiando debido al interés de las empresas de tener un carácter sostenible, disminuir costos de operación y cumplir normativas de vertimientos, con lo cual se han asesorado de manera responsable y han implementado este tipo de procesos para mejorar su rentabilidad. Un ejemplo de ello es la empresa La Fazenda, ubicada en Puerto Gaitán (Meta), que instaló 4 digestores de flujo continuo, alimentados con porcínaza y que generan alrededor de 136.528 m³ de biogás al día que posteriormente los usan para generación de energía eléctrica (Universidad Nacional & TECSOL, 2018).

Según (Roa et al., 2020) se puede llegar a generar 60 m³, 36 m³ y 25 m³ de biogás a partir de 1 tonelada de excretas porcinas, 1 tonelada de purín y 1 tonelada de estiércol líquido, respectivamente. Cabe resaltar que estos valores dependen de la cantidad de materia orgánica (sólidos volátiles, DQO o DBO) presente en cada uno de los residuos porcícolas nombrados anteriormente. Para el año 2018, según El Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) el sector porcícola tenía alrededor de 6.5 millones de cabezas de porcinos, con lo cual se estimaba una generación de biogás de 1.500.000 GJ/año, lo que ayudaría a incrementar el potencial de

generación instalado y haciendo de esta una biomasa priorizada para la generación de biogás según un reporte de la Universidad Nacional de Colombia (Universidad Nacional & TECSOL, 2018).

Porcicultura en Colombia

Según informes de Porkcolombia, para el periodo de tiempo 2010-2020 la producción nacional porcícola del país incremento alrededor de 274.314 toneladas, equivalente a una tasa promedio de crecimiento anual que equivale al 9,6%, pasando de una producción de 194.566 toneladas de carne en 2010 a 468.880 toneladas en el 2020, equivalente a un beneficio formal de cabezas porcinas de 2.497.633 en 2010 a 5.002.665 cabezas porcinas en 2020. Así mismo, se reportó que en el 2020 el beneficio porcino del país se concentró principalmente 5 departamentos del país, que vienen siendo Antioquia, Cundinamarca, Valle del Cauca, Meta y Risaralda con una participación de 43,4%, 17%, 15,3%, 7,9% y 6,1%, respectivamente (PorkColombia, 2020). Es por lo anterior que, dentro de las proyecciones basadas en el comportamiento del sector en los últimos 10 años, se esperaría que el sector porcícola siga en un crecimiento en el mercado colombiano.

Por otro lado, según informes de Porkcolombia, se tiene que el consumo per cápita para el año 2010 fue de 4,8 kg y en el 2021 de 12,2 kg, con una producción nacional que contribuyó con el 79% del consumo nacional y que se esperar siga creciendo. Con estos valores, se tiene que el aporte del sector porcícola en el PIB agropecuario fue de 1,4% que representan aproximadamente 8 billones de pesos y que es una cifra considerable para la economía del país.

4. Metodología

Para el desarrollo de este trabajo, se van a utilizar resultados obtenidos por parte del proyecto P6 titulado “Valoración energética de residuos sólidos urbanos y agroindustriales” enmarcado en la alianza de Sostenibilidad Energética para Colombia – SÉNECA- y desarrollado por la Universidad de Antioquia por medio del Grupo de Investigación de Bioprocesos.

La granja porcícola donde se va a realizar la proyección de generación de biogás a partir de excretas porcinas (porcinaza), se encuentra ubicada en el municipio de Antioquia, en el departamento de Cauca y hace parte de la empresa el Llano SAS. Cauca se encuentra ubicada al norte del departamento (ver **Figura 2**), tiene una altura sobre el nivel del mar de 50 metros, una temperatura promedio mínima y máxima de 22°C y 38°C, respectivamente. Cauca es un municipio donde la porcicultura se encuentra en proceso de implementación y desarrollo, debido a que se presenta como una gran oportunidad económica para la venta de carne en las regiones costeras cercanas. Este municipio, aunque cuenta con diferentes beneficios por estar situado al lado del río Cauca para el desarrollo de la agricultura, porcicultura y ganadería.

Figura 2.

Ubicación geográfica de Cauca, Antioquia.



4.1 Cuantificación de excretas porcinas

Para la cuantificación de excretas se utilizó una báscula semi-industrial marca Trúmax modelo ARGOS DS-P. El método de recolección fue manual haciendo uso de una pala. Para esto, se utilizaron 3 corrales, cada uno con 15 cerdos y el seguimiento se hizo por tres días. Aplicando la ecuación 1, se determinó la cantidad de excretas generadas en la granja.

$$\text{Excretas}_{\text{total}} = \text{número}_{\text{cerdos}} \times \text{Excretas}_{\text{promedio/cerdo}} \quad \text{Ecuación 1}$$

4.2 Identificación y cuantificación de gasto energético eléctrico y/o térmico

Para la identificación del tipo de energía utilizada en la granja y cuantificar su consumo, se hizo una salida de campo en la cual se identificaron las fuentes de consumo y se clasificaron (térmica o eléctrica). Así mismo, para la cuantificación se tuvieron como referencia los recibos de energía eléctrica de los últimos tres meses y se preguntó sobre el consumo de gas propano a la persona encargada. Con la ecuación 2 y 3 se hizo el cálculo del costo por energía de la granja porcícola.

$$\text{costo}_{\text{electrico}} = \frac{\text{kWh}}{\text{mes}} \times \frac{\text{COP} (\$)}{\text{kWh}} \quad \text{Ecuación 2}$$

$$\text{costo}_{\text{termico}} = \frac{L_{\text{propano}}}{\text{mes}} \times \frac{\text{COP} (\$)}{L_{\text{propano}}} \quad \text{Ecuación 3}$$

4.3 Determinación de sólidos totales (ST)

La medición de sólidos totales se llevó a cabo aplicando el método 2540B del Standard Methods for Examination (American Public Health Association et al., 2017). Mediante la aplicación de este método, se elimina la humedad de las muestras al exponerlas a una temperatura de 105°C durante un periodo de tiempo de 24 horas. Todas las muestras se hicieron por triplicado, se utilizó un volumen para cada muestra de 15 mL en capsulas de porcelana, que fueron llevadas para su proceso de secado a una estufa de convección (Binder FD-115, Alemania). El cálculo de ST se hizo aplicando la ecuación 4.

$$g_{ST}/g_{muestra} = \frac{(A-B)}{C}$$

Ecuación 4

Donde:

A: capsula (g) + muestra solida (g)

B: capsula vacía (g)

C: muestra (g)

4.3 Determinación de sólidos volátiles (SV)

La medición de sólidos volátiles se llevó a cabo aplicando el método 2540E del Standard Methods for Examination (American Public Health Association et al., 2017). Las muestras analizadas se hicieron por triplicado y su humedad se removió inicialmente al ser expuestas durante 24 horas a 105°C. Después del proceso de secado, se llevaron a una mufla (FB1410M Thermo Scientific, US) durante 2 horas a 550°C. El cálculo para los SV se describe mediante la ecuación 5.

$$g_{SV}/g_{muestra} = \frac{(A-D)}{C}$$

Ecuación 5

Donde:

A: capsula (g) + muestra solida (g)

D: capsula(g) + residuo después de la mufla (g)

C: muestra (g)

4.4 Cuantificación de la demanda química de oxígeno (DQO)

La DQO se midió utilizando el método 8000 de Hach, utilizando viales de DQO test'n tube de rango plus. En el proceso, se utilizaron 200µL de mezcla homogenizada que se introducía en el vial y que posteriormente se colocaban en un termorreactor Hach DRB-200 que opera a 150°C por 2 horas. Después del tiempo de reacción, la concentración se midió usando un colorímetro Hach DR-900.

4.5 Medición de la producción de biogás

La producción de biogás se realizó con un medidor de gas de diafragma convencional, que requería de un caudal mínimo de 0.5 m³/h. Aplicando las ecuaciones 6 y 7, fue posible calcular el biogás producido en un periodo de tiempo.

$$V_{\text{biogas}} = V_{f,\text{biogas}} - V_{i,\text{biogas}} \quad \text{Ecuación 6}$$

$$\text{Producción de biogás (L/d)} = \frac{V_{\text{biogas}}}{t} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

V_{biogas} : volumen de biogás generado (L)

$V_{f,\text{biogas}}$: medida de volumen final (L)

$V_{i,\text{biogas}}$: medida de volumen inicial (L)

t: tiempo (días)

4.6 Análisis de la composición de biogás

La composición del biogás fue determinada usando un analizador MRU AIR Optima 7. Con este analizador se utilizó para cuantificar el contenido de metano, dióxido de carbono, nitrógeno y oxígeno en porcentaje volumétrico (%V/V) y el contenido de sulfuro de hidrogeno en parte por millón volumétricas (ppm_v).

4.7 Proyección de producción de biogás en la granja porcícola

La proyección de generación de energía teórica a partir biogás se calcula usando algunos resultados obtenidos de experimentos en laboratorio y aplicando la ecuación 8, en donde se tiene en cuenta un promedio de producción de biogás por kg de excreta (rendimiento), el porcentaje volumétrico promedio de metano del biogás y el poder calorífico inferior del metano (PCI). Así mismo, mediante la ecuación 9, se puede calcular la cantidad de energía que realmente disponible por medio de la eficiencia de generación de energía eléctrica.

$$E_{\text{teorica}} = \text{Redimiento} \times \text{Excretas}_{\text{totales}} \times \% \text{CH}_4 \times \text{PCI}$$

Ecuación 8

$$E_{\text{disponible}} = E_{\text{teorica}} \times n$$

Ecuación 9

5. Resultados y análisis de resultados

5.1 Cuantificación de excretas porcícolas

La granja porcícola cuenta actualmente con 1000 cerdos de ceba con un peso en un rango de 90 kg – 120 kg, los cuales se encuentran distribuidos en corrales libres, lo que les permite moverse dentro del espacio. Debido a que no es una granja tecnificada, en donde se tiene cuantificada ninguna variable, se decidió cuantificar de manera manual la porcínaza generada en un día en un corral con diez cerdos, durante los días de seguimiento ya especificados (ver **Figura 3**).

Figura 3

Recolección de porcínaza de manera manual.



En la **Tabla 1**, se muestran los valores obtenidos para los tres corrales en seguimiento con valores promedio y en la figura 2 se muestra la forma de recolección para su cuantificación.

Tabla 1

Cuantificación de las excretas porcinas de los corrales que se encuentran cada uno con 15 cerdos.

Corral	Porcínaza (kg/día)	Desviación (\pm)
1	33,05	1,43
2	29,65	1,88

3

32,25

2,25

De acuerdo con los valores de la **Tabla 1**, se encuentra que los valores en cada corral son variables y esto se debe a que el hecho de que las granjas no sean tecnificadas y cuenten con un piso de cemento, hace que la recolección no sea homogénea y gran cantidad de las excretas quede pegada en el suelo y no se pueda recolectar sin agregarle agua. A partir de ello, se tiene que el valor de excretas por animal que se hará uso en el presente trabajo es un valor promedio de los tres corrales que corresponde a 2,11 kg excreta/cerdo/día, es decir, que la generación de excretas al día de la granja para 1.000 cerdos es de 2.110 kg de excretas.

Un aspecto importante para tener en cuenta es que este valor es inferior al reportado por (Martinez Lozano, 2007), alrededor de 3,0 y 3,5 kg excreta/cerdo/día, y puede ser resultado, de la manera de operar de las granjas que se tomaron como base para sus estudios y su grado de tecnificación, lo que indica que se debería de tener en cuenta este tipo de dinámicas para el desarrollo de este tipo de trabajos.

5.2 Identificación y cuantificación de gasto energético eléctrico y/o térmico.

Se identificó que en la granja porcícola se genera gasto de energía eléctrica para la operación de un silo de maíz, la operación de una bomba de agua para lavados y para iluminación, principalmente. Así mismo, se identificó que para quehaceres domésticos, se consume energía térmica para cocinar, para lo cual se utiliza la quema de gas propano almacenado en pipetas. En la **Tabla 2**, se hace la clasificación de manera detallada y en la **Figura 4** se puede observar la ubicación de los lugares donde se tienen los mayores consumos.

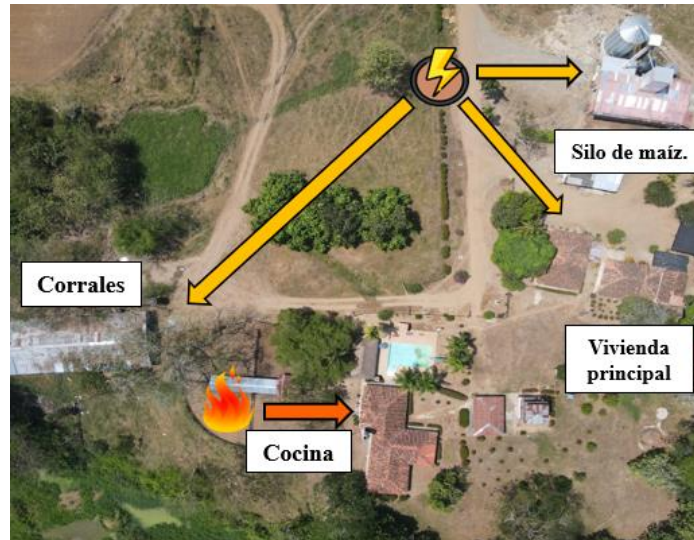
Tabla 2

Clasificación de fuentes de consumo de energía en la granja porcícola

Fuente de consumo	Tipo de energía
Silo de maíz	Eléctrica
Iluminación	Eléctrica
Bomba de agua	Eléctrica
Estufa	Térmica

Figura 4

Ubicación de las fuentes de consumo de energía de la granja porcícola.



A partir de los recibos de energía eléctrica de la granja, se tiene que el consumo promedio mensual es de 3.800 kWh y para energía térmica se hace uso de una pipeta de gas propano de 45 kg. Según las tarifas de EPM, el costo de 1 kWh está en promedio a \$960 COP y una pipeta de propano de 45 kg esta alrededor de \$200.000 COP. De esta manera y aplicando las ecuaciones 2 y 3 se tiene que el costo por consumo de energía eléctrica y térmica es de \$3.648.000 COP y \$200.000 COP, respectivamente.

5.3 Caracterización de la porcinaza para generación de biogás

La caracterización de la porcinaza para generación de biogás se hizo con base a una mezcla porcinaza y agua en una relación de 4:1, es decir una dilución donde el 20% es porcinaza en relación peso/peso. Esta caracterización se realizó durante el seguimiento de un reactor UASB inoculado con lodos de la PTAR (Planta de Tratamiento de Aguas Residuales) de San Fernando, usando esta mezcla como alimento y operado en el grupo de investigación de Bioprocesos de la Universidad

de Antioquia. En la **Tabla 3**, se presentan los valores promedios de sólidos volátiles, DQO y otros parámetros adicionales medidos y calculados.

Tabla 3

Caracterización de la mezcla porcínaza y agua en relación 1:4

Parámetro	Unidades	Valor	Desviación estándar
DQO	mgO ₂ /L	39.000	14.000
ST	%w/w	3,35	1,33
SV	%w/w	2,39	0,90
pH	-	7,71	0,30

De acuerdo con los resultados obtenidos en la **Tabla 3**, se puede decir que los valores de DQO y SV que representan de diferente manera la carga orgánica de la porcínaza, presenta variaciones significativas (entre el 35%-39%). Este comportamiento, es natural debido a que, a pesar, de que todos los cerdos reciben la misma dieta alimentaria, cada ser vivo presenta un metabolismo diferente que puede generar esta variación significativa. Así mismo, la forma de recolección de las excretas hace que esta pueda llevar adicionado cargas orgánicas adicionales del suelo en algunos momentos o que, por el contrario, mucha de ella quede pegada en él. Por otro lado, se tiene que el pH si tiene una baja variación, lo que muestra que la porcínaza presenta un carácter que tiene a ser básico, lo cual puede ser beneficioso para este tipo de procesos.

Durante el tiempo de seguimiento del proceso en el laboratorio, se tiene que se alcanzó una producción máxima de biogás de 40 L/día con un contenido de metano de 68% en porcentaje volumen cuando el reactor se le alimentaban 0.42 kg de porcínaza. De esta manera, se encuentra un rendimiento de 66 L CH₄/kg porcínaza o 390 mLCH₄/g_{SV}.

5.4 Proyección de la producción de biogás en la granja porcícola

A partir de los resultados obtenidos y los rendimientos calculados con base a los experimentos de laboratorio, y aplicando la ecuación 8, es posible calcular la cantidad de energía que podría producir la granja totalmente. El Poder Calorífico Inferior (PCI) del metano es de 13.9 kWh/kg y la densidad es de 0.716 kg/m³ (The Engineering ToolBox, 2023).

$$E_{\text{biogás}} = \frac{66 \text{ L } CH_4}{kg_{\text{porcinaza}}} \times 2110 \frac{kg_{\text{porcinaza}}}{\text{día}} \times \frac{1 \text{ m}^3 CH_4}{1000 \text{ L } CH_4} \times \frac{0.716 \text{ kg } CH_4}{\text{m}^3} \times \frac{13.9 \text{ kWh}}{\text{kg } CH_4}$$

$$= 1386 \frac{\text{kWh}}{\text{día}}$$

De acuerdo con el resultado obtenido, se tiene que el potencial teórico de generación de la granja para energía es de 1386 kWh si se hace uso de toda la porcinaza, sin embargo, se debe tener en cuenta que el potencial técnico y realmente disponible debe ir multiplicado por la eficiencia de conversión a energía eléctrica mediante su paso por un generador para una planta de baja es de 25%, de esta manera se tiene que la energía o potencia disponible se calcula aplicando la ecuación 9.

$$E_{\text{disponible}} = 1386 \frac{\text{kWh}}{\text{día}} \times 0.25 = 346.5 \frac{\text{kWh}}{\text{día}}$$

Teniendo que la eficiencia de generación es de 25%, se tiene que se podrían generar alrededor de 346.5 kWh/día, es decir, 10.395 kWh/mes. Con este resultado, se podría decir que la generación de biogás es capaz de satisfacer el consumo eléctrico actual de la granja (3800 kWh/mes), sin embargo, es importante resaltar que para el manejo total de excretas la infraestructura a implementar es de grandes volúmenes, lo que puede incrementar los costos de operación. Según resultados obtenidos de diseños del grupo de Bioprocesos de la Universidad de Antioquia, para tratar la totalidad de excretas, se deberían de construir dos reactores con un volumen mínimo de 45 m³ o cinco reactores de 22 m³ de trabajo.

6. Conclusiones

De acuerdo con la cuantificación de excretas de la granja porcícola, se obtuvo que el valor de generación de estas fue de 2,11 kg excreta/cerdo/día, siendo menor en un 36% al valor promedio encontrado en literatura. Con esto, se podría ratificar que la cantidad de excretas recolectadas en granjas porcícolas depende de la etapa de crecimiento del cerdo, el metabolismo de los cerdos y del grado de tecnificación de la granja, lo que puede aumentar o disminuir las pérdidas de las excretas con el suelo.

Se obtuvo un gasto energético por fuente eléctrica de 3.800 kWh/mes equivalente a \$3.648.000 COP y un gasto térmico por uso de propano de \$200.000 COP, de los cuales en caso de implementar el tratamiento del total de excretas generadas en la porcícola se podrían sustituir con el uso de biogás y generar un ahorro mensual en los gastos operativos y cerrando el ciclo de producción, impulsando la economía circular del proceso.

Es necesario realizar un estudio económico para analizar la viabilidad técnico-económica del proyecto, debido a que para el tratamiento de todas las excretas se presume que la inversión inicial es significativa y tener un tiempo de retorno de la inversión se hace esencial en el sector industrial.

7. Referencias

- American Public Health Association, American Water Works Association, & Water Environment Federation. (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (L. Bridgewater, Ed.; Vol. 23). American Public Health Association. <https://doi.org/doi.org/10.2105/SMWW.2882.216>
- Cabezas, A., de Araujo, J. C., Callejas, C., Galès, A., Hamelin, J., Marone, A., Sousa, D. Z., Trably, E., & Etchebehere, C. (2015). How to use molecular biology tools for the study of the anaerobic digestion process? In *Reviews in Environmental Science and Biotechnology* (Vol. 14, Issue 4, pp. 555–593). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/s11157-015-9380-8>
- Chen, Y., Cheng, J. J., & Creamer, K. S. (2008). Inhibition of anaerobic digestion process: A review. In *Bioresource Technology* (Vol. 99, Issue 10, pp. 4044–4064). <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.01.057>
- Ley 1715 de 2014, Pub. L. No. Ley 1715, Congreso de Colombia (2014).
- Corficolombiana - Investigaciones Económicas. (2023). *Informe Perspectiva Sectorial-Energía. Actualidad del sector energético colombiano.*
- Deublein, D., & Steinhauser, A. (2008). *Biogas from Waste and Renewable Resources.*
- He, Z. L., Yang, X. E., & Stoffella, P. J. (2005). Trace elements in agroecosystems and impacts on the environment. In *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology* (Vol. 19, Issues 2–3, pp. 125–140). Elsevier GmbH. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2005.02.010>
- Jarrell, K. F., Saulnier, M., & Ley, A. (1987). Inhibition of methanogenesis in pure cultures by ammonia, fatty acids, and heavy metals, and protection against heavy metal toxicity by sewage sludge. *Canadian Journal of Microbiology*, 33(6), 551–554. <https://doi.org/10.1139/m87-093>
- Lora, E. S., & Andrade, R. V. (2009). Biomass as energy source in Brazil. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 13, Issue 4, pp. 777–788). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.12.004>
- Martinez Lozano, M. (2007). Producción potencial de biogás empleando excretas de ganado porcino en el estado de Guanajuato. *Revista Electrónica Nova Scientia*, 7, 96–115.
- Pessuto, J., Scopel, B. S., Perondi, D., Godinho, M., & Dettmer, A. (2016). Enhancement of biogas and methane production by anaerobic digestion of swine manure with addition of microorganisms isolated from sewage sludge. *Process Safety and Environmental Protection*, 104, 233–239. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.08.020>

- Plataforma Regional LEDS LAC, & Ministerio de Ambiente de Colombia. (2021). *De la práctica a la política: análisis de las barreras a la inversión en biogás en Colombia y las medidas para abordarlas, a partir de la experiencia de los desarrolladores y otros actores relevantes*.
- PorkColombia. (2020). Economía Porcícola 2020. *Revista PorkColombia*, 257.
- Ribeiro, E. M., Mambeli Barros, R., Tiago Filho, G. L., dos Santos, I. F. S., Sampaio, L. C., dos Santos, T. V., da Silva, F. D., Silva, A. P. M., & de Freitas, J. V. R. (2018). Feasibility of biogas and energy generation from poultry manure in Brazil. *Waste Management and Research*, 36(3), 221–235. <https://doi.org/10.1177/0734242X17751846>
- Roa, Z., Mendoza Corba, J. C., Gonzáles Muñoz, S., Kaiser Caldera, F., & Gabauer, A. (2020). *Guía de biogás para el sector porcícola en Colombia*.
- Tang, Y., Wen, G., Li, P., Dai, C., & Han, J. (2019). Effects of Biogas Slurry Application on Crop Production and Soil Properties in a Rice–Wheat Rotation on Coastal Reclaimed Farmland. *Water, Air, and Soil Pollution*, 230(3). <https://doi.org/10.1007/s11270-019-4102-4>
- Teng, Z., Hua, J., Wang, C., & Lu, X. (2014). Design and optimization principles of biogas reactors in large scale applications. In *Reactor and Process Design in Sustainable Energy Technology* (pp. 99–134). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59566-9.00004-1>
- The Engineering ToolBox. (2023, November 28). *Fuels - Higher and Lower Calorific Values*. https://www.engineeringtoolbox.com/fuels-higher-calorific-values-d_169.html
- Universidad Nacional, & TECSOL. (2018). *Estimación del potencial de conversión a biogás de la biomasa en Colombia y su aprovechamiento*.
- Xu, F., & Li, Y. (2017). Biomass Digestion. In M. Abraham (Ed.), *Encyclopedia of Sustainable Technologies* (pp. 197–204). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10108-3>
- Zhuzhang, X. (2013). *Domestic biogas in a changing China - Can biogas still meet the energy needs of China's rural households?* (C. Rogers, Ed.; IIED). International Institute for Environment and Development.