

PRINCIPALES OPORTUNIDADES, RETOS Y SOLUCIONES POTENCIALES PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE PROYECTOS DE BIOGÁS EN GRANJAS PORCÍCOLAS DEL VALLE DEL CAUCA

Septiembre 18 de 2025

Contenido

1	Introducción.....	3
2	Objetivo	4
3	Alcance.....	4
4	Glosario.....	5
5	Metodología	6
6	Desulfuración del Biogás	8
7	Soluciones potenciales de aprovechamiento del biogás	9
7.1	Generación Eléctrica	9
7.2	Aprovechamiento térmico directo:	10
7.3	Inyección a la red	11
7.4	Comunidades Colaborativas	12
8	Valorización de Subproductos	13
9	Conclusiones.....	14
10	Anexos.....	16
10.1	Anexo 1. Resultados del proyecto	16
10.2	Anexo 2. Fórmulas para evaluación.....	19
10.3	Anexo 3 . Formato de Solicitud de Información Inicial	22
11	BIBLIOGRAFIA.....	23

1 Introducción

El Valle del Cauca es uno de los principales consumidores de energía del país, ocupando el segundo lugar en consumo industrial de gas natural, a pesar de no producirlo en territorio. Esta dependencia del Sistema Nacional de Transporte de Gas Natural (SNT) lo hace vulnerable frente a eventuales interrupciones en el suministro, afectando directamente su competitividad. En este contexto, el biogás se presenta como una alternativa estratégica de diversificación energética, a partir del aprovechamiento de biomasa residual de sectores agroindustriales, entre ellos el porcícola, que ocupa un lugar destacado en la producción nacional de proteína blanca; en particular, el departamento ocupa el tercer lugar en producción de carne de cerdo y el segundo en número de animales, con más de 1,4 millones de porcinos. Esta fortaleza productiva viene acompañada de un gran reto: la gestión de los residuos orgánicos que genera la porcicultura. Sin embargo, esos mismos residuos representan una oportunidad para avanzar hacia la economía circular y la transición energética, mediante su transformación en biogás.

Con el propósito de explorar este potencial, se llevó a cabo el proyecto **“Generación de Biogás en el Valle del Cauca”**, cofinanciado por Colombia Productiva y ejecutado por la Cámara de Comercio de Cali, con el apoyo técnico de Promisol S.A.S., en el cual se acompañó a 10 granjas porcícolas del departamento a identificar oportunidades de producción y uso de biogás. Los resultados muestran que el biogás puede cubrir hasta el 100% de las necesidades de calefacción animal y, en granjas con mayor escala, generar electricidad para el autoconsumo.

El presente documento se presenta como un *bien público* desarrollado en el marco del proyecto. Su propósito es servir de guía práctica y de consulta para cualquier granja porcícola interesada en implementar proyectos de aprovechamiento del biogás, recogiendo los principales retos, oportunidades y soluciones potenciales identificados a lo largo del proceso, con el fin de orientar decisiones de productores, empresas y actores de las industrias de Energía Inteligente y Proteína Blanca.

2 Objetivo

Presentar los principales hallazgos del proyecto “Generación de Biogás en el Valle del Cauca” sobre el potencial de aprovechamiento del biogás. El documento busca servir como una guía práctica de consulta para granjas porcícolas y actores del sector energético en la identificación de alternativas viables para transformar los residuos en energía limpia, contribuyendo a la sostenibilidad, la competitividad y la confiabilidad energética regional.

3 Alcance

Este informe consolida:

- Los retos y oportunidades del sector porcícola en materia de gestión de residuos.
- Una explicación del proceso de caracterización de biomasa y biogás desarrollado en el proyecto.
- Las principales alternativas tecnológicas evaluadas: uso térmico, generación eléctrica y escenarios futuros como el biometano.
- Recomendaciones generales y métricas básicas para que cualquier granja interesada pueda estimar su propio potencial energético.

Este documento no presenta resultados individuales por granja; su finalidad es ofrecer una visión orientadora, que permita al sector avanzar en la implementación de soluciones de biogás adaptables a distintas realidades productivas.

4 Glosario

Autogeneración eléctrica: Producción de energía eléctrica en la propia granja a partir de biogás, generalmente mediante motogeneradores.

Biodigestor: Sistema cerrado en el que la materia orgánica (porquinaza, residuos agrícolas, entre otros) se degrada en ausencia de oxígeno, produciendo biogás y un subproducto llamado digestato.

Biogás: Mezcla de gases producidos por la descomposición anaerobia de materia orgánica, compuesta principalmente por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2).

Biometano: Biogás purificado al que se le ha removido el CO_2 y otros compuestos, alcanzando una calidad similar al gas natural, apto para inyección en redes o uso vehicular.

Confiabilidad energética: Capacidad de un sistema energético para proveer energía de manera continua, estable y segura, incluso en condiciones de alta demanda o restricciones de suministro.

Desulfuración: Proceso para remover el sulfuro de hidrógeno (H_2S) del biogás, con el fin de evitar corrosión en equipos y emisiones contaminantes.

Digestato: Subproducto líquido y sólido del proceso de biodigestión, rico en nutrientes, que puede ser utilizado como fertilizante orgánico.

Economía circular: Modelo de producción y consumo que busca mantener los recursos en uso el mayor tiempo posible, reduciendo residuos y aprovechando subproductos.

Huella de carbono: Medida de las emisiones de gases de efecto invernadero generadas por una actividad o proceso, expresada en toneladas de CO_2 equivalente.

Sistemas comunitarios de biogás: Esquema en el que varias granjas se asocian para centralizar la producción, tratamiento y aprovechamiento del biogás, logrando economías de escala.

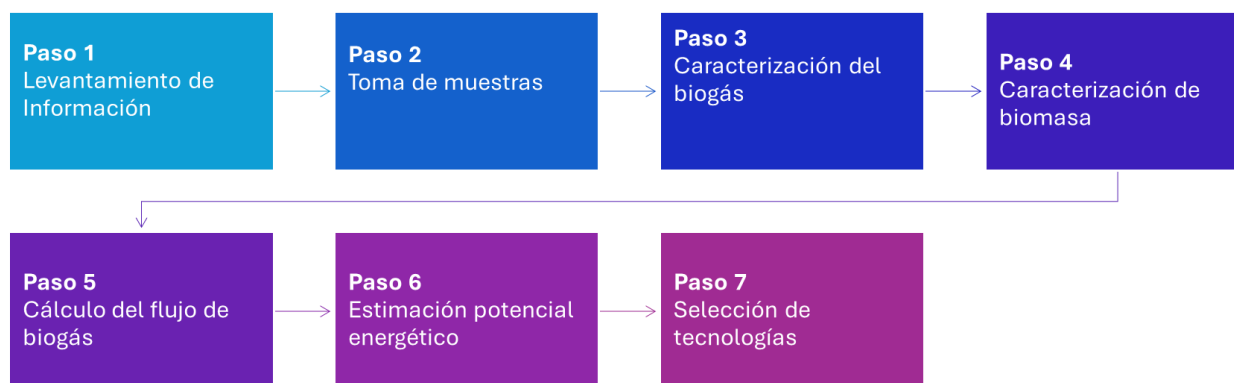
Uso térmico: Aprovechamiento del biogás como combustible para producir calor (ej. calefacción de galpones, calderas, secado).

Upgrading: Proceso tecnológico mediante el cual el biogás es purificado para aumentar su concentración de metano (CH_4), eliminando CO_2 , vapor de agua y otros compuestos, hasta alcanzar calidad de biometano.

5 Metodología

Para la evaluación del potencial de generación y aprovechamiento de biogás, se plantea la siguiente metodología, la cual constituye la base para identificar los retos logísticos, oportunidades de mejora y soluciones técnicas pues los resultados obtenidos darán las herramientas necesarias para la toma de decisiones sobre el adecuado aprovechamiento del biogás.

A continuación, se presenta el diagrama de flujo de la metodología recomendada:



Paso 1. Levantamiento de información sobre la granja: En esta etapa inicial se compila la información de la granja, esta incluye la descripción de la operación de la granja, planos, el número de animales y las etapas en las que se encuentran (precebo, cría etc.), si existen biodigestores, tipo y número de estos, así como el esquema de operación, mediciones que realicen a los flujos de proceso, equipos utilizados (bombas, filtros, lámparas, etc), sus consumos eléctricos si se tienen y requerimientos energéticos presentes. Esta información permite mapear las condiciones actuales a las que se encuentra la granja y permite identificar aquellos requerimientos que se quieren suplir. En el anexo 3 se puede encontrar un modelo de formato para esta información inicial.

Paso 2. Toma de muestras: Posterior al levantamiento de información se debe realizar los muestreos en puntos específicos (se recomienda la entrada a biodigestores) para porquinaza. El muestreo puede ser puntual (recomendado para casos de diagnóstico) o de monitoreo continuo (para seguimiento operativo). En cada caso se debe garantizar la representatividad del muestreo por lo que debe definir un mínimo número de muestras en un espacio de tiempo (3 o 4 recomendadas). Es importante mencionar que se recomienda realizar esta toma de muestras y posterior caracterización apoyados con un laboratorio fisicoquímico.

Paso 3. Caracterización del biogás: Junto con la toma de muestras se realiza una caracterización del biogás (si aplica). Este análisis, así como la toma de muestras de porquinaza, se recomienda realizarlo con un Laboratorio si no se cuenta con el equipo de muestreo adecuado. En general, el equipo permite medir: concentración de metano ($\%CH_4$), concentración de dióxido de carbono ($\%CO_2$), concentración de sulfuro de hidrógeno (ppm, H_2S), concentración de Oxígeno ($\%O_2$) mediante sensores portátiles que se conectan en la salida de biogás de los biodigestores si ya se cuenta con uno. Además de ser posible, incluir la medición de flujo de biogás. Estas mediciones permiten determinar la calidad del biogás e identificar a que tratamientos se debe someter el biogás para alcanzar la calidad requerida según el uso deseado.

Paso 4. Caracterización de biomasa: Las muestras tomadas se deben conservar en frío para evitar su degradación mientras se realizan los análisis. Para la porquinaza se recomiendan analizar las siguientes propiedades y características: DQO, carbono orgánico total, nitrógeno total, pH, nitratos, nitritos, sólidos volátiles, sólidos totales. Estos análisis permiten identificar las propiedades de la porquinaza que impactan en la digestión anaerobia y así mismo permiten establecer que tratamientos o mejoras se requieren para garantizar una adecuada producción de biogás.

Paso 5. Cálculo del flujo de biogás: En caso de no poder medir el flujo de biogás directamente en el sistema. Se puede utilizar la información recopilada en el levantamiento de información para realizar la estimación del flujo de biogás que se puede generar a partir del número de cerdos o a partir de la DQO de la porquinaza si se conoce.

Paso 6. Estimación de potencial energético: Para la estimación del potencial energético se utilizan los valores de composición del biogás obtenidos y eficiencias estándar de equipos (generadores eléctricos: 35%, quemadores térmicos: 90%) para estimar el potencial de producción de energía térmica y eléctrica. Una vez realizada la caracterización de biomasa residual y biogás, se debe estimar el potencial de producción de biogás y realizar su conversión en energía térmica o eléctrica utilizando las fórmulas para evaluación sugeridas en el anexo 2 de este documento.

Paso 7. Selección de la tecnología a utilizar: Con los valores de la estimación de potencial energético y los flujos de biogás disponibles se puede definir de acuerdo con los criterios de selección la mejor opción para aprovechamiento del biogás.

6 Desulfuración del Biogás

En el desarrollo del proyecto “Generación de biogás en el Valle del Cauca”, se identificaron concentraciones elevadas de sulfuro de hidrogeno (H_2S) en el biogás producido en las granjas, lo cual constituye un reto para su aprovechamiento. Para ello, se debe realizar la reducción de dicha concentración de H_2S presente, la cual se encontró entre 1000-11000 ppm, mediante un tratamiento del biogás que disminuya dichas concentraciones a menos de 100ppm y permita tener el gas en condiciones adecuadas para su uso. Para la desulfuración del biogás se pueden utilizar diversos métodos entre los que podemos contemplar:

- **Método químico:** La desulfuración química implica el uso de reactivos químicos como las sales férricas (cloruro férrico y sulfato de hierro) o el oxígeno (O_2) para convertir el H_2S en un compuesto no corrosivo. Usualmente, la reacción implica la formación de un precipitado sólido que puede luego ser separado del biogás. Este método requiere de control cuidadoso de los productos químicos utilizados y las condiciones operativas, un alto consumo de energía y la gestión de los residuos sólidos generados. El costo estimado de implementación de este tipo de tecnologías puede estar entre 80 – 150¹ USD/m³/día de capacidad.
- **Método biológico:** Este método aprovecha microorganismos específicos que oxidan el H_2S a sulfato (SO_4) o azufre elemental (S), dependiendo de las condiciones del proceso. Estos microorganismos suelen ser las bacterias reductoras de sulfato y bacterias anaeróbicas fermentadoras.
La desulfuración biológica se puede llevar a cabo mediante dos tipos de sistemas: sistema autotrófico y sistema heterotrófico. En el primero, las bacterias usan el CO_2 como fuente de carbono y se produce azufre elemental. En el sistema heterotrófico, las bacterias usan compuestos orgánicos como fuente de carbono y se produce el sulfato.
Este método de desulfuración es particularmente atractivo por su bajo impacto ambiental. No obstante, requiere un control preciso de las condiciones operativas (variaciones de pH o temperatura, y la posible presencia de compuestos inhibidores en el biogás) para mantener la actividad microbiana y su velocidad de reacción resulta baja. El costo de este tipo de tecnología puede oscilar entre 60 – 100 USD/m³/día de capacidad.
- **Método físico:** La desulfuración física se basa en procesos de absorción o adsorción, donde el H_2S se separa físicamente del biogás mediante materiales absorbentes o adsorbentes.

¹ Datos tomados de: UPME (2016), Paques (2022), CEC Tanks (2023), Zorg Biogas (2023), Rasi et al. (2007), Ryckebosch et al. (2011), Sánchez & Torres (2020).

En la absorción, el biogás se hace pasar por un líquido con alta afinidad por el H_2S (agua, una solución alcalina o una solución orgánica). La separación se produce al disolverse el H_2S en el líquido. Luego, este líquido puede ser regenerado mediante un tratamiento térmico o químico para recuperar el H_2S o convertirlo en otro compuesto.

En cuanto a la adsorción, esta consiste en hacer pasar el biogás por un sólido con capacidad para retener el H_2S en su superficie (carbón activado, zeolita, óxido de hierro o hierro esponjoso). Para regenerar el sólido se puede realizar un tratamiento térmico o químico que libere el H_2S o lo convierta en otro compuesto. Un valor estimado de inversión para estos métodos puede estar entre los 50 – 120 USD/m³/día de capacidad.

7 Soluciones potenciales de aprovechamiento del biogás

Siguiendo la línea de la apuesta productiva de la política de reindustrialización por la transición energética, la cual busca avanzar hacia la descarbonización y reducir la dependencia de los combustibles fósiles, generando nuevas oportunidades de negocio en torno a energías renovables, el aprovechamiento del biogás entra a articularse de manera oportuna en el sentido de que el biogás representa una fuente energética renovable y versátil, capaz de responder tanto a necesidades locales como a demandas más amplias del sistema energético. Y sus aplicaciones dependen de diversos factores como el volumen disponible, la infraestructura existente y los objetivos de cada empresa, lo que abre posibilidades de uso en procesos térmicos, generación eléctrica e incluso en su purificación (upgrading) para inyección a la red o comercialización.

Un ejemplo de este potencial se identificó en el sector porcícola del Valle del Cauca, a través de proyecto base de este bien público, donde el manejo de biomasa residual en las granjas genera oportunidades no solo para mejorar la gestión ambiental, sino también para convertir esos residuos en energía aprovechable que también se traduce en reducción de costos energéticos.

Así las cosas, el biogás también es un motor de fortalecimiento de la competitividad regional, mostrando cómo puede convertirse en un eje para proyectos encaminados a la economía circular, la transición energética y la sostenibilidad ambiental.

A continuación, se describen las principales soluciones de aprovechamiento del biogás:

7.1 Generación Eléctrica

El uso del biogás para generación de energía eléctrica es una aplicación muy común cuando el recurso es estable y se quiere aprovechar en el mismo sitio de producción. El auto consumo mejora la rentabilidad ya que evita comprar electricidad de la red, además, si se genera mayor

cantidad de energía a la consumida se puede tener la opción de vender los excedentes. Para esta aplicación se define un valor mínimo de flujo de Biogás 480 m³/día para la implementación de un generador eléctrico, el cual puede ser un motor de combustión interna o en casos especiales microturbinas. Este valor se establece por el mínimo consumo de los generadores en el mercado. Se considera un rendimiento: 0,35 kwh/m³ de biogás para el generador. Se puede utilizar generadores con menores flujos de biogás, pero las bajas eficiencias de estos ocasionan mayores valores en el precio de la energía producida versus la que provee la red.

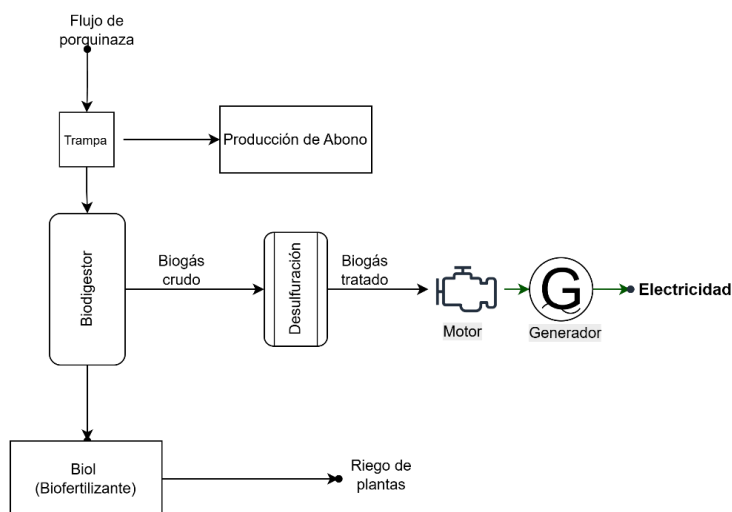


Figura 2. Esquema de generación de energía eléctrica con biogás

7.2 Aprovechamiento térmico directo:

El aprovechamiento térmico directo es muy común para uso de biogás generado en sitio. Para esta aplicación se define un mínimo flujo desde 2,0 m³/día. Para usos definidos como calefacción de lechones, cocción de alimentos en instalaciones aledañas, secado de fertilizantes o esterilización de equipos.

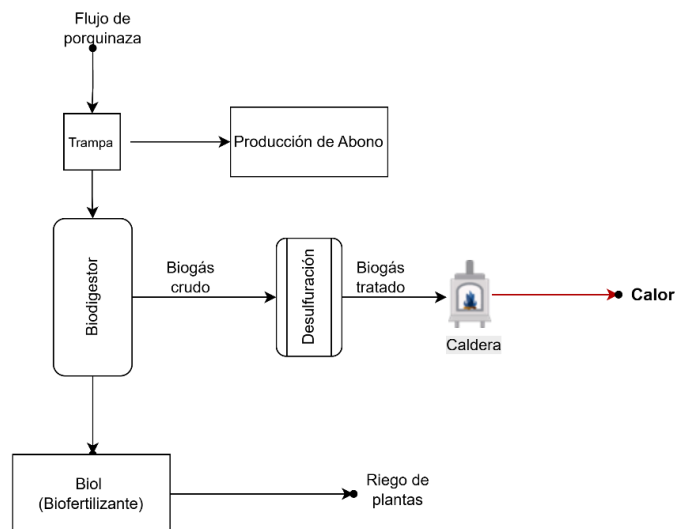


Figura 3. Esquema de generación energía térmica con biogás

7.3 Inyección a la red

Para la inyección de biogás a la red de gas natural, las empresas transportadoras/distribuidoras exigen que cumpla ciertos requisitos técnicos y de calidad, además de que exista un volumen mínimo que haga viable el proceso desde el punto de vista técnico económico.

En Colombia, la resolución CREG 059 de 2012 y actualizaciones establecen que el biometano debe cumplir con las especificaciones de calidad del gas natural establecidas en la resolución CREG 067 de 1995 y sus modificaciones. En la tabla 2 se presenta las especificaciones de biometano.

Especificaciones	Sistema Internacional	Sistema Inglés
Máximo poder calorífico bruto (GHV) (Nota 1)	42.8 MJ/m ³	1.150 BTU/ft ³
Mínimo poder calorífico bruto (GHV) (Nota 1)	35.4 MJ/m ³	950 BTU/ft ³
Contenido de Líquido (Nota 2)	Libre de líquidos	Libre de líquidos
Contenido total de H ₂ S máximo	6 mg/m ³	0.25 grano/100PCS
Contenido total de azufre máximo	23 mg/m ³	1.0 grano/100PCS
Contenido CO ₂ , máximo en % volumen	2%	2%
Contenido de N ₂ , máximo en % volumen	5%	5%
Contenido de inertes máximo en % volumen (Nota 3)	5%	5%
Contenido de oxígeno máximo en % volumen	0.1%	0.1%
Contenido máximo de vapor de agua	97 mg/m ³	6.0 Lb/MPCS
Temperatura de entrega máximo	49 °C	120°F
Temperatura de entrega mínimo	7.2 °C	45 °F
Contenido máximo de polvos y material en suspensión (Nota 4)	1.6 mg/m ³	0.7 grano/1000 pc
Número de Wobbe (Nota 5)	Entre 46.6 MJ/m ³ y 52.7 MJ/m ³	Entre 1250.0 BTU/ft ³ y 1414.7 BTU/ft ³

Tabla 2. Especificaciones biometano para inyección

Para llegar a estas especificaciones, el biogás producido debe pasar por un proceso de tratamiento que típicamente se conoce como upgrading, en el cual, al biogás se le remueve el

azufre presente, la humedad y se realiza una concentración entre 95-99% de metano (removiendo compuestos como el CO₂). El rendimiento de estos sistemas depende de la configuración (tecnología seleccionada) y la escala de producción.

De igual manera los costos de operación y la energía requerida aumentan en plantas pequeñas, debido a que la recuperación y el costo por Nm³ es sensible a escala.

Adicionalmente, factores como la distancia al punto de conexión a la red, el costo de compresión hasta la presión de la red, los acuerdos de compra con la empresa transportadora y el precio del biometano versus el precio del gas natural son otros factores que impactan tanto la parte técnica como la económica en este tipo de proyectos.

En Colombia, se han manejado proyectos piloto desde 100Nm³/h de biometano (aproximadamente 2400Nm³/día) como umbral para que la inyección sea económicamente razonable. Menores flujos se pueden inyectar, pero el costo por Nm³ aumenta mucho, salvo que se cuente con subsidios o incentivos.

Es importante mencionar que el flujo de biometano suele ser entre el 50 y 60% del flujo de biogás generado por lo que dependiendo de la concentración del biogás se requerirá hasta el doble de biogás para alcanzar un flujo de biometano viable para inyección.

7.4 Comunidades Colaborativas

Las comunidades colaborativas son esquemas donde varios productores comparten inversión, operación y beneficios de un sistema común de digestión anaerobia, upgrading y uso del biogás/biometano.

En este modelo, en lugar de que cada granja instale y opere su propio biodigestor y/o sistema de upgrading, se construye una planta centralizada que recibe los residuos orgánicos o el biogás generado de varios aportantes. Los residuos se pueden transportar en camiones o tuberías; o en una red de biogás de baja presión hasta la planta centralizada. Además, la asociación acuerda reglas de aportes, reparto de beneficios y operación.

Este tipo de sistemas se recomiendan cuando el flujo individual de cada aportante (granja) es usualmente menor a 80Nm³/h de biogás, pero juntos superan el umbral de viabilidad de >100Nm³/h de biometano si su objetivo es inyección a la red. Además, es conveniente cuando los aportantes se encuentran cercanos (menores a 10 km) para que los gastos logísticos sean razonables. También es importante que los aportantes tengan un objetivo común para uso del biogás/biometano generado (generación térmica, energía eléctrica o inyección), para poder definir de mejor manera los beneficios asociados.

A continuación, se presenta una tabla resumen con los principales factores que influyen en cada uno de los usos planteados.

Variable	Generación eléctrica	Uso térmico	Inyección a la Red	Comunidades Colaborativas
Inversión inicial	1.000 – 1.500 USD por m³/día de biogás.	500 – 1.200 USD por m³/día de biogás.	3.000 – 6.000 USD por m³/día de biogás tratado.	Similar a generación eléctrica o inyección, pero con 10–20% adicional en costos de logística, tuberías y gestión.
ROI	3-5 años	1-2 años	5-7 años	3-5 años
Complejidad técnica	Alta	Media	Alta	Alta
Escalabilidad	Limitada por el flujo	Flexible	Limitada por el flujo	Limitada por la distancia de las instalaciones
Flujo mínimo recomendado (m³/día)	≥480 m ³ /día.	>2m ³ /día	>4800m ³ /día	Dependiendo uso final

Tabla 3. Descripción de factores para usos del biogás

8 Valorización de Subproductos

Además de la generación de energía renovable, los procesos de biodigestión abren la puerta a nuevas oportunidades de negocio a través de los subproductos. Estos materiales, también representan un recurso valioso para las actividades agroindustriales, contribuyendo a la economía circular y al aprovechamiento integral de la biomasa, generando beneficios económicos y ambientales para las empresas. En ese sentido, se detalla a continuación una oportunidad identificada para mejorar la productividad agrícola y obtener nuevas líneas de negocio gracias al proceso de biodigestión:

Producción de Biofertilizante: el digestato producido depende de la alimentación tanto de porquinaza como de agua. En la práctica la relación usual de porquinaza y agua es entre 1:2-1:4. Si el sistema contiene exceso de agua es posible que se presente dilución del sistema y se tenga un digestato más líquido (mayor volumen producido). Una adecuada relación permite que el digestato producido sea más concentrado, lo que permite compostar y reducir su volumen antes de aplicar. Este biofertilizante, se puede utilizar como abono en pastos y otros sembrados propios de las granjas o como es el caso actual utilizarlos para venta y se conviertan en una línea de

negocio adicional. En cuanto se tiene registros de un aumento de productividad del 32-74% utilizando este biofertilizante.

Es importante darle un buen tratamiento al digestato, ya que para los digestatos muy líquidos tienen mayor riesgo de infiltración y lixiviación en el suelo si no se aplica correctamente. Por otra parte, los digestatos más concentrados pueden fermentar más rápido si se almacenan mal generando malos olores y emisiones.

9 Conclusiones

1. Potencial energético significativo

El análisis de caracterización y estimación de flujos confirma que las granjas porcinas del Valle del Cauca cuentan con un potencial relevante para la generación de biogás y su aprovechamiento energético. Aun con estimaciones conservadoras de producción de estiércol y rendimientos, los volúmenes calculados permiten plantear aplicaciones tanto térmicas como eléctricas, y en algunos casos, la producción de biometano para inyección a red.

2. Viabilidad condicionada al flujo y al uso final

- **Generación eléctrica:** Requiere un mínimo de 480 m³/día de biogás para operar con generadores convencionales de alta eficiencia, siendo más rentable en esquemas de autoconsumo.
- **Aprovechamiento térmico:** Puede implementarse desde flujos tan bajos como 2 m³/día, ofreciendo la mejor relación costo-beneficio en granjas pequeñas o medianas.
- **Inyección a la red:** Viable a partir de 4.800 m³/día de biogás (~2.400 m³/día de biometano), lo que limita su adopción a granjas de gran escala o esquemas asociativos.

3. Importancia de la calidad del biogás

El contenido de CH₄ y la presencia de H₂S son determinantes para el rendimiento y la durabilidad de los equipos. El tratamiento previo (desulfuración, secado y purificación) es imprescindible para usos eléctricos y para inyección en red.

4. Oportunidad en modelos colaborativos

Para granjas con flujos individuales insuficientes para justificar inversiones en upgrading o generación eléctrica de gran escala, las comunidades colaborativas representan una solución

técnica y económica, permitiendo alcanzar volúmenes viables y compartir costos de inversión y operación.

5. Valorización de subproductos como complemento económico

El digestato, bien manejado, constituye un biofertilizante con alto valor agronómico que puede mejorar la productividad agrícola entre un 32% y un 74%. Su adecuada gestión es clave para evitar impactos ambientales y maximizar beneficios.

6. Escalabilidad y sostenibilidad a largo plazo

La implementación de proyectos de biogás debe considerar no solo el flujo actual, sino la posibilidad de ampliar capacidades productivas, integrar otras fuentes de biomasa y adaptarse a futuros requerimientos regulatorios y de mercado.

10 Anexos

10.1 Anexo 1. Resultados del proyecto

RESULTADOS FINALES DE LA CARACTERIZACIÓN DEL BIOGÁS POTENCIAL A PRODUCIR

El análisis de las granjas evaluadas muestra que, en general, las características fisicoquímicas del sustrato (principalmente estiércol porcino) son favorables para la digestión anaerobia, con concentraciones adecuadas de sólidos volátiles, carga orgánica (DQO y COT) y, en la mayoría de los casos, pH en rangos operativos aceptables.

La Relación SV/ST en todas las granjas se encuentra entre 75% y 86%, lo que indica una alta proporción de materia biodegradable, clave para buena generación de biogás, por su parte, el contenido de nitrógeno no excede los niveles críticos de inhibición para metanógenos (1,700 mg/L como N-NH₃), lo que sugiere que no se presentan riesgos por toxicidad nitrogenada.

También es importante mencionar que algunas muestras presentaron valores de pH ligeramente ácidos (6.7 – 6.8), lo que podría indicar acumulación de ácidos grasos volátiles (AGVs). Este es un síntoma de sobrecarga orgánica o baja capacidad buffer en el sistema. Y en ciertos casos se evidenció variabilidad entre muestras dentro de una misma granja, lo cual puede implicar mezclado deficiente del sustrato o diferencias entre sectores del sistema, aunque también asociado a los picos de lavado que se envían directamente al biodigestor. Esto afecta la homogeneidad del proceso digestivo.

Medición de Biogás

En general, las granjas presentan un buen rendimiento en términos de metano, todas presentan concentraciones por encima del 55% (mínimo de concentración para biogás) lo que indica una conversión eficiente de materia orgánica en biogás. Las variaciones de concentración entre las granjas se explican por varios motivos entre los que podemos mencionar las dietas de los cerdos, el número de animales, la proporción de sólidos volátiles presentes en la alimentación al biodigestor, entre otras. Sin embargo, limitante evidenciada son las concentraciones de azufre de hidrógeno (H₂S), la cuales deben seguir siendo vigiladas. Las concentraciones de CO₂ y oxígeno están dentro de los rangos esperados, lo que indica un proceso anaeróbico equilibrado.

Caracterización de las granjas:

De las entrevistas iniciales y visitas se determinó el número de animales de cada granja, así como el tipo de biodigestor utilizado y con esto se calculó un flujo estimado de biogás. Las granjas tienen en uso el biodigestor tipo taiwan, también conocido como de estructura flexible, el cual es un

biodigestor tubular (con forma de salchicha) construido de polietileno (usualmente), el biogás se almacena en la parte superior y se va hinchando a medida que se acumula el biogás con baja presión. Este tipo de biodigestor es muy utilizado a pequeña escala ya que es fácil de construir y económico. Para su operación consta de dos tuberías, una para la carga del sustrato (porquinaza-agua) y la otra para la salida de biol. Adicionalmente, se instala una salida superior para la remoción del biogás producido usualmente una manguera para mayor flexibilidad.

La selección del tipo de biodigestor depende no solo del número de animales, sino del interés de inversión que tenga la granja. La FAO en su “Manual de biodigestores familiares²” menciona que para granjas con más de 1000 animales es viable utilizar biodigestores CSTR (de mezcla completa). Sin embargo, al ser estos más tecnificados, requieren de una mayor inversión, mano de obra más capacitada y flujos de alimentación más estable que compensan con mejoras en la eficiencia de la producción de biogás. Para este proyecto no se contempló recomendaciones de cambio de biodigestores ya que el principal foco estaba en verificar el uso que se le podría dar al biogás generado con las condiciones actuales de cada granja.

Potencial energético

Con el flujo de biogás calculado junto con la composición medida en los análisis nos permitió definir las máximas producciones de energía eléctrica y térmica para cada granja, obteniendo resultados que van desde 48(kWhe/día) a 2997(kWhe/día) para energía eléctrica y 124(kWht/día) y 7707(kWht/día) para energía térmica.

Soluciones identificadas para el aprovechamiento del biogás y sus posibles usos

De acuerdo con los resultados obtenidos para la capacidad de producción de energía térmica y eléctrica para cada una de las granjas se identificaron oportunidades de aprovechamiento para ambas soluciones, de acuerdo con el flujo de cada granja y, asimismo, cada granja definió el uso mas apropiado para cubrir las necesidades actuales, las cuales van encaminadas a reducción de costos internos, calentamiento de lechones, cocinas y secado de residuos para fertilizantes.

Sin embargo, durante el desarrollo del proyecto también se identificó una concentración de sulfuro de hidrogeno (H_2S) entre 1000-11000 ppm, lo cual genera corrosión en los equipos y, por lo tanto, debe ser mitigado para su correcto aprovechamiento, a través de un proceso sea biológico, químico o físico.

Para los casos de solución térmica se enviará el biogás al sistema de lámparas de calentamiento, mientras que para los casos de solución eléctrica se enviará el biogás a un moto generador.

²Fuente: FAO (2018). Manual de biodigestores familiares; Geradi, M. (2003). The microbiology of Anaerobic Digesters.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- El biogás generado en las granjas del Valle del Cauca representa una fuente energética subutilizada que puede cubrir hasta el 100% de las necesidades térmicas de calefacción por lámparas y en algunos casos, la totalidad del consumo eléctrico.
- El uso térmico directo del biogás es la alternativa más viable en la mayoría de las granjas debido a su simplicidad, bajo costo y rápida implementación.
- La desulfuración química del biogás con óxido férrico es la mejor opción por su simplicidad, bajo costo de operación y alta eficiencia.
- La sustitución de lámparas eléctricas por lámparas a biogás puede generar ahorros significativos en consumo mensual, mejorando la rentabilidad y reduciendo la dependencia de fuentes externas.

Recomendaciones

- Implementar un plan de monitoreo del rendimiento de las soluciones instaladas, evaluando periódicamente el ahorro energético y la eficiencia del sistema de desulfuración.
- Capacitar al personal de cada granja sobre operación y mantenimiento de los sistemas térmicos o eléctricos implementados.
- Explorar mecanismos de financiación o incentivos gubernamentales para la adquisición de moto generadores, dada su inversión inicial elevada.
- Realizar evaluaciones anuales del potencial energético en función del crecimiento de la producción porcina.
- Estudiar la viabilidad de sistemas cooperativos en zonas donde las granjas están geográficamente próximas, lo que permitiría reducir costos y mejorar la eficiencia operativa.

10.2 Anexo 2. Fórmulas para evaluación

Con el propósito de brindar mayor profundidad a quienes deseen replicar el análisis, en este anexo se incluyen las fórmulas de evaluación que permiten, a partir de los resultados de la toma de muestras y caracterización, calcular el potencial de producción de biogás, así como su posible conversión en energía eléctrica o térmica. Estas fórmulas sirven como referencia práctica para que las empresas interesadas puedan dimensionar el aprovechamiento energético de su biomasa residual de acuerdo con sus propias condiciones.

Cálculo del Potencial de Producción de Biogás

$$\text{Flujo de biogás } (m^3/\text{día}) = N * E * C$$

Donde:

N=Número de cerdos en la granja

E=Producción día de estiércol (kg/día/animal) Oscila entre 0,5 – 5 kg/día dependiendo de la edad (etapa) del cerdo. Considerando que en las granjas típicamente se tiene cerdos en varias etapas, se recomienda tomar un valor típico de 2,5 kg/día para estimar el flujo. En la siguiente tabla se presenta la producción de estiércol por animal

Etapas de crecimiento	Producción estiércol (kg/animal/día)	Sólidos totales (% del estiércol)
Lechón lactante	0,3 – 0,5	8 – 10 %
Recría / destete	0,6 – 1,2	8 – 10 %
Crecimiento (ciclo inicial)	1,5 – 3,0	7 – 9 %
Ceba / engorde	3,0 – 6,0	6 – 8 %
Reproductoras (hembras)	6,0 – 8,0	6 – 8 %
Verraco adulto	8,0 – 9,5	6 – 8 %

Tabla 1. Producción de estiércol por animal

C= Rendimiento de biogás por kg de materia orgánica. Oscila entre 0,03 -0,06³ m³/kg materia orgánica. Este valor cambia según condiciones de sitio (Temperatura, pH, tiempo de retención) y el tipo de alimentación de los animales que pueden variar estos valores entre un 20-30%.

³ Curso Asesoría Biogás-Biometano. Promisol-Novatio. 2025

Para la determinación del flujo de biogás si no se conoce la producción exacta se recomienda tomar la menor producción de estiércol (2,5kg/día) para garantizar un mínimo de producción y un rendimiento medio (0,04 m³/kg MO).

Cálculo Producción de Energía

Eléctrica:

Potencial eléctrico

$$= \text{Flujo de biogás} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{día}} \right) * \%CH_4 * \text{Poder calorífico } CH_4 \\ * \text{Eff motor } \%$$

Donde:

%CH₄ corresponde al promedio de valores obtenidos en el análisis de cada granja.

El poder calorífico de metano⁴ como 10 kWh/m³

Eff del generador eléctrico: Se toma un valor típico teórico de 35% (asociado a un motor)

Potencial eléctrico (kWh/día)

Térmica:

Potencial térmico

$$= \text{Flujo de biogás} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{día}} \right) * \%CH_4 * \text{Poder calorífico } CH_4 \\ * \text{Eff quemador } \%$$

Donde:

%CH₄ corresponde al promedio de valores obtenidos en el análisis de cada granja.

El poder calorífico de metano equivalente a 10 kWh/m³

Eff del quemador: Se toma un valor típico teórico de 90% (asociado a una caldera)

Potencial eléctrico (kWh/día)

Las unidades de ambos cálculos son kWh/día dado que se expresa el flujo de energía, se diferencian en si el flujo es eléctrico (e) o térmica (t).

⁴ Tomado de: [Valores caloríficos \(PCI/PCS\) de gases, combustibles y carburantes- Ciencias Físicas, Química y Biología](#)

Escalabilidad y Sostenibilidad

Para determinar necesidades adicionales se debe tener en cuenta los siguientes parámetros:

Desulfuración (si $H_2S > 100\text{ppm}$) se debe tratar para la prevención de corrosión e incidentes en las líneas y equipos posteriores. La remoción se realiza por distintos métodos que pueden ser físicos, químicos o biológicos. Esto debido a que para cualquier aplicación del biogás se requiere una calidad mínima de metano de 55% y que tenga un $H_2S < 100\text{ ppm}$. Además, se debe tratar de remover cualquier arrastre de agua que se presente en el sistema.

Biometanización: Para llevar el biogás a biometano, no solo requiere la remoción del H_2S sino de la remoción de agua y concentración del metano existente a un valor mayor a 96% y remoción de oxígeno y CO_2 (proceso conocido como upgrading). A continuación, se presenta una fórmula para estimar el flujo de biometano a partir del flujo de biogás:

Biometano:

$$\begin{aligned} \text{Flujo Biometano } (m^3/día) \\ = \text{Flujo de biogás } (m^3/día) * \%CH_4 * \%recuperación/\%pureza \end{aligned}$$

Donde:

$\%CH_4$ corresponde al promedio de valores obtenidos en el análisis de biogás

$\%recuperación$ corresponde a la recuperación de metano que entrega el equipo de upgrading (usualmente 95%)

$\%pureza$ corresponde a la pureza final requerida para la red (mín. 96%).

10.3 Anexo 3 . Formato de Solicitud de Información Inicial

Cuestionario Básico de Identificación de Necesidades - Proyectos Bioenergía				Fecha:	
1. Identificación del Cliente					
1.1 Nombre de la Empresa				1.2 Actividad Industrial	
1.3 Dirección de Contacto					
1.4 Dirección de la Zona de Procesamiento					
1.5 Representante Legal					
1.6 Persona de Contacto				1.7 Email de Contacto	
1.8 Teléfono de Contacto				1.9 Página Web	
2. Residuos Celulósicos (Biomasa para Combustión)					
2.1 La Planta Tiene Residuos Celulósicos Secos	No	2.2 ¿Cuáles?			
2.3 ¿Cuál es el Contenido de Humedad (%)		2.4 Especifique la Cantidad de Material Disponible (TON)			
2.5 Frecuencia					
2.6 Explique el Proceso Productivo y los Medios de Generación y Manipulación de los Residuos					
2.7 Nota: Si cuenta con resultados de caracterizaciones de la biomasa tales como análisis bromatológicos, termogravimetrías, entre otros, puede anexarlos a este documento					
3. Residuos para Digestión					
3.1 La Planta Tiene Residuos Sujetos a Digestión	No	3.2 ¿Cuáles?			
3.3 Seleccione el Estado Físico de los Residuos	Líquido	3.4 Especifique la Cantidad de Material Disponible (TON / m3)			
3.5 Frecuencia de Emisión		3.6 Especifique Características como el % de Humedad o la DQO según sea el caso			
3.6 Explique el Proceso Productivo y los Medios de Generación y Manipulación de los Residuos					
3.7 Nota: Si cuenta con resultados de caracterizaciones de la biomasa tales como análisis bromatológicos, DQO, DBO, entre otros, puede anexarlos a este documento					
4. Producción Actual de Energéticos					
4.1 Se hace Generación Eléctrica?	Sí	4.1.1 Cuánto (KWh)		4.2 Se hace Generación de Calor?	Sí
4.3 Se Produce Biogás	Sí	4.3.1 Cuánto (Nm3/h)		4.4 Se Producen Digestatos Líquidos y/o Sólidos	Sí
4.5 Hay Aprovechamiento de Otras Fuentes (Solar, Eólica, Entre Otros ...), Cuáles?					
5. Demanda Actual de Energéticos					
5.1 Consumo Actual de Gas Natural		Nm3/mes	5.1.1 Precio del Gas Natural		\$USD/Nm3
5.2 Consumo Actual de Energía Eléctrica		kWh/mes	5.2.1 Precio de la Energía Eléctrica		\$USD/kWh
5.3 Consumo Actual de Diesel		GAL/mes	5.3.1 Precio de la Energía Eléctrica		\$USD/GAL
5.4 Consumo Actual de Gasolina		GAL/mes	5.4.1 Precio de la Gasolina		\$USD/GAL
5.5 Explique la Dinámica de Consumo de Energía en sus Procesos					
6. Infraestructura Existente					
6.1 Cuenta con Calderas y/u otro tipo de Generadores de Vapor	Sí	6.1.1 Cuántos?		6.1.2 Cual es la Capacidad Instalada (TON/h de Vapor)?	
6.2 Cuenta con Plantas Generadoras Eléctricas a Gas?	Sí	6.2.1 Cuántas?		6.2.2 Cual es la Capacidad Instalada (kWh)?	
6.3 Cuenta con Lagunas de Oxidación?	Sí	6.3.1 Cuántas?		6.3.2 Cual es la Capacidad Instalada (m3)?	
6.4 Cuenta con Infraestructura de Almacenamiento de Biomasa?	Sí	6.4.1 Cuántas unidades?		6.4.2 Cual es la Capacidad Instalada (TON)?	
6.5 Cuenta con Biodigestores o Rellenos?	Sí	6.5.1 Cuántas unidades?		6.5.2 Cual es la Capacidad Instalada (Nm3/h)?	
6.6 Cuenta con Espacio Disponible para Instalaciones Adicionales?	Sí	6.6.1 Cuánto (m2)			
6.7 Cuenta con Planos y Diseños de la Instalación Actual?	Sí				
6.8 Si hay algún tipo de información adicional, por favor relacionela a continuación					
7. Motivadores del Proyecto (Califique de 1 a 5, siendo 1 lo mas bajo y 5 la calificación más alta)					
7.1 Reducción de Impacto Ambiental (Reducción de Multas, Bonos de Carbono,...)		7.2 Optimización del Uso de Energía y/o Reducción de Costos			
7.3 Valorización de Residuos de Proceso		7.4 Obtención de Nuevos Productos			
7.5 Venta de Energéticos		7.6 Otros (Especifique)		7.6.1 Califique	

11 BIBLIOGRAFIA

- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2003). *Livestock waste management in East Asia: Pig manure management*. FAO.
- Environmental Protection Agency (EPA). (2004). *Manure Management Planner: Technical Documentation*. U.S. EPA.
- García-González, M. C., & Cuadros, F. (2011). Producción de biogás a partir de purines porcinos: caracterización y parámetros de diseño. *DYNA*, 78(166), 137-145.
- Montalvo Correa, P. A. (2017). *Evaluación del potencial energético del estiércol porcino para la producción de biogás en granjas de Colombia* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia].
- Valores caloríficos (PCI/PCS) de gases, combustibles y carburantes - Ciencias Físicas, Química y Biología
- Curso Asesoría Biogás-Biometano. Promisol-Novatio. 2025