

**Diseño de un biodigestor con excretas de porcinos para la finca Buenos Aires de la Vereda
Magueyes**

Luvana Fernanda Chacón Serna, Álvaro Ricardo Del Sol Solano Vargas

Trabajo de grado para optar el título de Ingenieros Ambientales

Director

Yurley Paola Villabona Durán

Magíster en Eng

Codirector

Sebastián Mendoza Castellanos,

Ingeniero Electricista, Ph.D.

Universidad Santo Tomás, Bucaramanga

División Ingenierías y Arquitectura

Facultad de Ingeniería Ambiental

2025

Contenido

Introducción.....	11
1. Planteamiento del problema	13
1.1 Justificación.....	15
1.2 Objetivos	17
1.2.1 Objetivo general	17
1.2.2 Objetivos específicos.....	18
2. Marco referencial.....	18
2.1 Marco teórico	18
2.1.1 Excretas de cerdo	18
2.1.2 Digestión anaeróbica	19
2.1.3 Biodigestores.....	20
2.1.4 Tipos de biodigestores	20
2.1.5 Parámetros óptimos para el funcionamiento de un biodigestor	22
2.1.5 Sistema de agitación.....	22
2.1.6 Tiempo de Retención Hidráulica (TRH) en Biodigestores	22
2.1.7 Biogás.....	23
2.2 Marco Conceptual.....	24
2.3 Marco Legal	24
3. Método.....	25
3.1 Etapa 1: Vigilancia tecnológica de análisis de los parámetros y de los efectos que tiene el diseño de un biodigestor a partir de excretas de origen porcino.	25
3.1.1 Búsqueda de información	25

3.1.2	Análisis de la información	26
3.1.3	Selección de los parámetros.....	26
3.2	Etapa 2: Simulación del biodigestor seleccionado estudiando la capacidad de producción de excretas energética en el Software Aspen Plus.	26
3.2.1	Selección de modelo termodinámico para la simulación en Aspen Plus®	26
3.2.2	Selección de una cinética conocida para la simulación en Aspen Plus®.....	27
3.2.3	Definición de características, variables y parámetros de entrada para la simulación en Aspen Plus®	27
3.2.4	Desarrollo de diagrama de flujo del proceso y ejecución de la simulación.....	27
3.2.5	Validación de la simulación, análisis y conclusiones.....	28
3.3	Etapa 3: Diseño de un biodigestor en AutoCAD para la Finca Buenos Aires	28
3.3.1	Diseño del biodigestor	28
3.3.2	Presupuesto	28
4.	Resultados y análisis	29
4.1	Etapa 1: análisis de vigilancia tecnológica de los parámetros y de los efectos que tiene el diseño de un biodigestor a partir de excretas de origen porcino	29
4.1.1	Búsqueda de información	29
4.1.2	Análisis de la información	30
4.2	Etapa 2: Simulación del biodigestor seleccionado estudiando la capacidad de producción de excretas energética en el Software Aspen Plus.	54
4.2.1	Selección de modelo termodinámico para la simulación en Aspen Plus®	54
4.2.2	Selección de una cinética conocida para la simulación en Aspen Plus®.....	54

4.2.3 Definición de características, variables y parámetros de entrada para la simulación en Aspen Plus®	55
4.2.4 Desarrollo de diagrama de flujo del proceso, ejecución de simulación y verificación de errores	55
4.2.5 Ingreso de componentes en la simulación de Aspen Plus	55
4.2.6 Reacciones ingresadas en el proceso de la digestión anaerobia.....	57
4.2.7 Validación de la simulación, análisis y conclusiones.....	58
4.3 Etapa 3: Diseño de un biodigestor en AutoCAD para la Finca Buenos Aires	60
4.3.1 Diseño del biodigestor	60
4.3.2 Presupuesto del biodigestor	68
5. Conclusiones.....	69
6. Recomendaciones	71
Referencias	72
Apéndice.....	77

Lista de tablas

Tabla 1. <i>Parámetros de diseño de un biodigestor</i>	22
Tabla 2. <i>Composición química del biogás</i>	23
Tabla 3. <i>Marco legal</i>	24
Tabla 4. <i>Matriz de información de artículos encontrados en Scopus</i>	35
Tabla 5. <i>Información de patentes</i>	49
Tabla 6. <i>Componentes de entrada</i>	57
Tabla 7. <i>Compuestos de entrada</i>	57
Tabla 8. <i>Estimación de estiércol diario producido por la Finca Buenos Aires:</i>	61
Tabla 9. <i>Relación entre temperatura y tiempo de retención recomendado para lograr producciones de biogás aceptables</i>	62
Tabla 10. <i>Parámetros y características seleccionadas para diseñar el biodigestor tubular para la Finca Buenos Aires.</i>	66
Tabla 11. <i>Costos del biodigestor</i>	68
Tabla 12. <i>Costos para diseñar el biodigestor</i>	69

Lista de figuras

Figura 1. <i>Dinámica de publicaciones de los últimos 12 años en producción de biogás por digestión anaeróbica de excretas porcinas</i>	31
Figura 2. <i>Distribución geográfica de las publicaciones en producción de biogás por digestión anaeróbica de excretas porcinas</i>	32
Figura 3. <i>Mapa de términos de producción de biogás por digestión anaeróbica de excretas porcinas</i>	34
Figura 4. <i>Distribución geográfica de patentes en producción de biogás por digestión anaeróbica de excretas porcina poner como grafica</i>	46
Figura 5. <i>Dinámica de publicaciones de patentes de los últimos 12 años en producción de biogás por digestión anaeróbica de excretas porcinas.</i>	48
Figura 6. <i>Diagrama de flujo del proceso – Digestión anaeróbica en Aspen Plus®</i>	55
Figura 7. <i>Lista de componentes ingresados en la simulacion</i>	56
Figura 8. <i>Entrada al mezclador</i>	56
Figura 9. <i>Resultados de la composición de las corrientes involucradas</i>	58
Figura 10. <i>Resultados en flujo másico</i>	59
Figura 11. <i>Resultados de salida del biol</i>	59
Figura 12. <i>Resultados de salida del biogás</i>	60
Figura 13. <i>Dimensiones de un cilindro</i>	64
Figura 14. <i>Diseño del biodigestor tubular en AutoCAD</i>	67
Figura 15. <i>Plano completo de Porcicola las Terrazas con el biodigestor</i>	67

Lista de apéndice

Apéndice A. <i>Matriz de información de Artículos encontrados en Scopus</i>	77
Apéndice B. <i>Matriz de Patentes</i>	97
Apéndice C. <i>Tabla de compuestos ingresados</i>	99
Apéndice D. <i>Resultados de la composición de las corrientes involucradas</i>	102
Apéndice E. <i>Resultados del biol</i>	103

Resumen

La presente investigación tiene como objetivo el diseño de un biodigestor para la producción de biogás con excretas porcinas producidas en la finca Buenos Aires de la vereda Magueyes, Bucaramanga, Santander, que permita aportar a la demanda energética por medio de la generación de energía térmica, para suplir las necesidades de cocina y la calefacción de lechones. Por lo tanto, para cumplir este objetivo, el proyecto se dividirá en tres etapas, en la primera, se realizará una vigilancia tecnológica para definir los parámetros del funcionamiento del biodigestor, después se realizará una simulación en el Software Aspen Plus para establecer la capacidad de producción de biogás en el mismo, y finalmente se realizará el diseño del biodigestor cumpliendo las necesidades específicas de la finca.

Palabras clave: biodigestor, biogás, biomasa, digestión anaerobia, excretas de cerdo, energía calórica, gas metano

Abstract

The objective of this research is to design a biodigester for the production of biogas with pig excreta produced on the Buenos Aires farm in the Magueyes village, Bucaramanga, Santander, which allows contributing to the energy demand through the generation of thermal energy. to meet the cooking needs and heating of piglets. Therefore, to meet this objective, the project will be divided into three stages: in the first, a technological surveillance will be carried out to define the operating parameters of the biodigester, then a simulation will be carried out in the Aspen Plus Software to establish the capacity of production of biogas therein, and finally the design of the biodigester will be carried out, meeting the specific needs of the farm.

Keywords: biodigester, biogas, biomass, anaerobic digestion, pig excreta, caloric energy, methane gas

Glosario

Biol: abono orgánico líquido que se obtiene de la fermentación de desechos orgánicos, como estiércol y residuos vegetales, en un biodigestor. Se utiliza como fertilizante foliar para promover el crecimiento de cultivos (fuentes, 2020) .

Digestión anaeróbica: es el proceso biológico mediante el cual los microorganismos descomponen la materia orgánica en ausencia de oxígeno (*Ministerio de ambiente, 2023*)

Energía renovable: proviene de fuentes naturales inagotables como el sol, el viento o la biomasa (IRENA, 2016).

Gas metano: es un hidrocarburo gaseoso formado por un átomo de carbono y cuatro de hidrógeno (CH₄). (Ministerio de ambiente, 2023).

Huella de carbono: cuantifica el impacto ambiental de un producto o actividad en términos de emisiones de gases de efecto invernadero (Environment, 2023).

Microorganismos: son organismos microscópicos como bacterias, hongos y protozoos (@NatGeoES, 2018).

Producción porcina : es la cría de cerdos con fines alimentarios (FAO, 2020).

Residuos orgánicos : son desechos de origen animal o vegetal que se pueden descomponer de forma natural y transformarse en otro tipo de materia orgánica (Buitrago et al., 2020).

Sostenibilidad : se refiere a la satisfacción de las necesidades actuales sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras de satisfacer las garantizando el equilibrio entre crecimiento económico, cuidado del medio ambiente y bienestar social (CREG, 2016).

Introducción

En los últimos años, las distintas actividades agropecuarias han generado impactos negativos en el medio ambiente como emisiones de gases de efecto invernadero, erosión del suelo, entre otros. Por esto, el gobierno colombiano se ha visto en la necesidad de crear las Políticas Nacionales de Cambio Climático (PNCC). Estas políticas se vienen desarrollando desde 2014 y están destinadas a impulsar el desarrollo urbano, rural y energético extractivo de manera sostenible. También incluyen tácticas para preservar los ecosistemas. Dentro de sus consideraciones se contempla el aprovechamiento energético del biogás, como una estrategia territorial de desarrollo urbano sostenible (Santiago et al, 2020). A continuación, se presentan algunos títulos como ejemplo de numeración únicamente para la aplicación del formato en los títulos, no obstante, cada trabajo puede tener los mismos, menos o más títulos.

Sánchez (1996) afirma que el biogás se produce de una forma natural mediante proceso de digestión anaeróbica que conlleva a la descomposición de materia orgánica. Esta digestión biológica se ha utilizado en todo el mundo desde hace casi 200 años, tanto en hogares como en la industria, para generar metano, estabilizar residuos y producir fertilizantes. De la misma forma, Española de Compostaje (2014) manifiesta que una forma de obtenerlo es a partir de las excretas porcinas. Según GOV.CO (2022), se estima que en el departamento de Santander existen alrededor de 6.000.000 porcinos. Por otro lado, México, un país con clima similar y donde el sistema de alimentación por medio de concentrado para los cerdos es muy parecido al de Colombia, indica que un cerdo de 100 kg, excreta diariamente aproximadamente 6,17 kg de heces y orina. Asimismo, el peso promedio de los cerdos oscila entre 90 y 120 kg en la etapa de cebado (Ubaque y Molina, 2019).

Desde el punto de vista de Hernández et al.(2019), la información suministrada por Luis Felipe Gómez Álzate, presidente de Agremgas, en Colombia, afirma que aún hay más de 1.2 millones de hogares que dependen exclusivamente de la leña para cocinar, y 1.6 millones de hogares que utilizan leña junto con otro tipo de combustible. Igualmente, en el diario Vanguardia Liberal (2020), se revelaron los hallazgos del Índice Multidimensional de Pobreza Energética (IMPE); para el caso del departamento de Santander, el 10.2% de la población experimentó pobreza energética en 2022, lo que equivale a 237,528 personas en esta situación. Para el caso específico de las áreas rurales del municipio de Matanza, Santander, Colombia, la falta de interconexión de gas natural, se puede deber a los desafíos y costos asociados con la extensión de la infraestructura de gas a regiones remotas. Por lo general, las áreas rurales enfrentan dificultades para acceder a la infraestructura de gas debido a factores como la menor densidad de población, terrenos accidentados y mayores costos de instalación y mantenimiento. Estos desafíos hacen que sea económicamente inviable extender los gasoductos a estas áreas, lo que lleva a una falta de interconexión de gas natural en regiones rurales de este tipo (Buitrago et al., 2020).

1. Planteamiento del problema

De acuerdo con Buitrago et al. (2020), el crecimiento de la industria porcina colombiana ha dado lugar a un aumento en la producción de excretas, que a menudo se vierten en el suelo o se almacenan en tanques. Las técnicas actuales para el manejo de estos residuos incluyen el uso de digestión anaeróbica y compostaje, así como la implementación de regulaciones ambientales y mejores prácticas. Sin embargo, es necesario seguir investigando e innovando en esta esfera para asegurar la gestión sostenible de los desechos y minimizar el impacto ambiental. Gupta (2011), porque, si bien las excretas porcinas contienen altas concentraciones de nitrógeno y fósforo, nutrientes cruciales para el crecimiento de las plantas, su aplicación inadecuada o en exceso puede ocasionar un desequilibrio en el suelo, conduciendo a la eutrofización de los cuerpos de agua cercanos. Además, la mayoría de las veces, estas excretas se almacenan en tanques, generando gases tóxicos y de efecto invernadero que incluyen dióxido de carbono (CO_2), amoníaco (NH_3), ácido sulfhídrico (H_2S) y metano (CH_4). Estos compuestos gaseosos tienen un impacto adverso en la salud y el bienestar de los trabajadores, las comunidades aledañas y los propios cerdos (Ministerio de ambiente y desarrollo, 2017). Adicionalmente, Hernández et al. (2019) propone que existe contaminación por metales pesados como cobre y zinc, los cuales son absorbidos por los cerdos en un porcentaje relativamente bajo del 5 al 15%, mientras que el excedente es excretado, contribuyendo a la contaminación ambiental. Según Fuentes (2020), las excretas representan un riesgo significativo de combustión espontánea si no se manejan adecuadamente. Cuando su contenido de humedad supera el 15% y se almacenan en lugares cerrados, estas pueden auto inflamarse, convirtiéndose en un verdadero peligro y ocasionando pérdidas económicas considerables (fuentes, 2020). Para prevenir este riesgo, se ha tenido en cuenta lo mencionado por Polematidis et al. (2007), donde se aclara que es esencial someter las excretas a tratamientos de

secado, por medio de la exposición solar o mediante procesos de deshidratación especializados. Al reducir el contenido de humedad a niveles seguros, se minimiza la posibilidad de combustión espontánea y se garantiza un manejo más seguro de estos residuos (Polemaitis et al, 2007). Igualmente, Palermito et al. (2021) enfatiza que en el tema de la seguridad energética, Colombia enfrenta una situación compleja en el acceso al gas natural en zonas rurales del país. La falta de infraestructura adecuada para la distribución de gas en estas áreas implica que el suministro se realice mediante el transporte de cilindros en camiones. Al mismo tiempo, Buitrago et al. (2020) sostienen que las poblaciones rurales tienen dificultades de acceso, debido a que el estado de las carreteras o por la ubicación geográfica donde se encuentran ubicadas, es bastante compleja. Esta problemática se agrava en las fincas situadas en áreas más aisladas, y de acuerdo con el DNP 2019, las zonas aisladas representan el 33,2% de la población, lo que se traduce en aproximadamente 8,5 millones de personas sin acceso a gas natural (DNP,2019).

Según el periódico Portafolio (2023), el 67% de los hogares colombianos tienen acceso a gas natural; no obstante, algunos datos del Ministerio de ambiente (2021) revelan que, del porcentaje restante, el 20,6% de las familias todavía emplea gas licuado de petróleo (GLP) y el 10,5% depende de leña, carbón y desechos orgánicos. El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2020) afirma que aproximadamente 5,4 millones de hogares todavía utilizan biomasa como combustible para cocinar. En las áreas rurales, la situación es más grave, ya que el 39,8% de las familias cocina utilizando esa biomasa. Una familia campesina típica de cuatro miembros gasta cerca de 11 toneladas de leña al año y dedica alrededor de 26 días de trabajo para recolectar este recurso.

El uso generalizado de cocinas y estufas tradicionales de biomasa conduce a un uso energético ineficiente y altamente contaminante. Estos métodos de cocción están directamente vinculados a problemas de salud humana, dado que liberan altas concentraciones de sustancias tóxicas al aire como gases de efecto invernadero que incluyen el metano y óxido nitroso (Gupta, 2011). La Organización Mundial de la Salud estima que cerca de 3,8 millones de personas murieron prematuramente en 2017 por enfermedades atribuibles a la contaminación del aire en interiores, siendo los niños el grupo más afectado (WHO, 2024).

En este contexto, el señor Cesar Fernando Chacón Sánchez, dueño de la Finca Buenos Aires, la cual se encuentra en el kilómetro 8 de la vía Bucaramanga-Matanza en Santander, Colombia, comentó por medio de una entrevista que, la principal actividad de la finca es la cría de cerdos, manteniendo un promedio de 25 a 30 animales en sus instalaciones. Se estima que la producción diaria de estiércol alcanza los 60 kg, los cuales son depositados directamente en el suelo. En cuanto a sus necesidades energéticas, al carecer de suministro de gas natural, la finca se ve obligada a adquirir 2 bombonas de gas propano al mes, con un costo aproximado de \$150.000 cada una, para cubrir sus requerimientos de cocina y calefacción para los lechones.

Considerando lo anterior, la presente investigación plantea esta pregunta problematizadora: ¿Es viable implementar un biodigestor en la Finca Buenos Aires para generar energía térmica mediante la producción de biogás a partir de excretas?

1.1 Justificación

La industria porcina ha crecido mucho en su producción, lo que ha generado grandes volúmenes de desechos y excretas. A nivel global, la porcicultura enfrenta graves desafíos ambientales que se han intensificado con el tiempo. Estos problemas ambientales están

estrechamente vinculados con las prácticas inadecuadas y los procedimientos deficientes que se llevan a cabo en el proceso productivo de esta actividad (Rodríguez et al., 2019).

Ante la necesidad de minimizar la contaminación ambiental asociada a los vertimientos de excretas porcinas, es crucial implementar estrategias eficaces que se centren en un adecuado manejo de residuos. Varias aproximaciones clave deben ser adoptadas, como la implementación de tratamientos de residuos como biodigestores y lombricompostaje, el establecimiento de programas de capacitación para agricultores que fomenten prácticas responsables de manejo de desechos orgánicos, la mejora de la infraestructura de las granjas con instalaciones de almacenamiento adecuadas, y la reducción de los vertimientos de residuos mediante el monitoreo y control de la cantidad vertida (Buenrostro et al, 2000). Esquivel (2016) menciona que estas medidas contribuyen a un enfoque más sostenible y respetuoso con el medio ambiente en las actividades porcinas, minimizando el impacto ambiental de los vertimientos de excretas. Permitiendo a la vez la transformación hacia sistemas de producción más orgánicos y circulares, En este sentido, Alemán et al. (2014) argumenta que han surgido tecnologías como el biodigestor, que permiten el tratamiento adecuado de los residuos orgánicos producidos por la industria porcina, evitando su disposición inadecuada y reduciendo su impacto ambiental. Además, generan biogás, que puede ser utilizado como combustible para la producción de energía térmica y eléctrica, lo que podría reducir los costos energéticos en las granjas.

Una alternativa sostenible para el manejo de estos residuos es la digestión anaerobia en biodigestores. Este proceso permite producir y aprovechar el biogás generado durante la degradación controlada de la materia orgánica. El biogás está compuesto principalmente por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2) (Buenrostro et al, 2000). Teniendo en cuenta a Pilarska et al. (2023), el metano es un potente gas de efecto invernadero, por lo que su combustión

controlada para generar energía no solo reduce las emisiones a la atmósfera, sino que también desplaza el uso de combustibles fósiles.

El biogás puede ser utilizado directamente como combustible en calderas, motores de combustión interna y otros equipos para la generación de energía eléctrica y térmica. Esta energía renovable puede cubrir las necesidades térmicas y eléctricas de las propias granjas, reduciendo costos operativos, aunque esto depende de la situación particular de la granja o finca. Adicionalmente, Journal (2022) plantea que el efluente o biosólido generado luego de la digestión anaerobia es un fertilizante orgánico que puede reemplazar parcialmente el uso de fertilizantes químicos.

El presente proyecto plantea diseñar un biodigestor, utilizando como sustrato las excretas de cerdos en la finca Buenos Aires ubicado en el kilómetro 8 de la vía Bucaramanga-matanza. El biogás producido será cuantificado y caracterizado para determinar su potencial energético mediante la simulación en Aspen Plus.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Diseñar un biodigestor que funcione a partir de las excretas porcinas, para la producción de energía térmica en la finca Buenos Aires ubicado en el kilómetro 8 de la vía Bucaramanga-matanza.

1.2.2 Objetivos específicos

Realizar una vigilancia tecnológica para un análisis de las diferentes tecnologías, identificación parámetros y de los efectos derivados del diseño de un biodigestor a partir de excretas de origen porcino.

Simular el biodigestor seleccionado estudiando la capacidad de producción de excretas energética en el Software Aspen Plus.

Diseñar un biodigestor capaz de suplir las necesidades y capacidades de la finca buenos aires.

2. Marco referencial

2.1 Marco teórico

2.1.1 Excretas de cerdo

Según el ICA (2023), las excretas de cerdo abarcan los residuos orgánicos sólidos y líquidos que se generan en las operaciones de producción porcina, englobando tanto las heces como la orina de estos animales. De acuerdo con la Resolución 428 de 2021 del ICA, normativa técnica vigente en Colombia, las excretas de cerdo se definen como la mezcla de heces y orina producida en las instalaciones destinadas a la cría de cerdos, que contiene una variedad de nutrientes y otros componentes tanto orgánicos como inorgánicos.

2.1.2 Digestión anaeróbica

Leonardi (2020) aclara que la digestión anaerobia es un proceso biológico fundamental en el funcionamiento de un biodigestor, donde la materia orgánica en ausencia de oxígeno se transforma en biogás y una variedad de minerales (C, N, P, K, S) en su producto remanente líquido. Este proceso involucra una secuencia de reacciones bioquímicas facilitadas por microorganismos. Buenrostro et al., (2000) manifiesta que durante estas reacciones, una porción de los compuestos es completamente oxidada, convirtiendo el carbono en dióxido de carbono, mientras que otra porción experimenta una reducción significativa, dando como resultado la formación de metano.

La aproximación más actual y ampliamente empleada por la comunidad científica en este campo se basa en la subdivisión de este proceso en cuatro etapas o niveles tróficos: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis.

2.1.2.1 La hidrólisis. Consiste en la descomposición de materia orgánica compleja como celulosa, proteínas y lípidos en compuestos solubles más simples, como azúcares, aminoácidos y grasas, mediante la acción de enzimas extracelulares secretadas por las bacterias (Palù et al., 2022).

2.1.2.2 La acidogénesis. Los compuestos solubles son fermentados por las bacterias para producir ácidos grasos volátiles como el acético, propiónico y butírico, así como alcoholes e hidrógeno y dióxido de carbono. Esta etapa también se conoce como fermentación (Palermi et al., 2021).

2.1.2.3 La acetogénesis. La llevan a cabo bacterias acetogénicas que oxidan los ácidos propiónico y butírico a ácido acético e hidrógeno, que son los verdaderos sustratos para la metanogénesis (Palù et al., 2022).

2.1.2.4 Metanogénesis. Etapa fundamental en la producción de biogás, ya que en esta fase se genera el metano, el componente principal y más valioso del biogás. (Pengjiao Tian, 2022).

2.1.3 Biodigestores

Un biodigestor es un recipiente sellado, hermético e impermeable, conocido como reactor, en el que se introduce una cantidad de materia orgánica que se fermenta en agua para obtener gas metano y fertilizantes ricos en nitrógeno, fósforo y potasio. Gracias a la fermentación anaerobia que ocurre en el biodigestor, se logra reducir el porcentaje de contaminantes derivados de los excrementos y otros residuos orgánicos. De esta manera, el biodigestor se convierte en una herramienta eficiente y sostenible para la producción de biogás y fertilizantes a partir de los residuos orgánico (Buenrostro et al., 2000).

2.1.4 Tipos de biodigestores

Una serie de opciones de diseño para biorreactores anaerobios se han explorado en investigaciones recientes. Chavarría (2019) se centró en el diseño de un digestor anaeróbico básico para la producción de biogás a partir de aguas residuales de café (Chavarria, 2014), mientras que discutió la aplicación de la digestión anaeróbica en el tratamiento de residuos porcinos (Ávila-Hernández et al., 2018). Leonardi (2020) profundizó en el diseño, caracterización, modelado y optimización de fotobiorreactores para el cultivo de microalgas y la producción de metabolitos biotecnológicamente relevantes. Estos estudios destacan colectivamente las diversas posibilidades de diseño de biorreactores anaerobios, cada uno adaptado a aplicaciones específicas y tipos de residuos (Leonardi, 2020). Por otro lado, en el manual de biogás de la Organización de las Naciones Unidas, se clasifican los biodigestores según su modo de operación con relación a su

alimentación o carga en tres tipos: continuo, semicontinuo o fed-batch y discontinuo o batch (Chavarria, 2014).

2.1.4.1 Biodigestor continuo o de flujo continuo. Cuando el proceso de alimentación del digestor se realiza de forma continua e ininterrumpida, el efluente que se descarga es equivalente al afluente, generando así una producción uniforme de biogás. Estos sistemas son mayormente utilizados para tratar aguas residuales, donde se emplean equipos comerciales para alimentar y mantener los digestores, proporcionándoles calefacción y agitación adecuadas para un proceso de fermentación eficiente (Alemán-Nava et al., 2014).

2.1.4.2 Modo semicontinuo o fed-batch. En el proceso de introducción de la primera carga al digestor, se emplea una gran cantidad de materias primas, seguido de la adición de volúmenes de nuevas cargas de acuerdo con el tiempo de retención hidráulico (TRH) y al volumen total del digestor. El efluente que se descarga es equivalente al afluente que se incorporó, manteniendo un balance constante en el sistema. Este proceso es comúnmente utilizado en zonas rurales y para sistemas de pequeña escala destinados al uso doméstico (FAO, 2020).

2.1.4.3 Modo discontinuo o batch. Los biodigestores son cargados con una única carga o lote de materia orgánica, la cual es fermentada durante un periodo de tiempo específico para producir biogás y otros subproductos útiles. Cuando el contenido de materias primas ha disminuido y la producción de biogás ha disminuido mucho, se vacía completamente el digestor para comenzar un nuevo ciclo de fermentación con una carga de materias primas frescas (FAO, 2020).

2.1.5 Parámetros óptimos para el funcionamiento de un biodigestor

Para el buen funcionamiento de un biodigestor se debe tener en cuenta ciertos parámetros fisicoquímicos que se deben mantener, como se ve en la Tabla 1 se dan a conocer los parámetros óptimos de un biodigestor mostrando los rangos óptimos para los principales parámetros para el funcionamiento de un biodigestor (Agricultura, 2019).

Tabla 1. *Parámetros de diseño de un biodigestor*

Parámetro	Rango óptimo
Temperatura (C°)	30 – 35
Ph	6,8 – 7,5
Relación C/N	20:1 – 30:1
Tiempo de retención (días)	10 - 25
Relación agua/sólidos	6 - 10

Adaptado de (Agricultura, 2019).

2.1.5 Sistema de agitación

Ávila et al. (2018) garantiza que el sistema de agitación permite la homogeneización de la materia orgánica dentro del reactor y facilitar la liberación de las burbujas de biogás atrapadas en el fondo, lo cual es crucial para optimizar la producción de biogás hasta en un 30%. Este proceso de agitación puede realizarse con varios métodos, dependiendo del diseño específico del reactor. Entre las opciones disponibles se encuentran los sistemas mecánicos que emplean hélices, paletas o rastrillos ubicados en el interior del reactor, así como los sistemas hidráulicos que recirculan el flujo dentro del reactor mediante bombas.

2.1.6 Tiempo de Retención Hidráulica (TRH) en Biodigestores

El Tiempo de Retención Hidráulica (TRH) en un biodigestor es el tiempo que tarda la biomasa en pasar por el sistema. Este es un parámetro crucial que determina la eficiencia del

proceso de digestión anaerobia ya que afecta el tiempo de degradación de la materia orgánica para convertirse en biogás dentro del biodigestor (Pengjiao Tian, 2022).}

disponible: es la cantidad que puede ser recolectada para cargar en un biodigestor, y siempre es menor o igual al estiércol diario producido por los animales. En cerdos estabulados en corrales con piso de cemento, el estiércol disponible es igual al estiércol diario, ya que se puede recolectar fácilmente. En cambio, para vacas que están semi estabuladas, parte del estiércol se pierde en los pastizales y no puede ser aprovechado. La cantidad de estiércol disponible depende de las horas que los animales pasan en áreas donde se pueda recolectar (Rojas, 2023).

2.1.7 Biogás

Chaúr (2002) afirma que el biogás es una mezcla gaseosa formada por la descomposición de la materia orgánica en ausencia de oxígeno, con composición de metano y dióxido de carbono, pero también con impurezas. A continuación, se presenta en la Tabla 2 los principales componentes del biogás.

Tabla 2. Composición química del biogás

Compuesto	Formula	Porcentaje (%)
Metano	CH ₄	40 – 70
Dióxido de Carbono	CO ₂	30 – 60
Nitrógeno	N ₂	0.5
Hidrogeno	H ₂	0.1
Monóxido de Carbono	CO	0.1
Oxigeno	O ₂	0.1
Sulfuro de Hidrogeno	H ₂ S	0.1

Nota. La tabla describe la composición química del biogás, detallando los compuestos que lo conforman junto con sus respectivas fórmulas químicas y porcentajes en los que hay. Ajustada de (Escamilla, 2010).

2.2 Marco conceptual

2.3 Marco legal

Tabla 3. *Marco legal*

Normatividad	Descripción
Ley 1715 del 13 de mayo del 2014	Busca promover el uso de fuentes de energía renovable no convencional en el sistema energético nacional, con el fin de lograr un desarrollo económico sostenible, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y mejorar la seguridad en el abastecimiento energético (GOV.CO, 2014)
Ley 1259 del 2008	Crea e implementa el comparendo ambiental para generar cultura ciudadana sobre el manejo adecuado de residuos sólidos y escombros, previniendo la afectación al medio ambiente y la salud pública a través de sanciones pedagógicas y económicas (GOV.CO, 2008)
Ley 1665 del 16 de julio 2013	Crea el Estatuto de la Agencia Internacional de Energías Renovables, promueve la implantación generalizada y el uso sostenible de todas las formas de energía renovable, considerando sus beneficios ambientales, económicos y sociales (Congreso de la República, 2013).
Ley 2128 del 4 de agosto de 2021	Por medio de la cual se promueve el abastecimiento, continuidad, confiabilidad y cobertura del gas combustible en el país (Congreso de la República, 2021).
Artículo 5 del Decreto 1713 de 2002	Establece que la responsabilidad por los efectos ambientales y en la salud pública del servicio de aseo recae en la persona prestadora, excepto cuando se realiza la actividad de aprovechamiento (Presidencia de la República, 2002).
Artículo 7 del decreto 838 de 2005	Define los instrumentos de planificación de la actividad de disposición final en el servicio de aseo, entre ellos los PGIRS, POT, licencia ambiental, RAS y reglamento operativo (Presidencia de la República, 2005).
NTC 5167 del 15 de junio de 2004	Establece los requisitos y ensayos a los que deben someterse los productos orgánicos como abonos o fertilizantes (ICONTEC, 2022).

Nota. La tabla describe el marco legal relevante para la gestión de energía renovable, residuos y servicios ambientales en Colombia, enumerando diversas leyes, resoluciones y normativas que regulan estos aspectos.

3. Método

Para el desarrollo del proyecto, se utilizará una metodología de investigación mixta. Hernández et al. (2019) describe que este enfoque se caracteriza por combinar enfoques cualitativos y cuantitativos, integrando datos numéricos y descriptivos para una comprensión más completa. En el diseño del biodigestor, permite analizar tanto las propiedades técnicas del sistema (datos cuantitativos) como las necesidades y percepciones de los usuarios (datos cualitativos), garantizando un diseño eficiente y adaptado al contexto.

3.1 Etapa 1: vigilancia tecnológica de análisis de los parámetros y de los efectos que tiene el diseño de un biodigestor a partir de excretas de origen porcino

Esta etapa da cumpliendo al primer objetivo de la investigación por lo cual se realizará un análisis comparativo de las diferentes tecnologías para seleccionar la que más se acople a las necesidades de esta investigación, se plantearon las siguientes:

3.1.1 Búsqueda de información

Se busco información relacionada con las tecnologías de biodigestores, especialmente las que utilizan excretas porcinas como materia prima para el periodo de 2013-2024, en la base de datos de SCOPUS mediante una ecuación de búsqueda para recopilar información de artículos científicos que permita validar el diseño y la simulación y ESP@CENET para consolidar información sobre desarrollos tecnológicos patentados, relevantes en este campo (Leonardi, 2020).

3.1.2 Análisis de la información

Una vez recopilada la información, se realizó un análisis comparativo de las diferentes tecnologías identificadas considerando variables como características técnicas, costos asociados, rendimientos energéticos e impactos ambientales (Leonardi, 2020).

3.1.3 Selección de los parámetros

Con base en el análisis de la información recopilada, se seleccionó la tecnología del biodigestor que mejor se adapte a las condiciones de la Finca Buenos Aires y los objetivos de esta investigación (Leonardi, 2020).

3.2 Etapa 2: simulación del biodigestor seleccionado estudiando la capacidad de producción de excretas energética en el Software Aspen Plus

Esta etapa da cumplimiento al segundo objetivo de la investigación, que se centra en evaluar la capacidad de producción de energía del biodigestor seleccionado. Para alcanzar este objetivo, se han planificado las siguientes actividades:

3.2.1 Selección de modelo termodinámico para la simulación en Aspen Plus®

Según (Bruce E. Rittmann, 2001) para seleccionar el modelo termodinámico se tuvo en cuenta que sea capaz de representar con precisión los procesos bioquímicos y fisicoquímicos de la digestión anaerobia en cinco etapas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis, y metanogénesis, para ello se tendrá en cuenta los resultados de la revisión bibliográfica de la etapa 1.

3.2.2 Selección de una cinética conocida para la simulación en Aspen Plus®

Una vez seleccionado el modelo termodinámico que indica la dirección de la reacción, se seleccionó una cinética conocida que calcula la velocidad de las diferentes reacciones químicas. Se revisará la literatura científica y se investigará la cinética que se ajuste a las características del sistema. Considera la disponibilidad de datos experimentales y la capacidad del modelo cinético para describir la conversión de sustratos en productos finales, como este caso el biogás (Pengjiao -Tian, 2022).

3.2.3 Definición de características, variables y parámetros de entrada para la simulación en Aspen Plus®

Para definir las características, variables y parámetros de entrada necesarios se tuvo en cuenta el análisis de la información encontrada en la etapa 1, con el fin de tener datos necesarios como las condiciones de operación (temperatura, presión, pH, tasa de carga orgánica, etc.), las propiedades termodinámicas de los componentes y cualquier otro dato relevante para la simulación.

3.2.4 Desarrollo de diagrama de flujo del proceso y ejecución de la simulación

En esta etapa, y siguiendo la metodología de los diagramas de flujo se desarrolló un diagrama en Aspen plus del proceso, que incluya todos los equipos utilizados, componentes químicos, las corrientes involucradas y todos los aspectos necesarios en el proceso del biodigestor (Leonardi, 2020) y así poder ejecutar la simulación y así se obtuvo los resultados finales.

3.2.5 Validación de la simulación, análisis y conclusiones

En esta etapa se buscó validar los resultados de la simulación propuesta mediante la comparación de datos experimentales registrados en la literatura de sistemas similares. Esto permite verificar la precisión de la simulación y detectar posibles errores o inconsistencias.

3.3 Etapa 3: diseño de un biodigestor en AutoCAD para la Finca Buenos Aires

Esta etapa cumple con el tercer objetivo de la investigación, que se enfoca en el diseño concreto del biodigestor que se implementó en la Finca Buenos Aires. Para lograrlo, se llevó a cabo las siguientes actividades:

3.3.1 Diseño del biodigestor

Para esta actividad, se planificó y diseñó de forma detallada el biodigestor utilizando el software AutoCAD. Se definió las especificaciones técnicas, las dimensiones, los materiales de construcción y todos los componentes necesarios para la implementación del sistema. Además, se consideraron los resultados de la simulación previa en Aspen Plus para optimizar el diseño en términos de eficiencia energética y sostenibilidad ambiental (Díaz y Salazar , 2020).

3.3.2 Presupuesto

Se realizó un presupuesto con los costos asociados al diseño de biodigestor, incluyendo materiales, mano de obra y equipos necesarios (Díaz y Salazar , 2020).

4. Resultados y análisis

El proyecto adoptó una metodología de investigación mixta, combinando enfoques cualitativos y cuantitativos para obtener una comprensión integral del tema. Esta metodología, basada en la propuesta de Hernández et al. (2019), permitió recolectar y analizar datos diversos para ofrecer una perspectiva más completa y detallada. A continuación, se presentan los resultados obtenidos.

4.1 Etapa 1: análisis de vigilancia tecnológica de los parámetros y de los efectos que tiene el diseño de un biodigestor a partir de excretas de origen porcino

En esta primera etapa de análisis de información permitió identificar los parámetros clave y evaluar los efectos de diferentes diseños y tecnologías en el rendimiento del biodigestor. Este proceso no solo aseguro que se utilicen las mejores prácticas disponibles, sino que también permitió anticipar y mitigar posibles problemas técnicos, garantizando un rendimiento óptimo y sostenible del sistema.

4.1.1 Búsqueda de información

Se realizo la búsqueda de la información relacionada con las tecnologías de biodigestores, especialmente las que utilizan excretas porcinas como materia prima para el periodo de 2013-2024, utilizando una búsqueda avanzada en la base de datos de SCOPUS de la Universidad Santo Tomás, considerando la siguiente ecuación de búsqueda en mayo del 2024:

ALL (“biodigestor” OR “biogas” OR “anaerobic digestion”) AND ALL (“pig manure” OR “swine manure” OR “pig excreta” OR “swine excreta”) AND PUBYEAR > 2012 AND

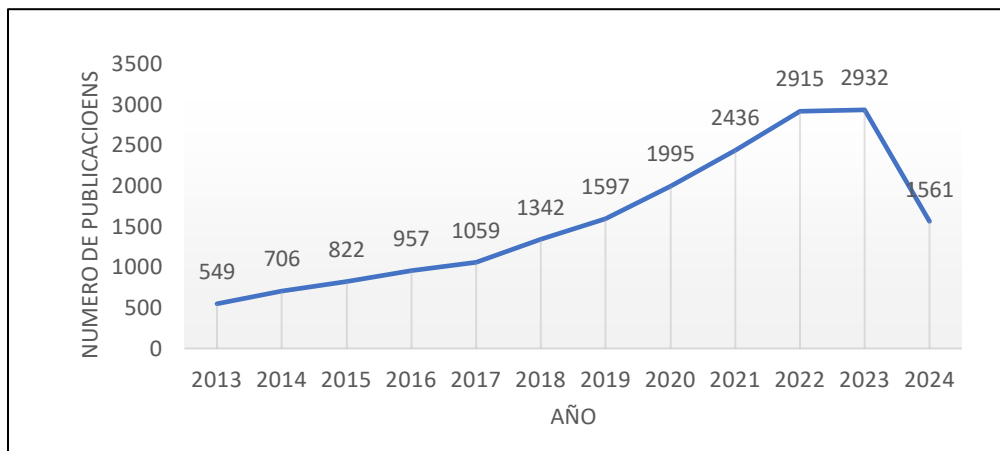
PUBYEAR < 2025. De la cual se obtuvieron más de 47 artículos, de la base de datos de SCOPUS®. Realizado (23/05/2024).

4.1.2 Análisis de la información

Se identificaron un total 47 artículos científicos, luego de la revisión de estos se seleccionaron 20, Se seleccionaron únicamente aquellos que abordaban la producción de biogás mediante biodigestores de excretas porcinas, según el análisis del título, resumen y palabras clave y se excluyeron estudios preliminares, no revisados por pares o con limitaciones metodológicas significativas. Con cuales se pudo lograr tener la descarga en Scopus, a partir de los cuales se realizó el siguiente análisis bibliométrico:

En la figura 1, se observa un crecimiento en el número de publicaciones en el área de estudio desde 2013 hasta el 2024. Este incremento se atribuye a diversas razones, entre las que se incluyen la necesidad de gestionar de manera sostenible los residuos orgánicos, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y los avances tecnológicos en la digestión anaeróbica. El biogás es una fuente de energía renovable muy eficiente y asequible que puede ser producida a partir de diversos tipos de biomasa, en este caso tendremos como materia prima las excretas porcinas. Los avances en investigación y tecnología han mejorado la eficiencia y rentabilidad de la producción de biogás, lo que ha generado un mayor interés en esta tecnología. En general, la creciente preocupación por el medio ambiente, el aumento en la disponibilidad de biomasa y los avances tecnológicos han impulsado el interés en la producción de biogás mediante biodigestores, evidenciándose en el incremento de la producción científica en esta área.

Figura 1. Dinámica de publicaciones de los últimos 12 años en producción de biogás por digestión anaeróbica de excretas porcinas



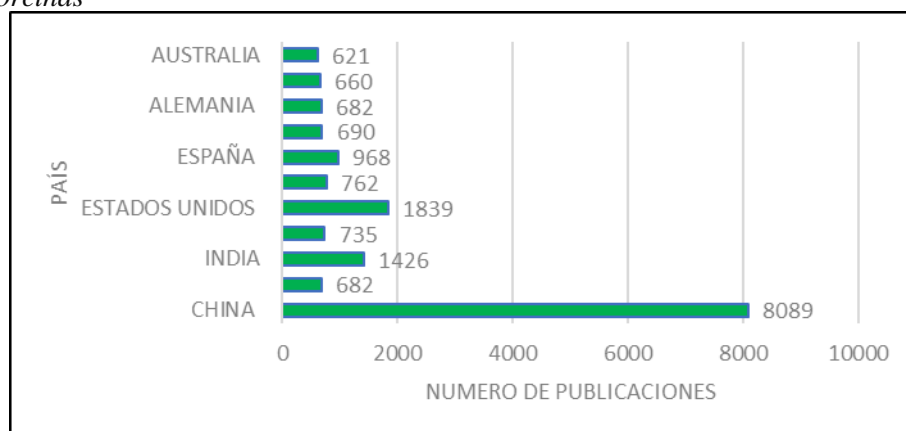
Nota. La figura proporciona una visión clara de cómo ha evolucionado la investigación en la producción de biogás por digestión anaeróbica de excretas porcinas en los últimos 12 años, destacando tendencias, picos y fluctuaciones que reflejan el desarrollo y el interés científico en este campo. Adaptado de base de los datos de (Scopus,2024).

Por consiguiente, se realizó un análisis de distribución geográfica de las publicaciones en producción de biogás por digestión anaeróbica de excretas porcinas en la figura 2, se puede apreciar que china es el país con mayor número de publicaciones científicas en el área de estudio, lo cual está directamente relacionado con su posición como el mayor productor y generador de biogás por digestión anaeróbica en el mundo, con una producción anual significativa que contribuye notablemente a su matriz energética (Palù et al., 2022). Le sigue Alemania, quien también es importante actor en mercado de biogás, con una infraestructura avanzada y reglas políticas de apoyo que han fomentado al desarrollo de tecnologías de digestión anaeróbica (Godswill et al., 2023). En cuanto a Latinoamérica, Brasil es el país con la mayor generación de artículos y documentos científicos en el desarrollo de tecnologías de biogás a partir de excretas porcinas, esto es debido a su amplio sector agropecuario y sus enfoques en las soluciones

sostenibles para el adecuado manejo de los residuos orgánicos generados en los distintos sectores ubicado en sus zonas.

Actualmente, Brasil es el líder en diversos proyectos de investigación y desarrollo en este campo, destacando el Programa Nacional de Producción y uso de Biogás (PNPB), donde la mayoría de estas investigaciones y proyectos en ejecución han adelantado con las diferentes participaciones de universidades y centros de investigación (Journal, 2022).

Figura 2. Distribución geográfica de las publicaciones en producción de biogás por digestión anaeróbica de excretas porcinas



Nota. La figura muestra la distribución del número de publicaciones sobre la producción de biogás por digestión anaeróbica de excretas porcinas en diferentes países durante los últimos 12 años. Recuperada de base de datos de Scopus.

A continuación, se realizó un análisis de redes de información partiendo de los resultados encontrados a través de la creación de un mapa de términos utilizando el Software VOSviewer el cual se muestra en la figura 3. Donde se identificaron 3 términos que destacan más en esta área de investigación.

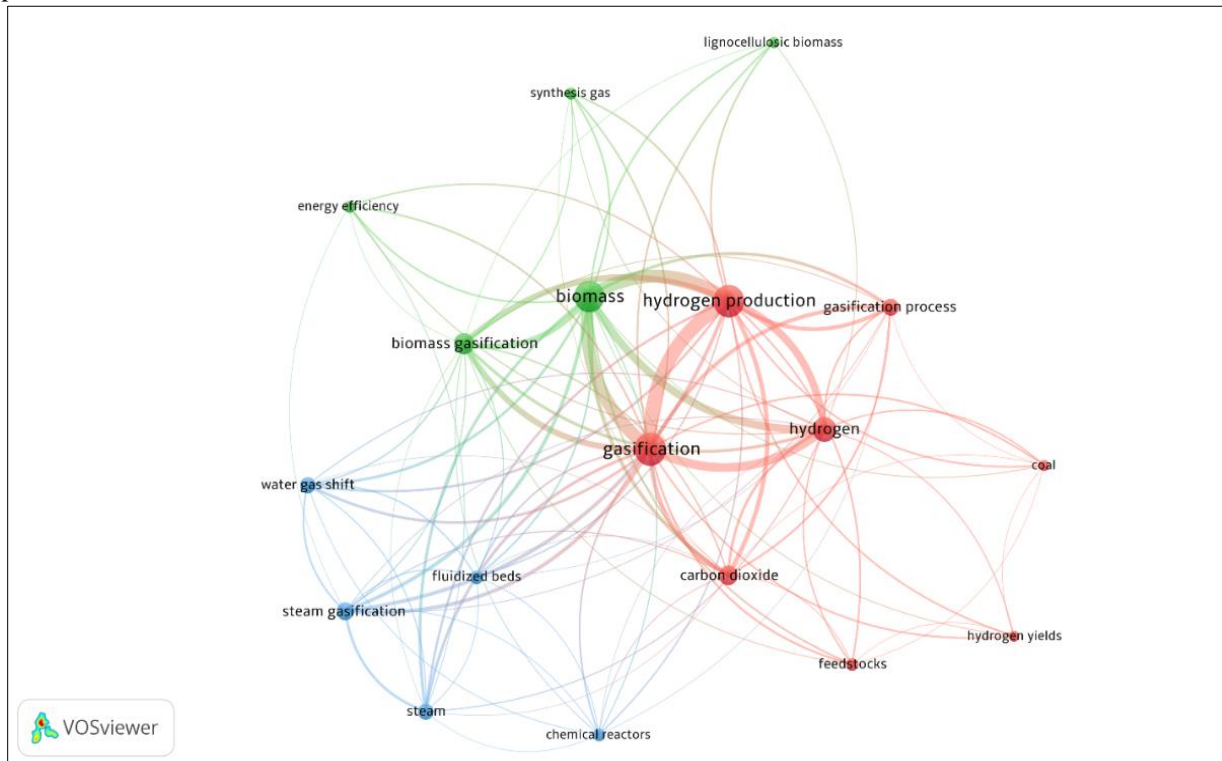
El primer término se centró en química, bacterias, metabolismo, comunidad microbiana, aguas residuales y tratamientos de aguas residuales. Estos términos están relacionados con los aspectos microbiológicos y químicos del proceso de digestión anaerobia. Ya que resalta la importancia de entender los procesos biológicos de la digestión anaeróbica, teniendo en cuenta

también las comunidades microbianas y su metabolismo son esenciales para la conversión eficiente de las excretas porcinas en la producción de biogás. Además, el tratamiento de estas aguas residuales y sus procedimientos controlados son importantes para la optimización de procesos y así garantizar la sostenibilidad y eficiencia del sistema (Ramos y Ritter, 2019).

El segundo termino se enfoca en el manejo de residuos orgánicos y su uso como fertilizantes. Los cuales abordan términos claves como amoniaco, compostaje, fertilizantes, estiércol y nitrógeno. Estos términos destacan por su relación entre la producción de biogás y la gestión de residuos orgánicos, ya que el proceso de digestión anaerobia no solo permite generar energía, sino también obtener subproductos valiosos como el compost y los fertilizantes. En este contexto, el manejo adecuado del amoniaco y del nitrógeno resulta crucial, tanto para minimizar los impactos ambientales como para optimizar el uso eficiente de los nutrientes en actividades agrícolas, lo que contribuye a mejorar la sostenibilidad de estos procesos. (Möller y Müller, 2012a).

El tercer termino se centra en los aspectos específicos de la producción de biogás y metano, dando términos como: digestión anaeróbica, biogás, biomasa, y metano. Con estos términos podemos saber la importancia de la digestión anaeróbica como proceso clave para la producción de biogás a partir de biomasa, en particular excretas porcinas. El enfoque en el término metano es muy esencial, ya que es el componente principal del biogás y su producción eficiente es de gran importancia para su viabilidad económica y energética del proceso (Ramos y Ritter, 2019).

Figura 3. Mapa de términos de producción de biogás por digestión anaeróbica de excretas porcinas



Nota. La figura evidencia la complejidad y la interconexión de diferentes aspectos de la investigación sobre la producción de biogás por digestión anaeróbica, mostrando cómo se agrupan y se relacionan los términos clave en las publicaciones científicas. Tomado de (VOSviewer, 2024).

A continuación, se presenta la Tabla 4 con los resultados encontrados en el motor de búsqueda de Scopus a partir de la ecuación planteada, solo se evidencio los primeros 5 artículos en esta parte del documento debido a que es una tabla muy extensa, por lo tanto la información con los 20 artículos se encuentra en el Apéndice A

Tabla 4. *Matriz de información de artículos encontrados en Scopus*

Nº	Título del artículo	Temperatura de operación	Tipo de biodigestor	Rendimiento o energético	Impactos ambientales	Carga orgánica	pH	Referencias bibliográficas
1	Implementación de una alternativa de aprovechamiento del Bagazo de fique (furcraea macrophylla) a través de la Generación de biogás en una unidad productiva del municipio de Jambaló-Cauca	El proceso de generación de biogás a partir del bagazo de fique opera a una temperatura típica de entre 25°C y 40°C, adecuada para la actividad óptima de los microorganismos anaerobios involucrados en la digestión.	Se implementa un biodigestor de tipo batch (por lotes), que permite el tratamiento intermitente de la carga orgánica proveniente del bagazo de fique. Este diseño es eficiente para las condiciones operativas específicas de la unidad productiva en Jambaló, Cauca.	El sistema muestra un rendimiento energético significativo, con la producción de biogás que posteriormente se convierte en energía térmica y eléctrica para los procesos internos de la unidad productiva. Se estima que la eficiencia energética alcanza hasta un 70% de aprovechamiento del potencial energético del biogás generado.	La implementación de este sistema de aprovechamiento del bagazo de fique mediante la generación de biogás tiene impactos ambientales positivos, reduciendo la emisión de gases de efecto invernadero al capturar metano que de otro modo sería liberado a la atmósfera. Además, contribuye a la gestión sostenible de los residuos orgánicos y fomenta prácticas agrícolas más sostenibles en la región.	La carga orgánica manejada en el biodigestor está diseñada para procesar eficientemente el bagazo de fique generado por la unidad productiva, adaptándose a los volúmenes y composición específica de estos residuos agrícolas.	El pH óptimo para el proceso anaeróbico en el biodigestor se mantiene en un rango de 6.5 a 7.5, asegurando condiciones adecuadas para la actividad microbiana responsable de la descomposición anaeróbica del bagazo de fique.	Urresty Sánchez, E. A. (2019). Implementación de una alternativa de aprovechamiento del bagazo de fique (Furcraea Macrophylla) a través de la generación de biogás en una unidad productiva del municipio de Jambaló-Cauca [PhD Thesis, Uniautónoma del Cauca. Facultad de Ciencias Ambientales y Desarrollo ...]. https://repositorio.uniautonomo.edu.co/xmlui/bitstream/handle/123456789/252/T%20IA-P%20118%202019.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Nº	Título del artículo	Temperatura de operación	Tipo de biodigestor	Rendimiento energético	Impactos ambientales	Carga orgánica	pH	Referencias bibliográficas
2	Plan de negocios para la producción de lechones en el área rural de Suaita Santander	El sistema de biodigestión diseñado para el tratamiento de residuos orgánicos en el plan de negocios para la producción de lechones en el área rural de Suaita, Santander, opera a una temperatura controlada entre 35°C y 40°C. Estas condiciones son ideales para promover la actividad de los microorganismos anaeróbicos responsables de la producción de biogás.	Se emplea un biodigestor de tipo continuo, específicamente un biodigestor de mezcla completa, adecuado para el manejo constante de la carga orgánica proveniente de los desechos de la producción porcina. Este tipo de biodigestor garantiza una eficiencia constante en la producción de biogás a lo largo del tiempo.	El sistema muestra un rendimiento energético significativo, convirtiendo los desechos orgánicos en biogás que puede ser utilizado para la generación de calor y electricidad en la operación de la granja porcina. Se estima que el rendimiento energético alcanza hasta un 60% de aprovechamiento del potencial energético del biogás generado.	La implementación del biodigestor en el plan de negocios para la producción de lechones tiene impactos ambientales positivos. Reduce la contaminación ambiental al capturar y utilizar el metano que de otro modo contribuiría al efecto invernadero. Además, promueve prácticas agrícolas más sostenibles al gestionar eficientemente los residuos orgánicos y reducir la dependencia de fuentes energéticas no renovables.	El biodigestor está diseñado para manejar eficazmente la carga orgánica generada por la producción de lechones en la granja, adaptándose a los volúmenes y composición específica de los desechos orgánicos producidos.	El pH óptimo para el proceso anaeróbico en el biodigestor se mantiene cuidadosamente controlado en un rango de 6.8 a 7.2, asegurando condiciones ideales para la actividad microbiana responsable de la descomposición de los residuos orgánicos y la producción de biogás.	Urrego Peña, G. (2016). Plan de negocios para la producción de lechones en el área rural de Suaita Santander [PhD Thesis, Universidad Santo Tomás].

N°	Título del artículo	Temperatura de operación	Tipo de biodigestor	Rendimiento energético	Impactos ambientales	Carga orgánica	pH	Referencias bibliográficas
3	Zeolita natural ecuatoriana: un adsorbente de amoníaco eficaz para mejorar la producción de metano a partir de desechos porcinos	La temperatura de operación del biodigestor en el estudio se mantuvo en un rango mesofílico, típicamente entre 35°C y 40°C, lo que es ideal para maximizar la actividad microbiana y la producción de metano.	El tipo de biodigestor utilizado en el estudio fue un biodigestor de flujo continuo, diseñado para permitir una entrada constante de desechos porcinos y una salida continua de biogás y digestato, optimizand o así el proceso de digestión anaeróbica.	El rendimiento energético se observó en términos de la producción de metano. La inclusión de zeolita natural ecuatoriana como adsorbente resultó en un incremento significativo en la producción de metano, con tasas de generación de biogás superiores a las obtenidas sin el uso de zeolita.	El uso de zeolita como adsorbente de amoníaco redujo la toxicidad del amoníaco en el digestor, lo que no solo mejoró la eficiencia de la digestión anaeróbica, sino que también disminuyó las emisiones de amoníaco a la atmósfera. Esto contribuyó a una reducción de los impactos ambientales negativos asociados con la gestión de desechos porcinos.	La carga orgánica en el biodigestor se mantuvo a niveles óptimos para la producción de biogás. La presencia de zeolita ayudó a manejar mejor la alta carga orgánica de los desechos porcinos al adsorber el amoníaco, evitando su acumulación y potencial inhibición del proceso microbiano.	El pH del biodigestor se mantuvo dentro del rango óptimo para la digestión anaeróbica, generalmente entre 6.5 y 7.5. La zeolita contribuyó a estabilizar el pH, previniendo fluctuaciones que podrían afectar negativamente la actividad de los microorganismos metanogénicos.	Ruiz-Bastidas, R. C., Turnes, G., Palacio, E., & Cadavid-Rodríguez, L. S. (2023). Natural Ecuadorian zeolite: An effective ammonia adsorbent to enhance methane production from swine waste. <i>Chemosphere</i> , 336, 139098. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139098

Nº	Título del artículo	Temperatura de operación	Tipo de biodigestor	Rendimiento energético	Impactos ambientales	Carga orgánica	pH	Referencias bibliográficas
4	Evaluación de biodigestores tubulares de polietileno y PVC en el tratamiento de aguas residuales porcinas Evaluación de los biodigestores en geomembrana (pvc) y plástico de invernadero en clima medio para el tratamiento de aguas residuales de origen porcino	Los biodigestores utilizados en el tratamiento de aguas residuales porcinas operan a temperaturas mesofílicas, generalmente entre 25°C y 35°C. Esta temperatura es crucial para la actividad de las bacterias metanogénicas que descomponen la materia orgánica y producen biogás. En climas medios, se mantiene una temperatura constante dentro de los biodigestores utilizando aislamiento adecuado y, en algunos casos,	En este estudio, se evaluaron dos tipos de biodigestor es: los de geomembrana de PVC y los de plástico de invernadero . Ambos tipos de biodigestor es son tubulares, diseñados específicamente para el tratamiento de aguas residuales porcinas. Los biodigestores de geomembrana de PVC son conocidos por su durabilidad y resistencia a las condiciones ambientales	El rendimiento energético de los biodigestores se mide en términos de la cantidad de biogás producido por unidad de carga orgánica tratada. En promedio, los biodigestores evaluados en este estudio produjeron entre 0.3 y 0.6 m ³ de biogás por kilogramo de demanda química de oxígeno (DQO) eliminada. Este biogás puede ser utilizado como fuente de energía renovable, contribuyend	El uso de biodigestores para el tratamiento de aguas residuales porcinas tiene varios impactos positivos. La reducción de la carga orgánica en los efluentes minimiza la contaminación de cuerpos de agua receptores. Además, la producción de biogás reduce las emisiones de gases de efecto invernadero, particularmente metano, que es un gas con un potencial de calentamiento global significativamente mayor que el dióxido de carbono. El digestato, subproducto del proceso, puede ser utilizado	La carga orgánica de las aguas residuales porcinas tratadas en los biodigestores se mide típicamente en términos de DQO y demanda bioquímica de oxígeno (DBO). En este estudio, se registraron valores iniciales de DQO entre 4000 y 6000 mg/L. Los biodigestores lograron una eficiencia de remoción de DQO superior al 70%, lo que indica una alta capacidad de tratamiento de la materia orgánica presente en los residuos porcinos.	El pH es un parámetro crítico en el funcionamiento de los biodigestores, ya que afecta la actividad microbiana. Los biodigestores operaron en un rango de pH óptimo para la metanogénesis, que es entre 6.5 y 7.5. Se monitoreó y ajustó regularmente el pH del sistema mediante la adición de sustancias alcalinas o ácidas, según fuera necesario, para mantener las condiciones ideales para la producción de biogás y la eficiencia del tratamiento.	Pedraza, G., Chará, J., Conde, N., Giraldo, S., & Giraldo, L. (2002). Evaluation of polyethylene and PVC tubular biodigesters in the treatment of swine wastewater. Livestock Research for Rural Development, 14(1), 10-28. Scopus.

N°	Título del artículo	Temperatura de operación	Tipo de biodigestor	Rendimiento energético	Impactos ambientales	Carga orgánica	pH	Referencias bibliográficas
		sistemas de calefacción auxiliares.	, mientras que los biodigestores de plástico de invernadero son más económicos y fáciles de instalar.	o a la autosuficiencia energética de las granjas porcinas.	como fertilizante orgánico, cerrando así el ciclo de nutrientes.			

En cuanto a los beneficios ambientales, los estudios destacan la capacidad de los biodigestores para mitigar impactos ambientales negativos, como la contaminación del agua y el suelo. Según Ankathi et al., (2024) el proceso de biodigestión permite reducir la carga orgánica y los contaminantes de los efluentes tratados, lo que atenúa los impactos negativos en los ecosistemas locales. Las excretas no tratadas, comúnmente son vertidas al aire libre, lo que suele causar contaminación y degradación del suelo, además de filtraciones en cuerpos de agua cercanos, generando eutrofización debido a las altas concentraciones de nutrientes y patógenos presentes en estos desechos (Ankathi et al., 2024a). Asimismo, Ferreira et al., (2024) referencia una disminución significativa de olores y emisiones de gases de efecto invernadero en los biodigestores, en particular en el gas metano debido a que este gas es capturado en los digestores para su aprovechamiento energético en las fincas (Ferreira et al., 2024).

En cuanto a la información encontrada en los 20 artículos, estos mencionan un buen rendimiento energético derivado de la conversión de residuos orgánicos en biogás, sin embargo, esta eficiencia varía según el tipo de biodigestor utilizado, la carga orgánica aplicada y las condiciones operativas específicas (Ankathi et al., 2024b; Liu et al., 2024; Mosquera et al., 2024; Urresty Sánchez, 2019).

Es importante resaltar dos tipos de biodigestores: aquellos que incorporan sistemas activos de calefacción y agitación, y los biodigestores no equipados de sistemas activos. Los biodigestores equipados con sistemas activos de calefacción y agitación presentan un rendimiento energético que oscila entre el 50% y el 80%. En contraste, los biodigestores que carecen de estos sistemas de monitoreo muestran rendimientos entre el 30% y el 60%. (Mosquera et al., 2024; Pedraza et al., 2022; Thy et al., 2015a; Urresty Sánchez, 2019). Aunque los biodigestores con sistemas activos ofrecen un mayor rendimiento energético, su elevado costo de operación y mantenimiento los hace

más adecuados para aplicaciones a gran escala. En estos casos, se producen mayores volúmenes de biogás destinados a usos industriales y comerciales, lo cual compensan los costos adicionales asociados a la operación y mantenimiento de los sistemas activos (Liu et al., 2024; Mosquera et al., 2024).

En cambio, para aplicaciones domésticas en pequeñas y medianas fincas, la alta inversión necesaria para los sistemas activos no se justifica. En estos casos, los biodigestores de bajo costo resultan más apropiados, ya que aprovechan fenómenos naturales como la gravedad, la hidráulica y la calefacción solar, permitiendo una generación de biogás económica, constante y suficiente para satisfacer las necesidades energéticas domésticas de la mayoría de estas fincas (Urresty Sánchez, 2019).

Según Martí (2019) a nivel mundial se usan principalmente dos tipos de biodigestores de bajo costo, los biodigestores de domo fijo y los biodigestores tubulares. Las ventajas del biodigestor de domo fijo son: primero, requiere menos agua para la carga en comparación con los biodigestores tubulares debido a que presentan menos obstrucciones, también, al estar enterrado, el biodigestor de domo fijo ocupa menos espacio en la finca y mantiene presiones de biogás más elevadas. Sin embargo, presenta diferentes desventajas, una de estas es el uso limitado en Latinoamérica, esto es por varios factores. En primer lugar, el uso de materiales pesados como el ladrillo y el cemento, y la necesidad de mano de obra especializada en albañilería incrementan significativamente su costo. Además, existe una falta de experiencia consolidada en la región, lo que dificulta el acceso a información técnica y de operación, también, este tipo de biodigestor no es adecuado para climas fríos, como los de los Andes, debido a su diseño enterrado y finalmente, el transporte de los materiales necesarios para su construcción incrementa los costos, especialmente en áreas de difícil acceso (Martí, 2019a).

Aunque, los biodigestores tubulares requieren una mayor cantidad de agua en la alimentación para evitar obstrucciones y requieren tanques externos para mejorar la presión y el almacenamiento del biogás. También se adaptan a climas fríos con calefacción solar pasiva, son sencillos de instalar con un tiempo estimado de 1 a 2 días, son económicos ya que sus piezas livianas y prefabricadas son fáciles de recibir y transportar. Además, el biodigestor se adapta muy bien a diferentes periodos de carga gracias al suministro de energía semicontinuo, es fácilmente reparable y se puede construir con personal calificado(Gaballah et al., 2024; Martí, 2019a).

Cada grupo de bacterias tiene preferencias específicas de pH en las diferentes etapas de la digestión anaerobia, las bacterias responsables de la acidogénesis y la acetogénesis operan en un rango de pH entre 5.5 y 6.5. Por otro lado, las bacterias metanogénicas, que producen metano, prefieren un entorno con un pH que oscila entre 6.8 y 7.5(Carabeo et al., 2024). No obstante, autores como Ángel et al, (2024) y Ferreira et al, (2024), Afirman que, en términos generales, las bacterias responsables de facilitar el proceso de digestión anaeróbica prosperan mejor en un rango de pH entre 6.0 y 7.5, ya que este intervalo permite abarcar las condiciones óptimas para cada grupo bacteriano involucrado en las distintas etapas del proceso, pH inferior o superior de este rango puede inhibir o incluso detener la actividad de las bacterias, disminuyendo la producción de biogás (Angel , 2024; Ferreira , 2024b). Es importante mencionar que en la implementación de un biodigestor el rango de pH puede variar y que depende de las características propias del sustrato a utilizar, sin embargo, se debe garantizar que el pH se mantenga en este rango y en general, la mayoría de los estiércoles de animales de granja se encuentran dentro del rango óptimo de pH para la digestión anaeróbica, siendo el estiércol de cerdo aproximadamente 6.5(Martí, 2019a).

Otro parámetro importante para considerar es la relación C/N. El rango optimo de C/N se encuentra entre 20:1 y 30:1, es importante mantener esta relación ya que, cuando hay mucha

presencia de nitrógeno en las bacterias que pueden inhibirse (Jo et al., 2024). Autores como Ankathi, et al, (2024), afirman que, normalmente la relación C/N en los estiércoles de animales de granja no es un problema ya que, la mayoría se encuentran en un rango aceptable para la digestión anaerobia (Ankathi et al., 2024). Por otro lado, existen numerosos inhibidores que pueden afectar negativamente el proceso, como, por ejemplo, niveles superiores a 3000 mg/l de amoníaco, 5000 ppm de sulfatos y 40000 ppm de NaCl, entre otros, como metales pesados o antibióticos pueden inhibir el crecimiento bacteriano (Ma et al., 2024; Ruiz et al., 2023).

La temperatura óptima depende del tipo de bacterias involucradas: mesófilas o termófilas. Las bacterias termófilas necesitan temperaturas más altas, cuyo rango óptimo oscila entre 50°C y 65°C mientras, para sistemas mesófilos, las bacterias trabajan con temperaturas más bajas, cuyo rango óptimo de operación es de 35-40°C, (Gaballah et al., 2024; Ma et al., 2024). Si bien las altas temperaturas de los sistemas termófilos aceleran la degradación de la materia orgánica, reduciendo el tiempo de retención y el tamaño del reactor. Mantener dichas temperaturas termófilas estables aumenta significativamente los costos y complejidad tanto en la operación como la construcción del biodigestor ya que requieren de sistemas de control, también tienen un alto consumo energético para calefaccionar el reactor y una alta sensibilidad a variaciones de temperatura, que pueden desestabilizar el proceso y ser difíciles de corregir (Ma et al., 2024; Thy et al., 2015a).

Aunque, los biodigestores con sistemas mesófilos requieren un TR y volumen mayor en comparación con los sistemas termófilos, los sistemas mesófilos han demostrado ser eficaces para la producción de biogás especialmente para usos domésticos, ofreciendo una operación estable y una tasa de producción media, manteniendo bajo los costos de operación. Los sistemas mesófilos son recomendables para escalas pequeñas y medianas debido a su equilibrio entre eficiencia y estabilidad y por facilidad de construcción y mantenimiento (Gaballah et al., 2024).

En la implementación real de biodigestores de bajo costo y sistemas de temperatura mesófila, generalmente operan a una temperatura cercana a la del entorno (Pedraza et al., 2022). Esto implica que, en lugares donde prevalecen bajas temperaturas durante la mayor parte del año y latitudes por encima de 1500 msnm y con temperaturas inferiores a 20 °C, los biodigestores necesitan de sistemas de calefacción solares. Estos sistemas pasivos de calefacción pueden aumentar la temperatura dentro del biodigestor entre 6 y 10 °C (Gaballah et al., 2024).

Los estudios destacan que la temperatura de operación del biodigestor es crucial, ya que determina el TR. Debido a que la temperatura es el parámetro principal que influye en la velocidad de las reacciones bacterianas para procesar el estiércol y producir biogás (Pedraza et al., 2022). A su vez el TR y la temperatura determinan la cantidad de biogás generada a partir de estiércol fresco, aunque esta puede fluctuar notablemente dependiendo de la dieta del animal. Disminuir o aumentar el TR posibilita variar el número de animales que alimentan al biodigestor, permitiendo un posible crecimiento en la producción de la finca (Martí, 2019a).

La carga diaria se resalta como otro parámetro crucial en las diferentes investigaciones ya que esta junto al TR, determinan el volumen final del biodigestor. En los biodigestores tubulares, para la carga diaria, se requiere que esta tenga una mezcla de estiércol y agua para evitar obstrucciones y es crucial que esta mezcla mantenga un contenido de sólidos totales (ST) entre el 3% y el 16% (Thy et al., 2015a). En el caso del estiércol de cerdo, normalmente se utiliza una proporción de 1:2 para biodigestores tubulares, es decir 1 kilogramo de estiércol por cada 2 litros de agua, aunque esto depende de las características propias del estiércol (Ferreira et al., 2024b).

El volumen de un biodigestor se divide en dos componentes principales: la fase líquida, que comprende el estiércol, el agua y el consorcio bacteriano, y la fase gaseosa, donde se acumula el biogás producido. Normalmente, los biodigestores tubulares mantienen una relación de 80%

para la carga líquida y 20% para la carga gaseosa, aunque puede variar según las consideraciones de cada finca (Pedraza et al., 2022). Para calcular correctamente el volumen de un biodigestor, es esencial considerar el tiempo de retención (TR) y la carga diaria, ya que el volumen líquido del biodigestor se obtiene multiplicando el TR por la carga diaria (Angel et al., 2024).

Para la elección del tipo de material en la construcción de biodigestor existen principalmente dos materiales: el plástico de invernadero y las geomembranas. El plástico de invernadero, que suele encontrarse fácilmente en ferreterías, es una opción económica y está disponible en grosores de 200 a 300 micrones. Sin embargo, debido a su delgadez, es necesario usarlo en doble capa para el tanque del biodigestor. Su durabilidad depende de la exposición solar; bajo sombra puede durar hasta 10 años, pero con radiación directa, suele cristalizarse en 2 o 3 años. En contra posición las geomembranas, elaboradas a partir de PVC o polietileno, presentan un grosor que varía entre 500 y 1500 micrones, lo que elimina la necesidad de utilizar doble capa en su construcción. Estas geomembranas son generalmente más duraderas, con una vida útil que oscila entre 10 y 20 años, dependiendo de las condiciones de uso y exposición (Tovar Bermúdez et al, 2022).

Por otro lado, se realizó una búsqueda de información en ESP@CENET en agosto del 2024 para identificar patentes relacionadas con biodigestión anaeróbica de excretas porcinas. Considerando la siguiente ecuación de búsqueda:

```
("biodigestor" OR "biogás" OR "anaerobic digestión") AND S (pd>=20130101 AND pd<=20241231)
```

Obteniendo como resultado 36 patentes. Se identificaron un total 10 patentes relacionadas o más cercanas a la temática y las cuales fueron seleccionadas aplicando criterios de disponibilidad de información y novedad e innovación, permitiendo extraer de manera más factible los datos

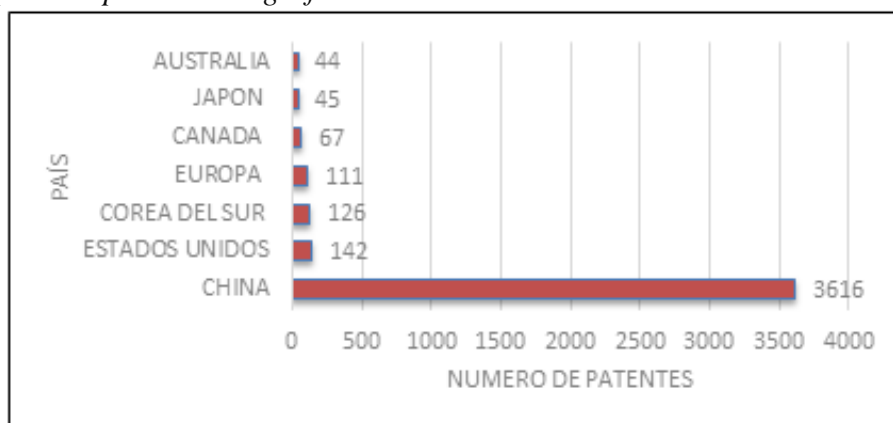
necesarios. A partir de estas, se realizó una revisión y un análisis detallado para evaluar su relevancia y aplicabilidad al proyecto.

Posteriormente se identificaron las patentes relacionadas con las siguientes palabras clave: biodigestores, biogás y digestión anaerobia. Para realizar el siguiente análisis bibliométrico:

La figura 4 muestra a china líder con un notable número de patentes distribuidas geográficamente, lo que resalta su fuerte compromiso y liderazgo en el desarrollo de tecnologías de biogás. Estados unidos y corea del sur también muestran un interés considerable, impulsando su innovación tecnológica y la necesidad de soluciones sostenibles, Europa, Canadá, Japón y Australia contribuyen con menos patentes, pero su participación sigue siendo muy importante.

El aumento en estas investigaciones y las patentes refleja una respuesta global a la necesidad de gestionar residuos orgánicos de manera sostenible y reducir las emisiones de efecto invernadero. Estos sistemas de digestión anaeróbica ofrecen grandes soluciones eficientes y renovables, siendo cada vez más atractivas para diversos países.

Figura 4. Distribución geográfica de patentes en producción de biogás por digestión anaeróbica de excretas porcina poner como grafica

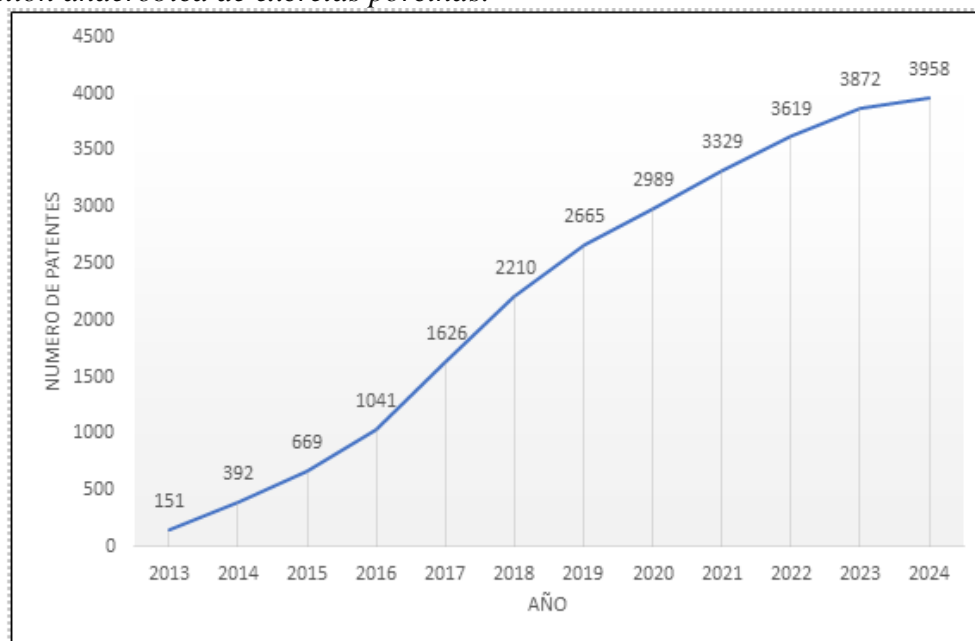


Nota. La figura muestra el país con la mayor cantidad de patentes es China, con un número significativamente superior (3616 patentes) comparado con los demás países. Tomado de la búsqueda avanzada de (ESP@CENET, 1 de agosto del 2024).

Posteriormente, la figura 5 muestra la evolución del número de patentes relacionadas con las diferentes tecnologías de producción de biogás por sistemas de digestión anaeróbica, teniendo como materia prima excretas porcinas. Debemos recalcar que en el 2013 solo se registraron 151 patentes, pero el número aumento notablemente en los años siguientes, alcanzando 669 patentes en 2016 y más de 1000 en 2017. Este crecimiento continuo de manera exponencial, llegando a 2210 patentes en 2019 y manteniendo una tendencia al alza con 3329 patentes en 2022. Para 2024, se proyecta un total de 3958 patentes, lo que indica un interés sostenido y creciente en esta tecnología.

El aumento en el número de patentes refleja la creciente importancia del biogás en la matriz energética global y los desafíos por encontrar soluciones y estrategias sostenibles para el manejo de residuos orgánicos provenientes de zonas donde se ejecutan actividades agrícolas. Países como China y Alemania están liderando este desarrollo, siendo respaldados por las diferentes políticas de apoyo y una infraestructura avanzada. Este incremento sostenido en las patentes destaca la prioridad global en la investigación y desarrollo de tecnologías en digestión anaeróbica, demostrando el compromiso continuo con la innovación en las diferentes estrategias y soluciones sostenibles.

Figura 5. Dinámica de publicaciones de patentes de los últimos 12 años en producción de biogás por digestión anaeróbica de excretas porcinas.



Nota. La figura describe la dinámica de publicaciones de patentes de los últimos 12 años en producción de biogás por digestión anaeróbica de excretas porcinas. Tomado de *ESP@CENET*.

A continuación, se presenta la Tabla 8 con los resultados de las 10 patentes encontradas en el motor de búsqueda *ESP@CENET* a partir de la ecuación planteada. La información de las demás patentes se encuentra en el Apéndice B.

Tabla 5. *Matriz de patentes*

Número de Patente	Título	Solicitante	Fecha de Publicación	País	Estado	Clasificación Internacional de la Patente (IPC)	Innovaciones/Aspectos Técnicos	Resumen
CN102396946A	Biodigestor para el tratamiento de estiércol de cerdo	Shanghai Zhanyuan Bioengineering Co., Ltd.	28 /03/2012	China	Concedida	C12M 1/107; C12P 5/02	Este biodigestor presenta un proceso de digestión de dos fases, mejorando el rendimiento de biogás y garantizando una descomposición más completa de la materia orgánica (Shun, 2012).	Esta invención proporciona un biodigestor diseñado específicamente para tratar estiércoles de cerdo. El digestor está estructurado para optimizar el proceso de digestión anaerobia, convirtiendo el estiércol de cerdo en biogás y fertilizante orgánico.
WO2012147616A1	Proceso para el tratamiento de purines de cerdo	RIERA, S.A.	08/11/2012	Organización Mundial de la Propiedad Intelectual (OMPI)	Concedida	C02F11/04; C12P5/02	Recalca la combinación de tecnologías para lograr un tratamiento eficiente de los purines (Ohwatari et al., 2012).	Presenta un proceso para tratar purines de cerdo mediante digestión anaeróbica, separación de fases y tratamiento del efluente líquido. El proceso reduce la carga contaminante y produce biogás.
US20130195829A1	Sistema y método para generar energía a partir de residuos animales	Novozymes AS	01/08/2013	Estados Unidos	Concedida	C12P5/02; C02F11/04	Destaca la eficiencia del sistema en la producción de biogás y la reducción de olores (Variantes de fitasa termoestables, 2012).	Describe un sistema para tratar residuos animales, incluyendo excretas de cerdo, para producir biogás y fertilizante. El sistema comprende un digestor anaeróbico y un separador de sólidos y líquidos.

Número de Patente	Título	Solicitante	Fecha de Publicación	País	Estado	Clasificación Internacional de la Patente (IPC)	Innovaciones/Aspectos Técnicos	Resumen
CN103641010A	Sistema de digestión anaerobia de estiércoles de cerdo totalmente automático y continuo	SAIC Chery Automobile Co Ltd	12/03/2014	China	Concedida	C05F 17/02; C12M 1/107	El aparato incluye etapas de pretratamiento para reducir el tamaño de las partículas y homogeneizar el estiércol, mejorando la eficiencia de la digestión y la producción de biogás (Wang et al., 2014).	Esta invención describe un sistema totalmente automatizado para la digestión anaerobia continua de estiércoles de cerdo, integrando sistemas de monitoreo y control para optimizar el proceso de digestión.
CN104046440A	Dispositivo de tratamiento de estiércol de cerdo	Sichuan Agricultural University	17/09/2014	China	Concedida	C02F11/04; C12M1/00	Enfatiza el proceso de fermentación en dos etapas, que mejora la eficiencia en la producción de biogás (Xuejing, 2014).	Presenta un dispositivo para tratar estiércol de cerdo mediante un proceso de fermentación anaeróbica en dos etapas. El dispositivo produce biogás y fertilizante.
US20160090569A1	Sistema para la digestión anaerobia de residuos orgánicos	Terumo BCT Inc	31/03/2016	Estados Unidos	Solicitud	C12M 1/107; C12P 5/02	El sistema emplea un intercambiador de calor para regular la temperatura, lo cual es crucial para mejorar la actividad microbiana y la producción de biogás en climas más fríos (El	Este sistema integra un intercambiador de calor para mantener temperaturas óptimas para la digestión anaerobia de estiércol de cerdo y otros residuos orgánicos, mejorando la eficiencia y la producción de biogás.

Número de Patente	Título	Solicitante	Fecha de Publicación	País	Estado	Clasificación Internacional de la Patente (IPC)	Innovaciones/Aspectos Técnicos	Resumen
WO201802847	Prefabricated Anaerobic Biodigester	ATEC AUSTRALIA-INTERNATIONAL PTY. LTD.	7/06/2018	Colombia	Solicitada	C05F 17/00	El diseño prefabricado facilita la instalación y operación del biodigester, mejorando la eficiencia del proceso de digestión anaeróbica (Jeffreys & Harris, 2018). hombre VANG, 2015).	Este biodigester prefabricado está diseñado para la digestión anaeróbica de materiales biodegradables. Incluye una cámara de biodigestión y un puerto para la entrada de material biodigestible.
EP3647389B1	Sistema integrado para el tratamiento anaeróbico de estiércol de ganado y uso posterior de biogás	Toyota Motor Corp	2/12/2020	Unión Europea	Concedida	C12M 1/107	La innovación radica en la integración eficiente de los procesos de tratamiento de estiércol y mejora del biogás, asegurando biogás de alta calidad adecuado para inyectar en redes de gas natural (Centro de Patentes, 2021).	La patente describe un enfoque integrado para el tratamiento anaeróbico de estiércol de ganado, en particular estiércol de cerdo, junto con un sistema para la purificación y uso de biogás.
US11028788B2	Digestor anaeróbico para tratar purines de cerdo	Toyota Motor Corp	8/06/2021	Estados Unidos	Concedida	C05F 17/00	El sistema mejora el rendimiento de biogás mediante la integración de paneles solares de	Esta patente describe un sistema de digestor anaeróbico diseñado específicamente para tratar purines de cerdo.

Número de Patente	Título	Solicitante	Fecha de Publicación	País	Estado	Clasificación Internacional de la Patente (IPC)	Innovaciones/Aspectos Técnicos	Resumen
							calefacción y la optimización del entorno microbiano dentro del digestor (YI-KAI WANG, 2021).	Incluye una estructura de laguna cubierta y un sistema de calefacción que mejora la producción de biogás.
CN112834 578A	Sistema y método para tratar estiércol de cerdo utilizando digestión anaeróbica	Foshan Viomi Electrical Technology y Co Ltd	25 /05/2021	China	Solicitada	C05F 17/00	El sistema incluye procesos de pretratamiento para mejorar la eficiencia de la digestión y pasos de post-tratamiento para recuperar nutrientes y purificar el biogás (Chen et al., 2021).	Esta patente describe un sistema completo para el tratamiento de estiércol de cerdo a través de la digestión anaeróbica, destacando la recuperación de nutrientes y la eficiencia energética.

Al analizar la Matriz de patentes, se evidencia diferentes tecnologías con diferentes escalas de complejidad en su diseño cada una con diferentes casos en particular, algunas incluyen procesos adicionales para mejorar la eficiencia del proceso de digestión anaerobia como las patentes CN103641010A y CN112834578A las cuales subrayan la importancia del pretratamiento de las excretas porcinas, sugiriendo que incorporar un sistema de pretratamiento en su diseño podría mejorar la eficiencia del biodigestor. También, la digestión anaerobia en dos etapas se presenta en la patente CN102396946A, que propone un proceso de digestión de dos fases mejorando el rendimiento del biogás, a lo anterior se le agrega, que el control y automatización de los parámetros descritos en la patente CN103641010A, con un sistema de monitoreo y control para optimizar el proceso, podría facilitar la operación y el mantenimiento del biodigestor.

Si bien la implementación de sistemas de dos etapas, de pretratamiento, y de monitoreo y control, como se observó en las patentes mencionadas, puede mejorar consistentemente los rendimientos, para necesidades energéticas domésticas, como las de muchas fincas pequeñas o medianas, este aumento en el rendimiento de los biodigestores no se justifica. Esto se debe a que la mayoría de estas fincas no requieren grandes cantidades de biogás, y la implementación de estos sistemas aumenta significativamente la complejidad y los costos.

Por ello, se identifican varios puntos de divergencia en cuanto al enfoque de escalabilidad. Algunas patentes se centran en sistemas a gran escala, como la WO2012147616A, que incorpora la separación de fases y el tratamiento del efluente líquido para reducir la carga contaminante del biol. En contraste, otras patentes son más adecuadas para operaciones más pequeñas, como la EP3647389B1, diseñada para tratar excretas de ganado y cerdo de manera simple y sin sistemas de monitoreo. Es crucial seleccionar un diseño que se ajuste la cantidad de excretas generadas en la Finca Buenos Aires. Además, los costos de implementación y operación varían según la tecnología y la complejidad del sistema, lo que requiere una cuidadosa consideración al elegir las tecnologías para el biodigestor. Por ejemplo, existen patentes que proponen desde sistemas prefabricados (WO2018102847) hasta sistemas integrados con paneles solares (US11028788B2).

En relación con el análisis de patentes, se observa una concordancia con el estudio realizado sobre los 20 artículos seleccionados previamente. De este análisis comparativo se puede concluir que, para las dimensiones y características de la Finca Buenos Aires, los biodigestores de menor complejidad, sin sistemas activos de monitoreo y control, representan la opción con mejor relación costo-beneficio. Esto se debe a que la finca no genera grandes volúmenes de excretas y,

sus requerimientos de producción de biogás son moderados. Esta elección permite satisfacer las necesidades energéticas de la finca sin incurrir en gastos adicionales asociados a tecnologías de mayor sofisticación.

4.2 Etapa 2: simulación del biodigestor seleccionado estudiando la capacidad de producción de excretas energética en el Software Aspen Plus

4.2.1 Selección de modelo termodinámico para la simulación en Aspen Plus®

En cuanto al modelo termodinámico y cinético se utilizó el modelo ADM1 (Anaerobic Digestion Model No. 1) el cual representa una gran precisión en las etapas de hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. Este modelo tuvo unos parámetros en cada etapa que son los siguientes:

Hidrólisis: tendrá una temperatura de 37°C, un pH de 6.5-7.0 con una reacción de carbohidratos, proteínas y grasas convirtiéndose en azúcares, aminoácidos y ácidos grasos (Möller y Müller, 2012).

Acidogénesis: su temperatura será de 37°C, con un pH de 5.5-6.5. teniendo una reacción de azúcares, aminoácidos y ácidos grasos convirtiéndolos en AGV, alcoholes, CO₂ y H₂ (Thy et al., 2015).

Acetogénesis: su temperatura será de 37°C con un pH de 6.0-7.0, con una reacción de AGV, alcoholes a Acetato, CO₂ y H₂ (Möller y Müller, 2012).

Metanogénesis: con una temperatura de 37°C, con un pH de 6.8-7.2 y con una reacción de acetato, H₂ y CO₂ convirtiéndose en CH₄ y H₂O (Martí, 2019).

4.2.2 Selección de una cinética conocida para la simulación en Aspen Plus®

Debemos que tener en cuenta que para la dirección de la reacción para 37°C será de 308.15K determinado mediante la energía libre de Gibbs (ΔG) y sabiendo que las reacciones son espontáneas ($\Delta G < 0$). Las constantes cinéticas para las diferentes etapas de la digestión anaeróbica se suelen obtener de la literatura.

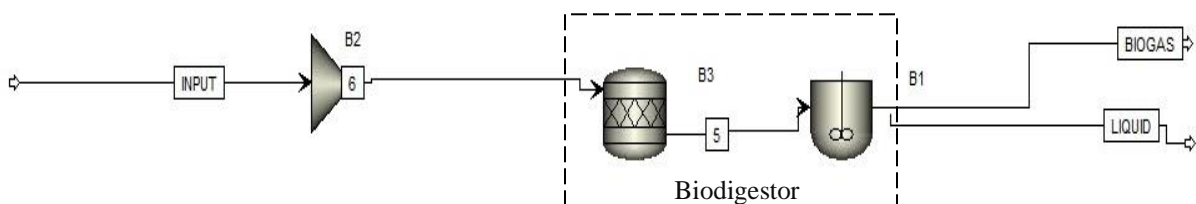
4.2.3 Definición de características, variables y parámetros de entrada para la simulación en Aspen Plus®

Las características, variables y parámetros de entrada que tiene la composición del estiércol en Carbono, Nitrógeno, Fosforó, fibra y agua. La densidad del estiércol estará aproximadamente 1000kg/m³. La viscosidad del estiércol tendrá un aproximado de 1-2 Pa.s, con una temperatura de operación de 37°C. su pH en el sistema operacional será de 6.5-7.5, su tasa de carga orgánica será de 2-4 kg VS/m³/día y como propiedades termodinámicas está la Cp, ΔH, ΔS, ΔG.

4.2.4 Desarrollo de diagrama de flujo del proceso, ejecución de simulación y verificación de errores

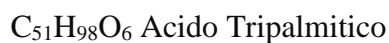
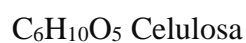
Primero se desarrolló un diagrama de flujo en simulador para el proceso de digestión anaerobia, junto con la realización de simulación como se evidencia en el punto 4.2.5, 4.2.6 y 4.2.7 y la validación de errores que fueron solucionados simultáneamente, en cada una de las etapas fue fundamental en el diseño del biodigestor y la optimización para un sistemas complejo como se muestra en la figura 6.

Figura 6. Diagrama de flujo del proceso – Digestión anaeróbica en Aspen Plus®



4.2.5 Ingreso de componentes en la simulación de Aspen Plus

En segundo lugar, se ingresaron en la simulación del biodigestor los componentes que se deben tener en cuenta en la composición de la biomasa como se evidencia a continuación.



Adicionalmente, se agregaron una serie de compuestos para los sets de reacciones que hacen parte de las tres etapas de la digestión anaerobia, que se pueden ver en la figura 7 y continúan en el Anexo C.

4.2.5.1 Condiciones iniciales y datos de entrada

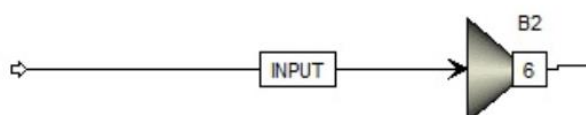
Figura 7. Lista de componentes ingresados en la simulación

Component ID	Type	Component name	Alias	CAS number
WATER	Conventional	WATER	H2O	7732-18-5
GLYCEROL	Conventional	GLYCEROL	C3H8O3	56-81-5
OLEIC-AC	Conventional	OLEIC-ACID	C18H34O2	112-80-1
DEXTROSE	Conventional	DEXTROSE	C6H12O6	50-99-7
ACETI-AC	Conventional	ACETIC-ACID	C2H4O2-1	64-19-7
PROPI-01	Conventional	PROPIONIC-ACID	C3H6O2-1	79-09-4
ISOBU-01	Conventional	ISOBUTYRIC-ACID	C4H8O2-4	79-31-2
ISOVA-01	Conventional	ISOVALERIC-ACID	C5H10O2-D3	503-74-2
H+	Conventional	H+	H+	
OH-	Conventional	OH-	OH-	
NH3	Conventional	AMMONIA	H3N	7664-41-7
NH4+	Conventional	NH4+	NH4+	
CO2	Conventional	CARBON-DIOXIDE	CO2	124-38-9

Después se seleccionó el modelo NRTL para la simulación, ya que la mezcla a trabajar contiene un alto contenido de agua y hace que se comporte como un compuesto polar.

Para el compuesto proteína, keratin y inert, se ingresó en Aspen Plus como pseudocomponente, para lo cual fue necesario ingresar propiedades de densidad, peso molecular y temperatura. Posteriormente, en propiedades de petrocaracterización, se calcularon las propiedades faltantes que fueron necesarias para el cálculo de los coeficientes de interacción binaria, y fueron esenciales para que la simulación de resultados.

Figura 8. Entrada al mezclador



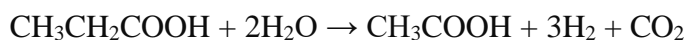
Se utilizó dos reactores para la simulación de la digestión anaerobia; inicialmente se introdujo un reactor estequiométrico (RStoik) y se agregaron los sets de reacciones correspondientes a la etapa de hidrólisis, donde previamente se adicionó un intercambiador de calor, para asegurar la temperatura de reacción de 35 °C. Después se agregó un reactor RCSTR, donde se agregaron las reacciones correspondientes a las etapas Acidogénesis, Acetogénesis y Metanogénesis.

4.2.6 Reacciones ingresadas en el proceso de la digestión anaerobia

4.2.6.1 Reacciones en la etapa de acidogénesis



4.2.6.2 Reacciones en la etapa de acetogénesis



4.2.6.3 Reacciones en la etapa de metanogénesis

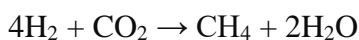
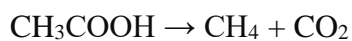


Tabla 6. Componentes de entrada

Componentes de entrada	Fórmula	Resultado
Agua	178,2 kg*2	357L
Estiércol + agua	178,2 kg+357L	535,48 L/día

La tabla anterior nos muestra los cálculos de los componentes de entrada a la simulación de Aspen Plus con el peso de estiércol de los cerdos que se encuentran en la Finca Buenos Aires, en la primera fila, se calcula la cantidad de agua requerida para el biodigestor, en la segunda fila, se suma este volumen de agua (357 L) al peso del estiércol (178,48 kg), obteniendo un total combinado de 535,48 litros diarios y por último se tuvo en cuenta los compuestos de entrada al sistema como se evidencia en la Tabla 7.

Tabla 7. Compuestos de entrada

Porcinaza de entrada	
Compuesto	Valor
Cellulos	0.94
Dextrose	0.01
NH3	0.001
Hemencell	0.01
Triolein	0.0004
Tripalm	0.0004
SN-1—02	0.0004
Protein	0.003

Porcinaza de entrada	
Ketatin	0.0018
Inerte	0.011

Según Urresty, 2019. la implementación de este sistema tiene un aprovechamiento de la porcinaza del 66% de metano y 33% de dióxido de carbono lo que hace que se genere biogás, la cual hace que tenga un impacto ambiental positivo, reduciendo así las emisiones de gases de efecto invernadero al capturar el metano que de otro modo sería liberado a la atmósfera. Además, contribuye a la gestión sostenible y es más sostenible con el medio ambiente (Urresty Sánchez, 2019).

4.2.7 Validación de la simulación, análisis y conclusiones

A continuación, se muestra los resultados obtenidos:

Figura 9. Resultados de la composición de las corrientes involucradas

Material	Heat	Load	Work	Power	Vol. % Curves	Wt. % Curves	Petroleum	Polymers	Solids	
					Units	5	6	BIOGAS	INPUT	LIQUID
Description								GAS OUTLET	FEED	Liquid Outlet
From					B3	B2	B1			B1
To					B1	B3		B2		
Stream Class					CONVEN	CONVEN	CONVEN	CONVEN	CONVEN	CONVEN
Maximum Relative Error										
Cost Flow				\$/sec						
- MIXED Substream										
Phase								Vapor Phase		Liquid Phase
Temperature				K	328,15	296,15	328,15	296,15	328,15	328,15
Pressure				N/sqm	102300	100000	101325	101325	101325	101325
Molar Vapor Fraction					0,000667577	0,000298915	1	0,000298745		0
Molar Liquid Fraction					0,999332	0,999701	0	0,999701		1
Molar Solid Fraction					0	0	0	0		0
Mass Vapor Fraction					0,0016405	0,00178758	1	0,00178714		0
Mass Liquid Fraction					0,998359	0,998212	0	0,998213		1
Mass Solid Fraction					0	0	0	0		0
Molar Enthalpy				J/kmol	-2,84883e+08	-2,87613e+08	-2,26018e+08	-2,87613e+08		-2,83783e+08

En la figura 9 se presenta datos de temperatura, presión, fracciones molares y de masa en las fases vapor y líquida, junto con información del flujo energético (entalpía), se obtuvo una temperatura constante de **328,15 K** en la fase líquida y ligeras variaciones en la fracción molar de vapor y líquido, destacando un flujo mayoritariamente en fase líquida.

Figura 10. Resultados en flujo másico

Material	Heat	Load	Work	Power	Vol.% Curves	Wt. % Curves	Petroleum	Polymers	Solids						
										Units	5	6	BIOGAS	INPUT	LIQUID
- Mole Flows										kmol/hr	0,000528605	0,000527095	1,61695e-06	0,000527095	0,000529731
WATER										kmol/hr	0,000520569	0,00052248	2,48658e-07	0,00052248	0,000521209
GLYCEROL										kmol/hr	1,46235e-08	0	6,49546e-17	0	6,27114e-09
OLEIC-AC										kmol/hr	1,22136e-08	0	1,78374e-18	0	1,22136e-08
DEXTROSE										kmol/hr	9,63411e-07	5,55815e-07	3,91146e-21	5,55815e-07	7,08371e-08
ACETI-AC										kmol/hr	9,47408e-07	0	3,07985e-10	0	1,26392e-06
PROPI-01										kmol/hr	0	0	3,58496e-11	0	4,58772e-07
ISOBU-01										kmol/hr	0	0	4,50535e-11	0	3,98584e-07
ISOVA-01										kmol/hr	0	0	6,33128e-12	0	8,99898e-09
H+										kmol/hr	0	0	0	0	0
OH-										kmol/hr	0	0	0	0	0
NH3										kmol/hr	8,08721e-07	5,87969e-07	7,18573e-09	5,87969e-07	7,58355e-07
NH4+										kmol/hr	0	0	0	0	0
CO2										kmol/hr	1,56522e-06	0	6,07968e-07	0	1,87177e-06
C5H7NO2										kmol/hr	0	0	5,32635e-13	0	1,08686e-07
ARGININE										kmol/hr	3,48421e-09	0	8,06806e-19	0	7,97221e-10
HISTIDIN										kmol/hr	0	0	1,29762e-28	0	4,25115e-26

En la figura anterior se evidencio los flujos molares de diferentes compuestos, con unidades en kmol/hr. Se identifican componentes como agua, glicerol, amoníaco (NH₃), dióxido de carbono (CO₂) y otros compuestos orgánicos. La cual se tuvo como resultado en el flujo de agua en la corriente líquida es aproximadamente 0,000521209 kmol/hr, mientras que en la corriente de biogás es menor.

Figura 11. Resultados de salida del biol

Material	Vol.% Curves	Wt. % Curves	Petroleum	Polymers	Solids	Status	
						Units	
						LIQUID	
ISOBU-01						kmol/hr	3,98584e-07
ISOVA-01						kmol/hr	8,99898e-09
H+						kmol/hr	0
OH-						kmol/hr	0
NH3						kmol/hr	7,58355e-07
NH4+						kmol/hr	0
CO2						kmol/hr	1,87177e-06
C5H7NO2						kmol/hr	1,08686e-07
ARGININE						kmol/hr	7,97221e-10
HISTIDIN						kmol/hr	4,25115e-26
LYSINE						kmol/hr	7,91562e-23
TYROSINE						kmol/hr	1,43553e-27
TRYPTOPH						kmol/hr	9,30818e-27
PHENYLAL						kmol/hr	1,03804e-09
CYSTEINE						kmol/hr	1,93191e-09
METHIONI						kmol/hr	8,80492e-22
THREONIN						kmol/hr	8,32653e-10

Figura 12. Resultados de salida del biogás

BIOGAS (MATERIAL) - Results (Default) × 6 (MATERIAL) × LIQUID (MATERIAL) - Results			
Material	Vol. % Curves	Wt. % Curves	Petroleum Polymers Solids Status
			Units BIOGAS
▶ VALINE			kmol/hr 8,39888e-91
▶ GLUTAMIC			kmol/hr 2,13376e-18
▶ ASPARTIC			kmol/hr 5,44792e-91
▶ GLYCINE			kmol/hr 1,11119e-19
▶ ALANINE			kmol/hr 5,33442e-91
▶ PROLINE			kmol/hr 8,03199e-20
▶ HYDROGEN			kmol/hr 4,32412e-09
▶ METHANE			kmol/hr 6,61582e-07
▶ INDOLE			kmol/hr 6,51155e-27
▶ FROMAMID			kmol/hr 3,27032e-29
▶ H2S			kmol/hr 7,24452e-09
▶ CH4S			kmol/hr 1,93244e-28
▶ BENZENE			kmol/hr 1,09829e-09
▶ PHENOL			kmol/hr 0
▶ H2CO3			kmol/hr 0
▶ HCO3-			kmol/hr 0
▶ CO3-2			kmol/hr 0

De acuerdo con la simulación realizada, se encontró que la producción de biogás presenta un aumento directamente proporcional con el incremento de lípidos en la mezcla de biomasa como se muestra en la figura 11 y continua en el apéndice D. Se obtuvo como resultado, que cuando la cantidad de carbohidratos se encuentra en un 40%, los lípidos en 50% y las proteínas en un 10%, se obtiene mayor cantidad de biogás; para este caso, es posible obtener 6,61582 kmol/hr de gas metano y de CO₂ 6,079 kmol/hr como se evidencia en la figura 12 y apéndice D.

Teniendo en cuenta que las excretas porcinas son la base de carga para el biodigestor y su respectivo tratamiento para la obtención principalmente de biogás, la cual hace que la digestión anaerobia se destaque por su alta capacidad para producir metano, además porque contienen alta concentración de nutrientes.

4.3 Etapa 3: diseño de un biodigestor en AutoCAD para la Finca Buenos Aires

4.3.1 Diseño del biodigestor

Para el diseño del biodigestor se tuvo en cuenta las variables y características propias de la Finca Buenos Aires, esta granja se encuentra en el kilómetro 8 de la vía Bucaramanga-Matanza en Santander, Colombia. Cuenta con una temperatura media de 24 °C (IDEAM, 2024) y su principal actividad económica es la cría de cerdos, mantiene en promedio 27 animales en sus instalaciones y proyecta una ampliación para duplicar el número de animales, cuenta con un solo trabajador en planta y su gasto es de 2 bombonas de gas propano al mes. Su dueño afirma la intención de

construir un biodigestor económico y fácilmente operable para cubrir sus requerimientos mensuales de gas y calefacción de lechones y sea adaptable al crecimiento que se proyecta en la finca, según lo mencionado por el dueño en una entrevista.

Para la Finca Buenos Aires, se ha seleccionado un biodigestor tubular como la opción más adecuada, debido a que esta tecnología es ampliamente utilizada en Latinoamérica, lo que facilita el acceso de información y soporte, la instalación de un biodigestor tubular es rápida y económica, con un tiempo estimado de 1 a 2 días. Además, el uso de materiales prefabricados y livianos en estos biodigestores contribuye a reducir significativamente costos de adquisición y transporte de estos (Pedraza et al., 2022). Adicionalmente, aunque la finca no está ubicada en una región de climas especialmente fríos, esta puede implementar el uso de calefacción solar pasiva en su biodigestor tubular, para mejorar su eficiencia al aumentar las temperaturas, lo que reduciría el tiempo de retención, permitiendo incrementar la carga diaria al aumentar el número de animales en la finca.

Según la literatura, se asumió un pH de 6.5 y una relación C/N de 20:1 para el estiércol de cerdo. Estos valores se encuentran dentro de los parámetros óptimos de operación (Ankathi et al., 2024). Además, no se consideró concentraciones significativas de amoníaco ni otros compuestos inhibidores, ya que, según Ruiz et al, (2023) cuando se trabaja con estiércoles de animales de granja, las concentraciones de estos inhibidores son bajas y no presentan un problema (Ruiz et al., 2023). Esto permite evitar el uso de sistemas de pretratamiento, reduciendo tanto los costos como la complejidad del biodigestor.

A continuación, se estimará la producción diaria de estiércol producida por la Finca Buenos Aires.

Tabla 8. *Estimación de estiércol diario producido por la Finca Buenos Aires:*

Cerdos	Nº de animales	Peso promedio por individuo (Kg)	Kg de estiércol diario por cada 100kg de peso vivo (kg)	Peso vivo total (kg)	Estiércol diario (kg)
Gestación	4	200	4	800	32
Maternidad	2	250	4	500	20
Macho Reproductor	1	200	4	200	8
Lechón	4	2	4	8	0,32
Cebo	16	100	4	1600	64
total	27				124,32

Adaptado de (Martí, 2019a)

Dado que la Finca Buenos Aires produce 128,32 kg de estiércol de cerdo al día, a continuación, se calculó la carga diaria que entro al biodigestor tubular en la finca manteniendo una relación de 1:2 estiércol-agua.

Ecuación 1. Cantidad de agua necesaria para mezclar con el estiércol, calculado para el biodigestor diseñado para la finca Buenos Aires.

$$\text{cantidad de agua} = \text{total de estiercol} \times 2$$

$$\text{Cantidad de agua} = 124,32 \text{ KG} * 2 = 248.64 \text{ L}$$

Ecuación 2. Carga diaria total calculada para el biodigestor diseñado para la finca Buenos Aires.

La carga diaria total, que es la suma del estiércol y el agua:

$$\text{Carga diaria} = \text{Cantidad de agua} + \text{total de estiercol}$$

$$\text{Carga diaria total} = 124,32 \text{ KG} + 248,64 \text{ L} = 372.96 \text{ L/día.}$$

Para la Finca Buenos Aires, el biodigestor no obtuvo un diseño de calefacción solar pasiva, debido que la temperatura media de la Finca Buenos Aires es de 24 °C, suficiente para no requerirlo y conto con un Tiempo de Retención (TR) de 65 días, el máximo recomendado, cómo se observa en la tabla 9. (J., 2019)., este TR no resulta lo más eficiente para las condiciones climáticas de la finca, cuya temperatura media es de 24°C (IDEAM, 2024). Sin embargo, la elección de un TR alto, permitiría aumentar la capacidad de producción de la finca, al bajar el número de días del TR, lo que permitiría pasar de 27 cerdos a un estimado de 50 a 55 cerdos con TR de 35 a 40 días, permitiendo el crecimiento proyectado por el dueño.

Tabla 9. Relación entre temperatura y tiempo de retención recomendado para lograr producciones de biogás aceptables

Temperatura (C°)	Tiempo de Retención (días)
35-40	25 - 35
30-34	30 - 40
25-29	35 - 50
20-24	40 - 65
15-19	65 - 90
10-14	90 - 125

Adaptado de (J., 2019)

Para calcular el volumen líquido del biodigestor se multiplica el tiempo de retención por la carga diaria, A continuación, se muestra la fórmula, aplicada con los datos específicos para el diseño del biodigestor de la Finca Buenos Aires:

Ecuación 3. Volumen líquido mínimo calculado para el biodigestor diseñado para la finca Buenos Aires.

$$VL = TR \times CD$$

$$VL = 24,242.4 L$$

Donde:

VL = Volumen líquido mínimo.

TR = Tiempo de retención.

CD = Carga diaria (L/día).

Para el diseño de la Finca Buenos Aires, se ha seleccionado un volumen de biogás que representa el 20 % del volumen total, este fue ingresado dentro del rango de valores utilizados en diversos artículos. A continuación, se presentan los cálculos del volumen de biogás y el volumen total del biodigestor para el caso específico de la finca:

Ecuación 4. Volumen de biogás mínimo calculado para el biodigestor diseñado para la finca Buenos Aires.

$$VB = (VL \times 20\%) \div 80\%$$

$$VB = 6,060.6 L$$

Donde:

VL = Volumen líquido mínimo.

VB = Volumen de Biogás mínimo.

Ecuación 5. Volumen total mínimo calculado para el biodigestor diseñado para la finca Buenos Aires.

$$VT = VL + VB$$

$$VT = 30,303 L$$

Donde:

VT = Volumen Total. Mínimo.

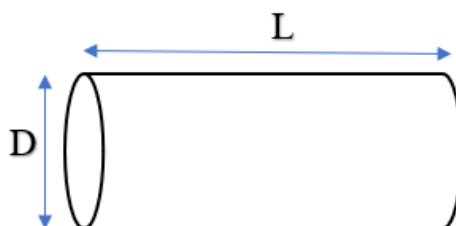
El volumen final mínimo del biodigestor necesario para la Finca Buenos Aires es de 30,303 litros, calculado para 27 animales. Sin embargo, este volumen puede verse afectado por cambios en los parámetros, como el número de animales o el Tiempo de Retención (TR), por lo que se tomó como referencia para este proyecto. Una vez definido este volumen, fue necesario determinar su forma y dimensiones.

Para los cálculos del proyecto, se optó por un biodigestor con forma cilíndrica, como se muestra en la figura 13. Esta elección consideró la información proporcionada por el propietario durante una entrevista, donde indicó que el terreno destinado para la instalación del biodigestor presenta una limitación de longitud de 11 metros, siendo este el único espacio cercano disponible. Además, el propietario manifestó la intención de ampliar las instalaciones en el futuro para duplicar el número de animales, lo que requería un diseño que pudiera adaptarse al crecimiento proyectado.

En consecuencia, se seleccionaron las dimensiones del biodigestor basadas en el Sistema 20 del Catálogo Colombia: Sistema.bio, cuyas medidas son 2.2 metros de diámetro y 8 metros de longitud, con un volumen de 30,410 litros, diseñado para aproximadamente 55 cerdos y un TR de 35 a 40 días (Sistema.bio, n.d.). Este sistema cumple con las restricciones de espacio de la finca al no superar los 11 metros disponibles y, al mismo tiempo, se ajusta a la cantidad de cerdos proyectados para el crecimiento de la finca. Además, este diseño ha demostrado ser eficaz en condiciones similares en diferentes zonas del país.

A continuación, se presenta en la ecuación 6 el cálculo del volumen correspondiente al biodigestor Sistema 20 del Catálogo Colombia: Sistema.bio (Sistema.bio, n.d.).

Figura 13. Dimensiones de un cilindro



Adaptado de (Omni Calculator, n.d.)

D = diámetro.

L= longitud.

Es importante resaltar que la relación entre longitud y diámetro de un biodigestor debe estar entre 3.5 a 7.5, una relación L/D (longitud/diámetro) menor a 3.5 será demasiado corto, lo que podría hacer que el material recién cargado salga antes de completar el tiempo de retención adecuado. Por otro lado, un biodigestor con L/D mayor a 7.5 será demasiado largo y puede causar acumulación de lodos en el centro del sistema (Ankathi et al., 2024b; Martí, 2019a).

Ecuación 6. Relación longitud diámetro.

$$Re = L \div D \quad (\text{Martí, 2019})$$

En donde:

L= longitud.

D = diámetro.

Ecuación 7. Volumen de un cilindro.

$$Vc = \pi \times r^2 \times L \quad (\text{Omni Calculator, n. d.})$$

$$Vc = 30,410 L$$

Donde:

Vc= volumen del cilindro

R = radio

L= longitud

Las dimensiones del biodigestor del Sistema 20 del Catálogo Colombia: Sistema.bio ofrecen un volumen de 30,410 litros, diseñado para 50-55 cerdos, con un Tiempo de Retención (TR) de 35 a 40 días y un Re de 3.63, por encima del mínimo requerido (Sistema.bio, n.d.). Este biodigestor presenta un volumen ligeramente superior al mínimo referencial calculado para la Finca Buenos Aires, que es de 30,303 litros, diseñado para 27 cerdos con un TR de 65 días.

Debido a que el volumen es similar al mínimo requerido y a que sus dimensiones se ajustan a las limitaciones del terreno, se ha optado por utilizar las dimensiones del Sistema 20 del catálogo de Colombia: Sistema.bio. De esta manera, el volumen total del biodigestor para la Finca Buenos Aires será de 30,410 litros. Además, una vez que la finca sea ampliada, el TR podrá reducirse a 35-40 días, lo que permitirá alcanzar la meta de alojar entre 50 y 55 cerdos sin modificar el volumen del biodigestor.

Para el diseño de los biodigestores, se seleccionó la geomembrana de polietileno como material principal debido a sus características superiores, especialmente en términos de flexibilidad y capacidad de sellado. Una de sus ventajas es que no requiere el uso de doble capa en su construcción, lo que simplifica el diseño sin comprometer la eficiencia. Estas geomembranas presentan una vida útil de 10 a 20 años, dependiendo de factores como las condiciones de uso, la exposición a agentes ambientales y el mantenimiento aplicado, lo que las convierte en una opción confiable y duradera para sistemas de biodigestión (Thy et al., 2015a).

Para evitar la formación de costras en el biodigestor, se deberá hacer periódicamente una agitación. Para ello, se pasará una cuerda de aproximadamente 2,5 veces la longitud del biodigestor, atravesando desde la tubería de alimentación hasta la salida del biol. En el centro de la cuerda se sujetará una botella para mejorar la agitación. Es importante no agitar con frecuencia; se recomienda realizar esta acción solo una o dos veces al mes para mantener la estabilidad del proceso anaeróbico (Martí, 2019a).

Es crucial contar con un filtro para el sulfuro de hidrógeno (H_2S), también conocido como ácido sulfhídrico, debido a su alta toxicidad y su capacidad para corroer metales. En sistemas domésticos, se emplea un filtro compuesto por tubería de PVC y lana de hierro oxidada (también conocida como bombril). Este filtro se instala con una llave, seguida de una unión universal, un tramo de tubería de aproximadamente 30 cm y otra unión universal. Además, es fundamental contar con una válvula de alivio la cual permite liberar biogás cuando se alcanza una presión máxima, utilizando un sello hidráulico (Tovar et al., 2022b). Para su instalación, se conecta una unión en T a la conducción de biogás: un extremo recibe el biogás desde el biodigestor, el otro lo dirige al punto de consumo, y el extremo inferior se conecta a una tubería vertical de unos 30 cm sumergida en agua para crear el sello hidráulico. La presión máxima se ajusta según la profundidad de inmersión de la tubería en el agua; en el caso de una geomembrana de polietileno de 500 micrones (Martí, et al., 2019).

Tabla 10. *Parámetros y características seleccionadas para diseñar el biodigestor tubular para la Finca Buenos Aires.*

Parámetro	Selección
Tipo de biodigestor	tubular
temperatura	24 °C
pH	6,5
C/N	20:1
TR	65 días

Parámetro	Selección
Carga diaria	372,96 L/día
Volumen total	30410 L
Longitud	8 M
Diámetro	2.2 M
Material	geomembrana de polietileno

A continuación, en la figura 14 se presenta el diseño final del biodigestor, mostrando sus características y parámetros, así como la ubicación de las tuberías, la entrada de biomasa, la válvula de seguridad, el filtro, y las salidas de biogás y biol (fertilizante líquido), con las dimensiones calculadas durante la etapa 2 del proyecto.

Figura 14. Diseño del biodigestor tubular en AutoCAD

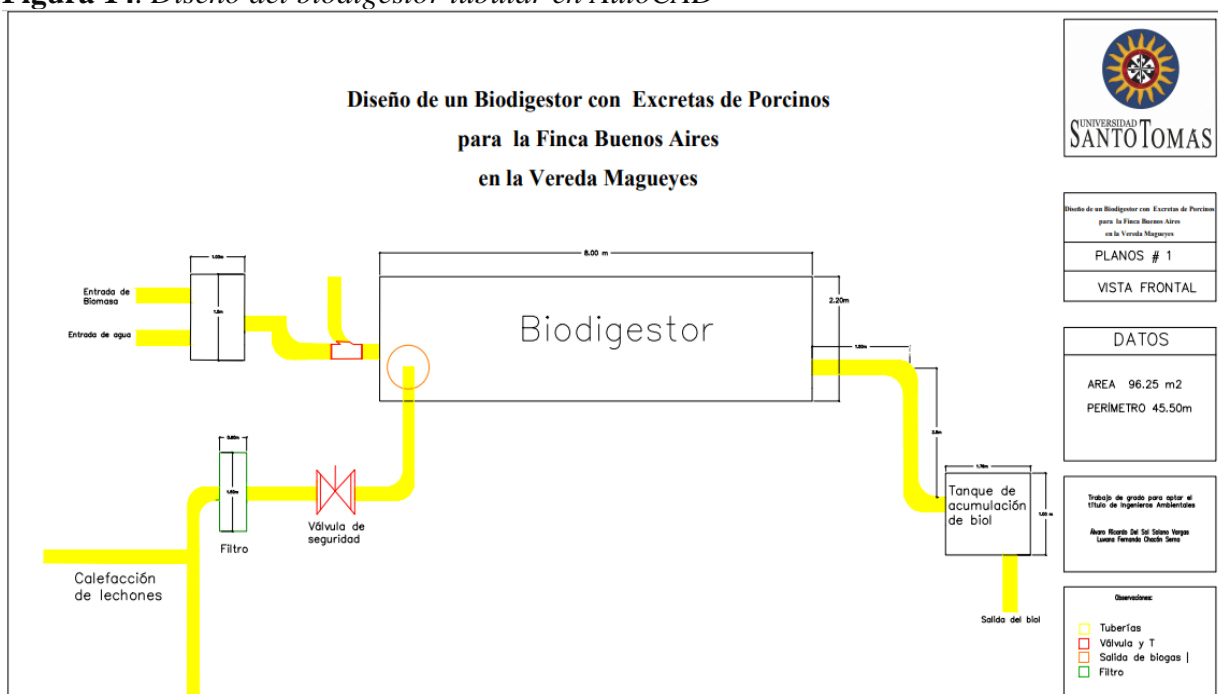
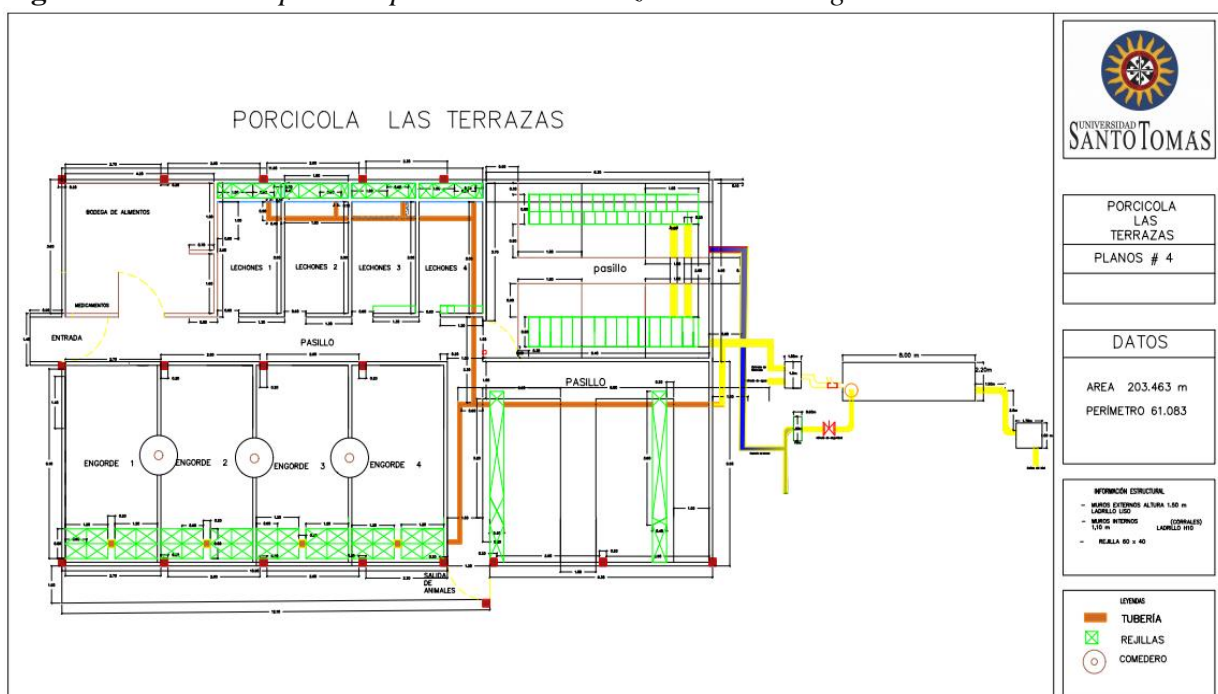


Figura 15. Plano completo de porcicola las terrazas con el biodigestor



4.3.2 Presupuesto del biodigestor

A continuación, se evidencia la cotización de los costos a tener en cuenta para la construcción del biodigestor.

Tabla 11. Costos del biodigestor

Costos del biodigestor			
Cantidad	Descripción	Valor unitario	Valor total
3	Bultos de cemento	\$ 48.000	\$ 144.000
2	Tubo de 4" /6 metros	\$ 30.000	\$ 60.000
5	Codos de 4"	\$ 5.000	\$ 30.000
1	Válvula de 4"	\$ 50.000	\$ 50.000
1	Limpiador de PVC	\$ 47.000	\$ 47.000
1	Pegante de PVC	\$50.000	\$50.000
1	Bombril	\$10.000	\$10.000
1	"T" de PVC 4"	\$ 8.000	\$ 8.000
1	Acople macho roscado de PVC de 4"	\$ 5.000	\$ 5.000
2	Arandela en aluminio de 15cm de diámetro y agujero centran de 1"	\$ 6.200	12.400
2	"Y" sanitaria de PVC de 4"	\$ 30.000	\$ 60.000
Valor total sin IVA			\$ 476.400

La Tabla 11 detalla los costos asociados con la construcción de un biodigestor, desglosando cada uno de los materiales necesarios, su cantidad, precio unitario y costo total. En este presupuesto, se incluyen tanto componentes estructurales, como los bultos de cemento y los tubos de PVC, como elementos específicos para el ensamblaje, como las válvulas, codos, y conexiones. Destaca el costo significativo de los bultos de cemento y las piezas de PVC, que representan la mayor parte del presupuesto. Es importante señalar que los valores presentados no incluyen el IVA, lo cual debe ser considerado para calcular el costo final del proyecto. Este análisis permite identificar los principales insumos requeridos y evaluar la viabilidad económica de implementar el biodigestor en función de los recursos disponibles.

Tabla 12. *Costos para diseñar el biodigestor*

Costos tanque de entrada y salida del biodigestor	
Tanque entrada 2.000 litros	\$ 1.000.000
Tanque salida de 1.000 litros	\$ 800.000
Valor total sin IVA	\$ 1.800.000

Nota: valores de costos de materiales ya hechos de la tabla 11 y 12 tomados de la página de sistema bio.com y homecenter.com.co

E La Tabla 12 presenta los costos asociados con los tanques de entrada y salida requeridos para el diseño del biodigestor. El tanque de entrada, con una capacidad de 2.000 litros, es esencial para almacenar y procesar el material inicial antes de ingresar al sistema de digestión, representando el mayor costo individual. Por su parte, el tanque de salida, con una capacidad de 1.000 litros, es fundamental para recoger el efluente resultante del proceso. El costo total estimado para estos elementos asciende a \$1.800.000 sin incluir el IVA. Estos valores se obtuvieron de fuentes confiables como sistemasbio.com y biomasster.com.co, asegurando que los costos reflejen precios actuales en el mercado. Este desglose permite evaluar la inversión necesaria para los componentes críticos del biodigestor.

5. Conclusiones

A partir de la vigilancia tecnológica realizada en 20 artículos y proyectos seleccionados de la base de datos Scopus, se concluye que el diseño más eficiente y adecuado para la Finca Buenos Aires es un biodigestor de tipo tubular. Y se identificaron los principales parámetros que afectan la producción de biogás: el pH debe estar entre 6 y 7,5, la relación carbono/nitrógeno (C/N) entre 20:1 y 30:1, la temperatura óptima para bacterias mesofílicas entre 35 °C y 45 °C, la relación estiércol/agua en la carga diaria debe ser 1:2, y el tiempo de retención se ajusta según las condiciones propias de la finca. Además, se debe considerar la presencia de inhibidores que puedan afectar el proceso como niveles superiores a 3000 mg/l de amoníaco, 5000 ppm de sulfatos y 40000 ppm de NaCl, entre otros, como metales pesados o antibióticos pueden inhibir el crecimiento bacteriano. Esto facilitó la selección de un modelo adaptado a las necesidades específicas del proyecto. Sin embargo, se identificaron limitaciones en la disponibilidad de datos específicos sobre la composición de las excretas, lo que podría influir en la precisión de los resultados. Se recomienda realizar estudios adicionales sobre la variabilidad de las excretas porcinas y su impacto en el rendimiento del biodigestor. Esta última etapa subraya la importancia de un diseño adaptado

a las condiciones locales, lo que puede servir como modelo para otras fincas en situaciones similares.

Con base a la información recopilada se realizó la simulación del biodigestor seleccionado en el Software Aspen Plus, estudiando así la capacidad de producción de excretas necesaria para diseñar un biodigestor y este sea capaz de suplir las necesidades y capacidades, además proporcionó una información clave sobre el rendimiento energético potencial del biodigestor, considerando variables como la composición de las excretas, la relación agua/estiércol y las condiciones operativas. Esto permitió validar la viabilidad técnica del proceso, ajustar parámetros para maximizar la producción de biogás y garantizar que la capacidad seleccionada sea adecuada para las necesidades energéticas proyectadas de la Finca Buenos Aires. Según Urresty Sánchez, et al. (2019), la implementación de este sistema tiene un aprovechamiento de la porcínaza del 66% de metano y 33% de dióxido de carbono lo que hace que se genere biogás, la cual hace que tenga un impacto ambiental positivo, reduciendo así las emisiones de gases de efecto invernadero al capturar el metano que de otro modo sería liberado a la atmósfera. Además, contribuye a la gestión sostenible y es más sostenible con el medio ambiente (Urresty Sánchez, 2019).

Para el diseño del biodigestor, se utilizó el software Aspen Plus, se evaluó el rendimiento energético del biodigestor en condiciones controladas. Esta simulación proporcionó datos fiables sobre la capacidad de generación energética y la eficiencia del proceso, permitiendo anticipar posibles mejoras fundamentales a considerar las características específicas de la Finca Buenos Aires, como el número de cerdos y su ubicación geográfica. En este sentido, los parámetros tenidos en cuenta para el diseño y funcionamiento óptimo del biodigestor son los siguientes: temperatura de 24 °C, pH de 6,5, relación C/N de 20:1, tiempo de retención (TR) de 65 días, carga diaria de 372,96 L/día, volumen del biodigestor de 30.303 L, longitud de 8 m, diámetro de 2,2 m y material de geomembrana de polietileno.

En la etapa final del proyecto, se llevó a cabo el diseño del biodigestor, integrando los hallazgos de las etapas anteriores para crear un sistema que responda a las necesidades específicas de la Finca Buenos Aires. Los resultados del diseño indicaron que un biodigestor tubular es la opción más adecuada, considerando factores como la eficiencia en la producción de biogás y la facilidad de operación. Sin embargo, se identificaron limitaciones en la implementación, como la necesidad de capacitación para los operarios y la disponibilidad de recursos para la construcción. Se recomienda realizar un seguimiento de la cantidad de entrada y salida post-implementación del

biodigestor para evaluar el rendimiento que este presenta. Esta etapa finaliza con la reflexión de que el diseño de biodigestores adaptados a contextos locales no solo es viable, sino esencial para promover prácticas agrícolas sostenibles y reducir la dependencia de fuentes de energía no renovables.

6. Recomendaciones

Se recomienda incorporar botellas PET cortadas dentro de biodigestores de estiércol. Estas piezas ofrecen una mayor superficie para la colonización bacteriana, optimizando la producción de biogás sin ocupar un volumen significativo ni obstruir el flujo interno (Martí, 2019).

También, se sugiere realizar estudios periódicos de estos parámetros para optimizar el rendimiento y garantizar la sostenibilidad del sistema a largo plazo y la realización del mantenimiento de los filtros que este lleva.

Asimismo, se recomienda como una buena opción utilizar el biol generado al final del biodigestor como fertilizante para los cultivos de la Finca Buenos Aires. Es importante almacenarlo en un tanque, ya que su volumen aumentará progresivamente, permitiendo contar con una reserva útil para futuras necesidades.

Por último, se sugiere continuar desarrollando este proyecto mediante la incorporación de nuevas estrategias que maximicen la eficiencia del biodigestor. Entre estas estrategias, podrían incluirse mejoras en el diseño estructural para optimizar el flujo de los residuos orgánicos, la implementación de tecnologías avanzadas para monitorear y controlar parámetros clave como la temperatura, el pH y la presión interna, así como la diversificación de los materiales de alimentación con el fin de garantizar un suministro constante y equilibrado de nutrientes para la fermentación. Además, se recomienda explorar el uso de aditivos o cultivos microbianos específicos que puedan acelerar el proceso de digestión anaeróbica y aumentar la producción de biogás.

Referencias

- Agricultura, O. de las N. U. para la A. y la. (2019). *Guía teórico-práctica sobre el biogás y los biodigestores: Proyecto para la promoción de la energía derivada de biomasa (UTF/ARG/020/ARG) - Colección Documentos Técnicos N° 12*. Food & Agriculture Org.
- Agudelo, M. F. C. (2013). La gestión de ecosistemas estratégicos proveedores de agua. El caso de las cuencas que abastecen a Medellín y Bogotá en Colombia. *Gestión y Ambiente*, 16(1), 109-121.
- Alemán-Nava, G. S., Casiano-Flores, V. H., Cárdenas-Chávez, D. L., Díaz-Chavez, R., Scarlet, N., Mahlkecht, J., Dallemand, J.-F., & Parra, R. (2014). Renewable energy research progress in Mexico: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 140-153. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.004>
- Ávila-Hernández, M., Campos-Rodríguez, R., Brenes-Peralta, L., Jiménez-Morales, M. F., Ávila-Hernández, M., Campos-Rodríguez, R., Brenes-Peralta, L., & Jiménez-Morales, M. F. (2018). Generación de biogás a partir del aprovechamiento de residuos sólidos biodegradables en el Tecnológico de Costa Rica, sede Cartago. *Revista Tecnología en Marcha*, 31(2), 159-170. <https://doi.org/10.18845/tm.v31i2.3633>
- Bruce E. Rittmann. (2001). *Environmental Biotechnology: Principles and Applications | McGraw-Hill Education—Access Engineering*. <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9781260440591>
- Buenrostro, O., Cram, S., & Bernache, G. (2000). *La digestión anaerobia como alternativa de tratamiento a los residuos sólidos orgánicos generados en los mercados municipales*.
- Buitrago-Rodríguez, L. M., Rayo-Torres, J. M., & Rosado-Robayo, Y. (2020). Viabilidad económica para la producción de biogás a partir de residuos orgánicos, mediante tecnología de biodigestores, para ser usado como combustible en la cocción de alimentos y generación de electricidad, en la Finca las Eusidias ubicada en el municipio de Sylvania Cundinamarca. *instname:Universitaria Agustiniiana*. <http://repositorio.uniagustiniana.edu.co/handle/123456789/1155>
- Chaúr, J. (2002). *El biogás*. Produmedios.
- Chavarria, R. S. (2014). *Environmental Biotechnology*. https://www.academia.edu/28898814/Environmental_Biotechnology

Congreso de la República. (2013). *Ministerio de Relaciones Exteriores—Normograma [SC332_14]*.

https://www.cancilleria.gov.co/sites/default/files/Normograma/docs/sc332_14.htm

Congreso de la República. (2021). *Ley 2128 de 2021—Gestor Normativo*.

<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=168087>

CREG, P. (2016, agosto 5). *Regulación abre el camino al desarrollo del biogás como alternativa de combustible en el país*. Portal CREG.

<https://creg.gov.co/publicaciones/8635/regulacion-abre-el-camino-al-desarrollo-del-biogas-como-alternativa-de-combustible-en-el-pais/>

Creswell y Poth, 2018. (s. f.). Recuperado 17 de junio de 2024, de

<https://revistapsicologia.org/public/formato/cuali2.pdf>

Díaz Guio, D. S., & Salazar Cerón, L. M. (2020). *Estudio de factibilidad para el diseño de un biodigestor de aprovechamiento sostenible de excretas de bovino en la Hacienda Lechera los Naranjos, Tambo Cauca*. <https://hdl.handle.net/20.500.12495/2143>

Environment, U. N. (2023, agosto 11). *Informe sobre la Brecha de Emisiones 2023*. UNEP - UN Environment Programme. <http://www.unep.org/es/resources/informe-sobre-la-brecha-de-emisiones-2023>

Española de Compostaje, R. (2014). *Aspectos biológicos de la digestión anaeróbica II.2*. Ediciones Mundi-Prensa.

Esquivel, N. A. (2016). *Estrategia formativa para disminuir el vertimiento de residuos orgánicos al río bogotá, por parte de las granjas porcícolas de san antonio del tequendama*.

FAO. (2020). www.fao.org. <https://doi.org/10.4060/cb1447en>

Godswill, A. C., Gospel, A. C., Otuosorochi, A. I., & Somtochukwu, I. V. (2023). Industrial And Community Waste Management: Global Perspective. *American Journal of Physical Sciences*, 1(1), Article 1. <https://doi.org/10.47604/ajps.1043>

GOV.CO. (2008). *Ley 1259 de 2008—Gestor Normativo*. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=34388>

GOV.CO. (2014). *Ley 1715 de 2014—Gestor Normativo*. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=57353>

- GOV.CO. (2022). *Lista la metodología para la evaluación de bienestar animal en la especie porcina* / ICA - Instituto Colombiano Agropecuario. Portal Corporativo ICA. <https://www.ica.gov.co/noticias/ica-metodologia-evaluacion-bienestar-porcino>
- Guadalupe, G. D., & Concepción, G. D. (2020). *Metodología de la investigación*. Grupo Editorial Patria.
- Gupta, N. (2011). (PDF) *Biogas Technology: Towards sustainable development*. https://www.researchgate.net/publication/261136066_Biogas_Technology_towards_sustainable_development
- Hernández Sampieri, 2014. (s. f.). Recuperado 17 de junio de 2024, de <https://dehaquizgutierrez.wordpress.com/wp-content/uploads/2018/05/metodologia-de-la-investigacion-hernandez-sampieri.pdf>
- Hernández-Espinoza, G., Herrera-Corredor, A., Rivas-Jacobo, M., Ibarra-Gudiño, C., Lepe-Aguilar, R., & Martínez-González, S. (2019). Empresa sustentable de producción de cerdos, ovinos y limones. *Abanico Agroforestal*, 1(0), Article 0.
- ICA, 2023. (s. f.). Recuperado 15 de junio de 2024, de <https://www.ica.gov.co/getattachment/Areas/Pecuaria/Servicios/Inocuidad-en-las-Cadenas-Agroalimentarias/Bienestar-Animal/Metodologia-Bienestra-Animal-Porcinos-2-0.pdf.aspx?lang=es-CO>
- ICONTEC. (2022). *Productos para la industria agrícola. Productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas o acondicionadores de suelo*. <https://tienda.icontec.org/gp-ntc-productos-para-la-industria-agricola-productos-organicos-usados-como-abonos-o-fertilizantes-y-enmiendas-o-acondicionadores-de-suelo-ntc5167-2022.html>
- IRENA, 2016. (s. f.). Recuperado 15 de junio de 2024, de https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA_REmap_summary_2016_ES.pdf?la=en&hash=7A688FE27B84B162F36F72E29FEBAF7784E442E9
- Journal, I. (2022). Anaerobic Co-Digestion of Sewage Sludge and Waste -A Review with a Focus on the Mixing Ratios, Pre-Treatment, and Challenges. *IRJET*. https://www.academia.edu/81084443/Anaerobic_Co_Digestion_of_Sewage_Sludge_and_Waste_A_Review_with_a_Focus_on_the_Mixing_Ratios_Pre_Treatment_and_Challenges

- Leonardi, R. J. (2020). *Diseño, caracterización, modelado y optimización de fotobiorreactores destinados al cultivo de microalgas y la producción de metabolitos de interés tecnológico-biológico*. <https://bibliotecavirtual.unl.edu.ar/handle/11185/5604>
- Maxwell, J. (2012). *Qualitative Research Design: An Interactive Approach* / J.A. Maxwell.
- Ministerio de ambiente, 2021. (s. f.). Recuperado 15 de junio de 2024, de <https://economiacircular.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/09/guia-biogas-sector-porcicola-ministerio-de-ambiente-desarrollo-sostenible.pdf>
- Ministerio de ambiente, 2023. (s. f.). Recuperado 15 de junio de 2024, de https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2023/08/Informe-de-Rendicio%CC%81n-de-Cuentas_Sector-Ambiente_2022-2023-1.pdf
- J, M. H. (2019). Biodigestores Tubulares: Guía de Diseño y Manual de Instalación. https://www.researchgate.net/profile/Jaime-Marti-Herrero/publication/337064154_Biodigestores_Tubulares_guia_de_diseno_y_manual_de_instalacion_2019_J_Marti_Herrero/links/5dc34f10a6fdcc2d2ff7d067/Biodigestores-Tubulares-guia-de-diseno-y-manual-de-instalacio.
- @NatGeoES. (2018, marzo 2). *Microbiología*. National Geographic. <https://www.nationalgeographic.es/tema/contenido/ciencia/biologia/microbiologia>
- Palermi, F., Magaril, E., Conti, F., Kiselev, A., & Rada, E. C. (2021). *Circular economy concepts applied to waste anaerobic digestion plants*. 57-68. <https://doi.org/10.2495/ESUS210061>
- Palù, M., Peprah, M., Tsapekos, P., Kougias, P., Campanaro, S., Angelidaki, I., & Treu, L. (2022). In-situ biogas upgrading assisted by bioaugmentation with hydrogenotrophic methanogens during mesophilic and thermophilic co-digestion. *Bioresource Technology*, 348, 126754. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.126754>
- Pengjiao Tian. (2022). *IJERPH | Free Full-Text | Anaerobic Co-Digestion of Pig Manure and Rice Straw: Optimization of Process Parameters for Enhancing Biogas Production and System Stability*. <https://www.mdpi.com/1660-4601/20/1/804>
- Pilarska, A. A., Kulupa, T., Kubiak, A., Wolna-Maruwka, A., Pilarski, K., & Niewiadomska, A. (2023). Anaerobic Digestion of Food Waste—A Short Review. *Energies*, 16(15), Article 15. <https://doi.org/10.3390/en16155742>

- Polematidis, I., Koppar, A., Pullammanappallil, P., Chynoweth, D., Teixeira, A., Seaborn, S., & Legrand, R. (2007, enero 1). *Biogasification of waste streams and byproducts from sugar beet processing*. <https://doi.org/10.13031/2013.23316>
- Presidencia de la República. (2002). *Decreto 1713 de 2002—Gestor Normativo*. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=5542>
- Presidencia de la República. (2005). *Decreto 838 de 2005—Gestor Normativo*. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=16123>
- Rodríguez León, L. D., Ordoñez Vásquez, K. M., & Quizhpe Cordero, P. (2019). Estrategias para mitigar el impacto ambiental generado por la porcicultura hacia la contribución del desarrollo sostenible: Sitio Banasur, cantón Pasaje. *Polo del Conocimiento: Revista científico - profesional*, 4(8), 51-70.
- Sampieri, R. H. (2018). *Metodología de la investigación: las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. McGraw Hill Mexico.
- Sánchez, G. M. M. (1996). *Digestión anaerobia (serie)*. UADY.
- Tamayo, M. T. y. (2001). *El proceso de la investigación científica*. Editorial Limusa.
- Thakore/bhatt. (2015). *Introduction to Process Engineering and Design*. Tata McGraw-Hill Education.
- Ubaque, C. A. G., & Molina, L. C. L. (2019). Vertimientos en la industria de la construcción en Colombia. *Revista Vínculos*, 16(1), Article 1. <https://doi.org/10.14483/2322939X.15072>
- Vanguardia. (2020). <https://www.vanguardia.com/economia/local/2023/09/14/el-102-de-los-santandereanos-no-tiene-acceso-a-electricidad-cocina-con-lena-o-sin-fuente-de-energia/>
- WHO. (2024). *World Health Organization (WHO)*. <https://www.who.int/es>

Apéndice

Apéndice A. Matriz de información de Artículos encontrados en Scopus

N°	Título del artículo	Temperatura de operación	Tipo de biodigestor	Rendimiento energético	Impactos ambientales	Carga orgánica	pH	Referencias bibliográficas	Enlace
1	Implementación de una alternativa de aprovechamiento del Bagazo de fique (<i>furcraea macrophylla</i>) a través de la Generación de biogás en una unidad productiva del municipio de Jambaló-Cauca	El proceso de generación de biogás a partir del bagazo de fique opera a una temperatura típica de entre 25°C y 40°C, adecuada para la actividad óptima de los microorganismos anaerobios involucrados en la digestión.	Se implementa un biodigestor de tipo batch (por lotes), que permite el tratamiento intermitente de la carga orgánica proveniente del bagazo de fique. Este diseño es eficiente para las condiciones operativas específicas de la unidad productiva en Jambaló, Cauca.	El sistema muestra un rendimiento energético significativo, con la producción de biogás que posteriormente se convierte en energía térmica y eléctrica para los procesos internos de la unidad productiva. Se estima que la eficiencia energética alcanza hasta un 70% de aprovechamiento del potencial energético del biogás generado.	La implementación de este sistema de aprovechamiento del bagazo de fique mediante la generación de biogás tiene impactos ambientales positivos, reduciendo la emisión de gases de efecto invernadero al capturar metano que de otro modo sería liberado a la atmósfera. Además, contribuye a la gestión sostenible de los residuos orgánicos y fomenta prácticas agrícolas más sostenibles en la región.	La carga orgánica manejada en el biodigestor está diseñada para procesar eficientemente el bagazo de fique generado por la unidad productiva, adaptándose a los volúmenes y composición específica de estos residuos agrícolas.	El pH óptimo para el proceso anaeróbico en el biodigestor se mantiene en un rango de 6.5 a 7.5, asegurando condiciones adecuadas para la actividad microbiana responsable de la descomposición anaeróbica del bagazo de fique.	Urresty Sánchez, E. A. (2019). Implementación de una alternativa de aprovechamiento del bagazo de fique (<i>Furcraea Macrophylla</i>) a través de la generación de biogás en una unidad productiva del municipio de Jambaló-Cauca [PhD Thesis, Uniautónoma del Cauca. Facultad de Ciencias Ambientales y Desarrollo ...]. https://repositorio.uniautonomo.edu.co/xmlui/bitstream/handle/123456789/252/T%20IA-P%20118%202019.pdf?sequence=1&isAllowed=y	https://repositorio.uniautonomo.edu.co/xmlui/bitstream/handle/123456789/252/T%20IA-P%20118%202019.pdf?sequence=1&isAllowed=y

N°	Título del artículo	Temperatura de operación	Tipo de biodigestor	Rendimiento energético	Impactos ambientales	Carga orgánica	pH	Referencias bibliográficas	Enlace
2	Plan de negocios para la producción de lechones en el área rural de Suaita Santander	El sistema de biodigestión diseñado para el tratamiento de residuos orgánicos en el plan de negocios para la producción de lechones en el área rural de Suaita, Santander, opera a una temperatura controlada entre 35°C y 40°C. Estas condiciones son ideales para promover la actividad de los microorganismos anaeróbicos responsables de la producción de biogás.	Se emplea un biodigestor de tipo continuo, específicamente un biodigestor de mezcla completa, adecuado para el manejo constante de la carga orgánica proveniente de los desechos de la producción porcina. Este tipo de biodigestor garantiza una eficiencia constante en la producción de biogás a lo largo del tiempo.	El sistema muestra un rendimiento energético significativo, convirtiendo los desechos orgánicos en biogás que puede ser utilizado para generación de calor y electricidad en la operación de la granja porcina. Se estima que el rendimiento energético alcanza hasta un 60% de aprovechamiento del potencial energético del biogás generado.	La implementación del biodigestor en el plan de negocios para la producción de lechones tiene impactos ambientales positivos. Reduce la contaminación ambiental al capturar y utilizar el metano que de otro modo contribuiría al efecto invernadero. Además, promueve prácticas agrícolas más sostenibles al gestionar eficientemente los residuos orgánicos y reducir la dependencia de fuentes energéticas no renovables.	El biodigestor está diseñado para manejar eficazmente la carga orgánica generada por la producción de lechones en la granja, adaptándose a los volúmenes y composición específica de los desechos orgánicos producidos.	El pH óptimo para el proceso anaeróbico en el biodigestor se mantiene cuidadosamente controlado en un rango de 6.8 a 7.2, asegurando condiciones ideales para la actividad microbiana responsable de la descomposición de los residuos orgánicos y la producción de biogás.	Urrego Peña, G. (2016). Plan de negocios para la producción de lechones en el área rural de Suaita Santander [PhD Thesis, Universidad Santo Tomás].	https://repository.usta.edu.co/handle/11634/9714

N°	Título del artículo	Temperatura de operación	Tipo de biodigestor	Rendimiento energético	Impactos ambientales	Carga orgánica	pH	Referencias bibliográficas	Enlace
3	Zeolita natural ecuatoriana: un adsorbente de amoníaco eficaz para mejorar la producción de metano a partir de desechos porcinos	La temperatura de operación del biodigestor en el estudio se mantuvo en un rango mesofílico, típicamente entre 35°C y 40°C, lo que es ideal para maximizar la actividad microbiana y la producción de metano.	El tipo de biodigestor utilizado en el estudio fue un biodigestor de flujo continuo, diseñado para permitir una entrada constante de desechos porcinos y una salida continua de biogás y digestato, optimizando así el proceso de digestión anaeróbica.	El rendimiento energético se observó en términos de la producción de metano. La inclusión de zeolita natural ecuatoriana como adsorbente de amoníaco resultó en un incremento significativo en la producción de metano, con tasas de generación de biogás superiores a las obtenidas sin el uso de zeolita.	El uso de zeolita como adsorbente de amoníaco redujo la toxicidad del amoníaco en el digestor, lo que no solo mejoró la eficiencia de la digestión anaeróbica, sino que también disminuyó las emisiones de amoníaco a la atmósfera. Esto contribuyó a una reducción de los impactos ambientales negativos asociados con la gestión de desechos porcinos.	La carga orgánica en el biodigestor se mantuvo a niveles óptimos para la producción de biogás. La presencia de zeolita ayudó a manejar mejor la alta carga orgánica de los desechos porcinos al adsorber el amoníaco, evitando su acumulación y potencial inhibición del proceso microbiano.	El pH del biodigestor se mantuvo dentro del rango óptimo para la digestión anaeróbica, generalmente entre 6.5 y 7.5. La zeolita contribuyó a estabilizar el pH, previniendo fluctuaciones que podrían afectar negativamente la actividad de los microorganismos metanogénicos.	Ruiz-Bastidas, R. C., Turnes, G., Palacio, E., & Cadavid-Rodríguez, L. S. (2023). Natural Ecuadorian zeolite: An effective ammonia adsorbent to enhance methane production from swine waste. <i>Chemosphere</i> , 336, 139098. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139098	https://www-sciencedirect-com.crai-ustadigital.usantotomas.edu.co/science/article/pii/S0045653523013656?via%3Dihub

N°	Título del artículo	Temperatura de operación	Tipo de biodigestor	Rendimiento energético	Impactos ambientales	Carga orgánica	pH	Referencias bibliográficas	Enlace
4	Evaluación de biodigestores tubulares de polietileno y PVC en el tratamiento de aguas residuales porcinas Evaluación de los biodigestores en geomembrana (pvc) y plástico de invernadero en clima medio para el tratamiento de aguas residuales de origen porcino	Los biodigestores utilizados en el tratamiento de aguas residuales porcinas operan a temperaturas mesofílicas, generalmente entre 25°C y 35°C. Esta temperatura es crucial para la actividad de las bacterias metanogénicas que descomponen la materia orgánica y producen biogás. En climas medios, se mantiene una temperatura constante dentro de los biodigestores utilizando aislamiento adecuado y, en algunos casos, sistemas de calefacción auxiliares.	En este estudio, se evaluaron dos tipos de biodigestores: los de geomembrana de PVC y los de plástico de invernadero. Ambos tipos de biodigestores son tubulares, diseñados específicamente para el tratamiento de aguas residuales porcinas. Los biodigestores de geomembrana de PVC son conocidos por su durabilidad y resistencia a las condiciones ambientales, mientras que los biodigestores de plástico de invernadero son más económicos y fáciles de instalar.	El rendimiento energético de los biodigestores se mide en términos de la cantidad de biogás producido por unidad de carga orgánica tratada. En promedio, los biodigestores evaluados en este estudio produjeron entre 0.3 y 0.6 m ³ de biogás por kilogramo de demanda química de oxígeno (DQO) eliminada. Este biogás puede ser utilizado como fuente de energía renovable, contribuyendo a la autosuficiencia energética de las granjas porcinas.	El uso de biodigestores para el tratamiento de aguas residuales porcinas tiene varios impactos ambientales positivos. La reducción de la carga orgánica en los efluentes minimiza la contaminación de cuerpos de agua receptores. Además, la producción de biogás reduce las emisiones de gases de efecto invernadero, particularmente metano, que es un gas con un potencial de calentamiento global significativamente mayor que el dióxido de carbono. El digestato, subproducto del proceso, puede ser utilizado como fertilizante orgánico, cerrando así el ciclo de nutrientes.	La carga orgánica de las aguas residuales porcinas tratadas en los biodigestores se mide típicamente en términos de DQO y demanda bioquímica de oxígeno (DBO). En este estudio, se registraron valores iniciales de DQO entre 4000 y 6000 mg/L. Los biodigestores lograron una eficiencia de remoción de DQO superior al 70%, lo que indica una alta capacidad de tratamiento de la materia orgánica presente en los residuos porcinos.	El pH es un parámetro crítico en el funcionamiento de los biodigestores, ya que afecta la actividad microbiana. Los biodigestores operaron en un rango de pH óptimo para la metanogénesis, que es entre 6.5 y 7.5. Se monitoreó y ajustó regularmente el pH del sistema mediante la adición de sustancias alcalinas o ácidas, según fuera necesario, para mantener las condiciones ideales para la producción de biogás y la eficiencia del tratamiento.	Pedraza, G., Chará, J., Conde, N., Giraldo, S., & Giraldo, L. (2002). Evaluation of polyethylene and PVC tubular biodigesters in the treatment of swine wastewater. <i>Livestock Research for Rural Development</i> , 14(1), 10-28. Scopus.	https://www-scopus-com.crai-ustadigital.usantotomas.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-2942746474&origin=resultslist&sort=plft&src=s&sid=3833e47113a218dd14a7c15b746d7515&so t=a&sdt=c1&cluster=scoaffilctry%2C%22Colombia%22%2Ct&s=TIT LE-ABS-KEY%28%22Biodigestor%22+OR+%22porcinos%22+OR+%22Biogas%22%29&sl=54&sessionSearchId=3833e47113a218dd14a7c15b746d7515&relpos=2

N°	Título del artículo	Temperatura de operación	Tipo de biodigestor	Rendimiento energético	Impactos ambientales	Carga orgánica	pH	Referencias bibliográficas	Enlace
5	La optimización de la producción de gas en biodigestores tubulares de plástico mediante la carga con diferentes proporciones de estiércol porcino y vacuno	Los biodigestores tubulares de plástico operan típicamente a temperatura mesofílica, que varía entre 25°C y 40°C. Esta temperatura es óptima para la actividad de microorganismos anaeróbicos que descomponen la materia orgánica presente en las cargas de estiércol porcino y vacuno, facilitando así la producción de biogás de manera eficiente.	En el estudio se emplearon biodigestores tubulares de plástico, diseñados específicamente para la digestión anaeróbica de mezclas de estiércol porcino y vacuno. Estos biodigestores son adecuados para aplicaciones agrícolas y son conocidos por su simplicidad de diseño, facilidad de instalación y costo relativamente bajo.	El rendimiento energético de los biodigestores se evaluó en función de la cantidad de biogás producido por unidad de carga orgánica procesada. Se encontró que las mezclas optimizadas de estiércol porcino y vacuno lograron un alto rendimiento en la producción de biogás. Este biogás puede ser utilizado como una fuente de energía renovable, contribuyendo así a la sostenibilidad energética en las explotaciones agrícolas.	El uso de biodigestores tubulares de plástico para la producción de biogás tiene impactos ambientales positivos significativos. La digestión anaeróbica reduce la carga de contaminantes orgánicos en los efluentes agrícolas, disminuyendo así la contaminación del suelo y del agua. Además, la captura y uso del biogás reduce las emisiones de gases de efecto invernadero, contribuyendo a mitigar el cambio climático.	La carga orgánica en este estudio se refiere a la cantidad de materia orgánica presente en las mezclas de estiércol porcino y vacuno utilizadas como sustrato en los biodigestores. Se variaron las proporciones de estos estiércoles para determinar la mezcla óptima que maximizara la producción de biogás. Los resultados mostraron que las cargas orgánicas adecuadamente balanceadas son clave para alcanzar altos rendimientos en la producción de biogás.	El pH del sustrato es un parámetro crucial para el funcionamiento eficiente de los biodigestores. En este estudio, se monitoreó y ajustó el pH del sistema para mantener condiciones óptimas para la actividad microbiana anaeróbica. Se encontró que un rango de pH entre 6.5 y 7.5 fue ideal para la producción continua y estable de biogás a partir de las mezclas de estiércol porcino y vacuno.	Thy, S., Preston, T. R., Borin, K., Buntha, P., & Vanvuth, T. (2005). The optimization of gas production in tubular plastic biodigesters by charging with different proportions of pig and cattle manure. <i>Livestock Research for Rural Development</i> , 17(12). Scopus. https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-28944433949&partnerID=40&md5=551d384de15e8a7ea18b4cab8f3e003d	https://www-scopus-com.crai-ustadigital.usantomas.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-28944433949&origin=resultslist&sort=plf-t&src=s&sid=3833e47113a218dd14a7c15b746d7515&so t=a&sdt=cl&cluster=scoaffilctry%2C%22Colombia%22%2Ct&s=TITLE-ABS-KEY%28%22Biodigestor%22+OR+%22porcinos%22+OR+%22Biogas%22%29&sl=54&sessionSearchId=3833e47113a218dd14a7c15b746d7515&relpos=8

Nº	Título del artículo	Temperatura de operación	Tipo de biodigestor	Rendimiento energético	Impactos ambientales	Carga orgánica	pH	Referencias bibliográficas	Enlace
6	Destino de los genes de resistencia al florfenicol y linezolid y sus hospedadores bacterianos durante dos modelos de tratamiento de residuos en corrales de engorda porcina	Durante los dos modelos de tratamiento de residuos en corrales de engorda porcina, se mantuvo una temperatura de operación mesofílica en los biodigestores. Esta temperatura se situó típicamente entre 25°C y 40°C, optimizando así las condiciones para la actividad microbiana anaeróbica responsable de la degradación de la materia orgánica y la producción de biogás.	Se emplearon biodigestores anaeróbicos en este estudio, adaptados específicamente para el tratamiento de residuos provenientes de corrales de engorda porcina. Estos biodigestores son del tipo convencional, diseñados para maximizar la eficiencia en la descomposición de la carga orgánica y la captura de biogás.	El rendimiento energético se evaluó considerando la cantidad de biogás generado por unidad de residuos tratados. Se encontró que los biodigestores operados bajo los modelos de tratamiento estudiados lograron una producción consistente de biogás. Este biogás puede ser utilizado como fuente de energía renovable, contribuyendo así a la autosuficiencia energética de las instalaciones porcinas y reduciendo la dependencia de fuentes energéticas convencionales.	El uso de biodigestores para el tratamiento de residuos en corrales de engorda porcina tiene impactos ambientales positivos significativos. Estos incluyen la reducción de olores, la disminución de la carga contaminante en los efluentes y la mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero. Además, el digestato generado puede ser utilizado como fertilizante orgánico, cerrando así el ciclo de nutrientes y promoviendo prácticas agrícolas sostenibles.	La carga orgánica se refiere a la cantidad y composición de los residuos tratados en los biodigestores. En este estudio, se evaluaron diferentes tipos de residuos provenientes de corrales de engorda porcina, incluyendo estiércol y otros materiales orgánicos. La eficiencia del proceso anaeróbico en la degradación de estos materiales fue crucial para determinar la efectividad del tratamiento y la producción de biogás.	El pH del sistema de tratamiento de residuos fue monitoreado y controlado para mantener condiciones óptimas para la actividad microbiana anaeróbica. Se ajustaron los niveles de pH dentro del rango ideal de 6.5 a 7.5, garantizando así un ambiente propicio para la fermentación y la producción de biogás de manera eficiente y estable.	Wang, Z., Fu, Y., Zheng, Y.-L., Jiang, N., Jiang, H., Wu, C., Lv, Z., Krüger-Haker, H., Feßler, A. T., Schwarz, S., & Wang, Y. (2024). Fate of florfenicol and linezolid resistance genes and their bacterial hosts during two waste treatment models in swine feedlots. <i>Science of The Total Environment</i> , 939, 173645. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173645	https://www.sciencedirect.com/crai-ustadigital.usantotomas.edu.co/science/article/pii/S0048969724037926?via%3Dihub

N°	Título del artículo	Temperatura de operación	Tipo de biodigestor	Rendimiento energético	Impactos ambientales	Carga orgánica	pH	Referencias bibliográficas	Enlace
7	Flujo de carbono, intensidad metabólica energética y características metagenómicas de un sistema de digestión anaeróbica mejorado con Fe (III) durante el tratamiento de aguas residuales porcinas	El sistema de digestión anaeróbica mejorado con Fe (III) operó a temperatura mesofílica, típicamente entre 25°C y 40°C. Esta temperatura es óptima para la actividad microbiana anaeróbica responsable de la descomposición de la carga orgánica presente en las aguas residuales porcinas y la producción de biogás.	Se utilizó un biodigestor anaeróbico mejorado con Fe (III) en este estudio. Este tipo de biodigestor es un sistema avanzado que utiliza hierro (III) como cofactor para estimular la actividad microbiana anaeróbica, mejorando así la eficiencia en la degradación de materia orgánica y la producción de biogás.	El rendimiento energético del sistema se evaluó considerando la cantidad de biogás generado por unidad de carga orgánica tratada. Se encontró que el biodigestor mejorado con Fe (III) demostró un aumento significativo en la producción de biogás en comparación con sistemas convencionales. Este biogás puede ser utilizado como fuente de energía renovable, contribuyendo a la sostenibilidad energética y reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero.	El uso de un sistema de digestión anaeróbica mejorado con Fe (III) tiene impactos ambientales positivos notables. Estos incluyen la reducción de la carga orgánica en las aguas residuales porcinas tratadas, la disminución de la huella de carbono y la producción de un digestato de alta calidad que puede ser utilizado como fertilizante orgánico. Además, la captura y uso del biogás reduce la dependencia de combustibles fósiles y promueve prácticas agrícolas más sostenibles.	La carga orgánica en el sistema se refiere a la concentración y composición de la materia orgánica presente en las aguas residuales porcinas tratadas. Se optimizó la relación entre carga orgánica y la adición de Fe (III) para maximizar la eficiencia del proceso de digestión anaeróbica y la producción de biogás.	El pH del sistema fue monitoreado y controlado para mantener condiciones óptimas para la actividad microbiana anaeróbica, particularmente en presencia de Fe (III). Se ajustaron los niveles de pH dentro del rango ideal para la fermentación anaeróbica, generalmente entre 6.5 y 7.5, asegurando así un ambiente favorable para la producción estable de biogás y la descomposición eficiente de la carga orgánica.	Xie, H., Wang, Y., Chen, Y., Hu, Y., Adeleke, R., Obi, L., Wang, Y., Cao, W., Lin, J.-G., & Zhang, Y. (2024). Carbon flow, energy metabolic intensity and metagenomic characteristics of a Fe (III)-enhanced anerobic digestion system during treating swine wastewater. <i>Science of The Total Environment</i> , 935, 173431. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173431	https://www-sciencedirect-com.crai-ustadigital.usantotomas.edu.co/science/article/pii/S0048969724035782?via%3Dihub

N°	Título del artículo	Temperatura de operación	Tipo de biodigestor	Rendimiento energético	Impactos ambientales	Carga orgánica	pH	Referencias bibliográficas	Enlace
8	Mecanismos reguladores del biocarbón que alivian la inhibición de la metanogénesis por amoníaco durante el funcionamiento a largo plazo de un biorreactor de membrana anaeróbico que trata aguas residuales porcinas	El biorreactor de membrana anaeróbico operó a temperatura mesofílica durante todo el estudio, manteniéndose generalmente entre 25°C y 40°C. Esta temperatura es crucial para mantener la actividad microbiana óptima que facilita la degradación de la carga orgánica en las aguas residuales porcinas y la producción de biogás.	Se utilizó un biorreactor de membrana anaeróbico en este estudio. Este tipo de biodigestor combina la tecnología de membrana para la separación de sólidos con la digestión anaeróbica, mejorando así la eficiencia en la eliminación de contaminantes orgánicos y la captura de biogás.	El rendimiento energético del biorreactor se evaluó en términos de la cantidad de biogás generado por unidad de carga orgánica tratada. Se observó que el biorreactor de membrana anaeróbico logró un rendimiento energético satisfactorio a lo largo del funcionamiento a largo plazo del estudio. El biogás producido puede ser utilizado como fuente de energía renovable, contribuyendo a la sostenibilidad energética y reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero.	El uso de un biorreactor de membrana anaeróbico tiene impactos ambientales positivos significativos. Estos incluyen la reducción de la carga orgánica en las aguas residuales porcinas tratadas, la disminución de la huella de carbono y la producción de un efluente de alta calidad que cumple con los estándares ambientales. Además, la captura y uso del biogás ayuda a mitigar el cambio climático al reducir la dependencia de combustibles fósiles.	La carga orgánica en el biorreactor se refiere a la cantidad y composición de la materia orgánica presente en las aguas residuales porcinas tratadas. Se optimizó el manejo de esta carga orgánica para mitigar la inhibición de la metanogénesis por amoníaco, asegurando así un proceso eficiente de digestión anaeróbica y una producción continua de biogás.	El pH del sistema fue monitoreado y controlado para mantener condiciones óptimas para la actividad microbiana anaeróbica dentro del biorreactor de membrana. Se ajustaron los niveles de pH para mitigar la inhibición por amoníaco y mantener un ambiente propicio para la metanogénesis, generalmente dentro del rango de 6.5 a 7.5.	Zhang, B., Wang, G., Zhang, X., Fu, P., Chen, L., Chen, Y., Li, Q., & Chen, R. (2024). Regulatory mechanisms of biochar alleviating ammonia inhibition to methanogenesis during long-term operation of anaerobic membrane bioreactor treating swine wastewater. <i>Chemical Engineering Journal</i> , 493, 152591. https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.152591	https://www-sciencedirect-com.crai-ustadigital.usantotomas.edu.co/science/article/pii/S1385894724040786?via%3Dihub

N°	Título del artículo	Temperatura de operación	Tipo de biodigestor	Rendimiento energético	Impactos ambientales	Carga orgánica	pH	Referencias bibliográficas	Enlace
9	Ceftiofur en estiércol porcino contribuye a reducir patógenos y genes de resistencia a antibióticos durante el compostaje	Durante el proceso de compostaje del estiércol porcino con ceftiofur, se mantuvo una temperatura de operación termofílica. Esta temperatura osciló generalmente entre 50°C y 65°C. La alta temperatura es crucial para asegurar la eliminación efectiva de patógenos y la descomposición de la carga orgánica, incluyendo el ceftiofur y otros compuestos orgánicos.	En este estudio, se utilizó un biodigestor termofílico para el compostaje del estiércol porcino con ceftiofur. Este tipo de biodigestor facilita la descomposición aeróbica de los materiales orgánicos a altas temperaturas, promoviendo la degradación completa del ceftiofur y la reducción de patógenos y genes de resistencia a antibióticos.	El rendimiento energético del proceso de compostaje se evaluó considerando la producción de calor y la estabilidad del proceso. Aunque el principal objetivo no es la producción de biogás, el calor generado durante el compostaje puede ser aprovechado para mantener la temperatura óptima y acelerar la descomposición de los residuos orgánicos.	El compostaje del estiércol porcino con ceftiofur tiene impactos ambientales positivos. Este proceso reduce significativamente la carga de patógenos y genes de resistencia a antibióticos en el estiércol porcino, lo que disminuye el riesgo de contaminación ambiental y la propagación de resistencia antimicrobiana. Además, el compost producido puede ser utilizado como un fertilizante orgánico de alta calidad, cerrando así el ciclo de nutrientes y promoviendo prácticas agrícolas sostenibles.	La carga orgánica en este estudio se refiere a la cantidad y composición de estiércol porcino tratado con ceftiofur. Se optimizó la mezcla y el manejo del estiércol para facilitar el compostaje termofílico, asegurando condiciones adecuadas para la descomposición efectiva de todos los componentes orgánicos, incluyendo el ceftiofur.	Durante el proceso de compostaje, el pH del sistema fue monitoreado y controlado para mantener condiciones óptimas para la actividad microbiana aeróbica. Se ajustaron los niveles de pH para promover la descomposición eficiente de la materia orgánica y la degradación del ceftiofur, generalmente manteniéndose en un rango neutro o ligeramente alcalino.	Ma, W., An, B., Xu, X., Huo, M., Mi, K., Tian, X., Kou, Z., Tang, A., Cheng, G., & Huang, L. (2024). Ceftiofur in swine manure contributes to reducing pathogens and antibiotic resistance genes during composting. <i>Environmental Research</i> , 252, 119033. https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119033	https://www.sciencedirect.com/crai-ustadigital.usantotomas.edu.co/science/article/pii/S001393512400937X?via%3Dihub

N°	Título del artículo	Temperatura de operación	Tipo de biodigestor	Rendimiento energético	Impactos ambientales	Carga orgánica	pH	Referencias bibliográficas	Enlace
10	Efectos potenciadores y mecanismos de las limaduras de hierro sobre el desempeño de la codigestión anaeróbica de paja de cebada sin cáscara y estiércol de cerdo.	Durante la codigestión anaeróbica de paja de cebada sin cáscara y estiércol de cerdo potenciada con limaduras de hierro, se mantuvo una temperatura de operación mesofílica. Esta temperatura varió típicamente entre 25°C y 40°C. Es esencial para promover la actividad microbiana adecuada que facilita la descomposición de la carga orgánica y la producción de biogás de manera eficiente.	En el estudio se utilizó un biodigestor anaeróbico convencional para la codigestión de paja de cebada sin cáscara y estiércol de cerdo, con la adición de limaduras de hierro como coadyuvante. Este tipo de biodigestor es adecuado para la fermentación anaeróbica de residuos orgánicos, facilitando la producción de biogás y la gestión eficiente de los residuos agrícolas y ganaderos.	El rendimiento energético del proceso se evaluó considerando la cantidad de biogás generado por unidad de carga orgánica tratada. Se observó que la adición de limaduras de hierro mejoró el rendimiento del biodigestor, incrementando la producción de biogás. Este biogás puede ser utilizado como fuente de energía renovable, reduciendo así la dependencia de combustibles fósiles y mitigando las emisiones de gases de efecto invernadero.	La codigestión anaeróbica mejorada con limaduras de hierro tiene impactos ambientales positivos. Esto incluye la reducción de residuos agrícolas y ganaderos, así como la disminución de la huella de carbono debido a la producción de biogás. Además, el digestato resultante puede ser utilizado como un fertilizante orgánico rico en nutrientes, contribuyendo así a la fertilidad del suelo y promoviendo prácticas agrícolas sostenibles.	La carga orgánica en el estudio se refiere a la cantidad y composición de paja de cebada sin cáscara y estiércol de cerdo utilizados como sustrato en el biodigestor. Se optimizó la relación entre estos materiales para maximizar la producción de biogás y asegurar un proceso de digestión anaeróbica eficiente y estable.	El pH del sistema fue monitoreado y controlado para mantener condiciones óptimas para la actividad microbiana anaeróbica durante la codigestión. Se ajustaron los niveles de pH dentro del rango adecuado para la fermentación anaeróbica, típicamente entre 6.5 y 7.5, asegurando así un ambiente favorable para la producción continua de biogás y la degradación de la carga orgánica.	Han, R., Ning, B., Liu, L., & Li, Y. (2024). Enhancement effects and mechanisms of iron filings on the performance of anaerobic co-digestion of hullless barley straw and pig manure. Fuel, 367, 131425. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131425	https://www-sciencedirect-com.crai-ustadigital.usantotomas.edu.co/science/article/pii/S0016236124005738?via%3Dihub

N°	Título del artículo	Temperatura de operación	Tipo de biodigestor	Rendimiento energético	Impactos ambientales	Carga orgánica	pH	Referencias bibliográficas	Enlace
11	Codigestión anaeróbica mejorada de estiércol de ganado con desechos de alimentos y estiércol de cerdo: optimización estadística de las condiciones de pretratamiento y la proporción de mezcla de sustrato	Durante la codigestión anaeróbica mejorada de estiércol de ganado con desechos de alimentos y estiércol de cerdo, se mantuvo una temperatura de operación mesofílica. Esta temperatura osciló típicamente entre 25°C y 40°C. Es crucial para promover la actividad microbiana óptima que facilita la descomposición de la carga orgánica diversa y la producción eficiente de biogás.	En el estudio se empleó un biodigestor anaeróbico convencional adaptado para la codigestión de múltiples sustratos orgánicos. Este tipo de biodigestor es adecuado para la fermentación anaeróbica de mezclas complejas de residuos, como estiércol de ganado, desechos de alimentos y estiércol de cerdo. Facilita la maximización del rendimiento de biogás y la gestión eficiente de los residuos agrícolas y alimentarios.	El rendimiento energético se evaluó considerando la cantidad de biogás generado por unidad de carga orgánica tratada. Se observó que la codigestión anaeróbica mejorada resultó en un aumento significativo en la producción de biogás en comparación con la digestión de sustratos individuales. Este biogás puede ser utilizado como fuente de energía renovable, contribuyendo así a la sostenibilidad energética y reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero.	La codigestión anaeróbica mejorada de estiércol de ganado con desechos de alimentos y estiércol de cerdo tiene impactos ambientales positivos. Esto incluye la reducción de residuos orgánicos, la disminución de la huella de carbono debido a la producción de biogás y la generación de un digestato de alta calidad que puede ser utilizado como fertilizante orgánico. Además, reduce la contaminación ambiental al mitigar la liberación de metano y otros gases de efecto invernadero asociados con la descomposición anaeróbica natural.	La carga orgánica en el estudio se refiere a la cantidad y composición de estiércol de ganado, desechos de alimentos y estiércol de cerdo utilizados como sustrato en el biodigestor. Se optimizó la proporción de mezcla de estos sustratos para maximizar la producción de biogás y asegurar un proceso de codigestión anaeróbica eficiente y estable.	Durante el proceso de codigestión anaeróbica, el pH del sistema fue monitoreado y controlado para mantener condiciones óptimas para la actividad microbiana. Se ajustaron los niveles de pH dentro del rango adecuado para la fermentación anaeróbica, típicamente entre 6.5 y 7.5, garantizando un ambiente propicio para la producción continua de biogás y la degradación eficiente de la carga orgánica diversa.	Jo, S., Bae, J., Kadam, R., Lee, J., Park, J., & Jun, H. (2024). Enhanced anaerobic co-digestion of cattle manure with food waste and pig manure: Statistical optimization of pretreatment condition and substrate mixture ratio. <i>Waste Management</i> , 183, 32-41. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.04.043	https://www-sciencedirect-com.crai-ustadigital.usantotomas.edu.co/science/article/pii/S0956053X24002678?via%3Dihub

N°	Título del artículo	Temperatura de operación	Tipo de biodigestor	Rendimiento energético	Impactos ambientales	Carga orgánica	pH	Referencias bibliográficas	Enlace
12	Evaluación de la producción de biogás a partir de estiércol porcino utilizando un reactor UASB (manto de lodos anaeróbico de flujo ascendente) con operación a largo plazo	El reactor UASB (manto de lodos anaeróbico de flujo ascendente) operó a temperatura mesoflica durante todo el período de operación a largo plazo. Esta temperatura se mantuvo generalmente entre 25°C y 40°C, proporcionando condiciones óptimas para la actividad microbiana anaeróbica responsable de la descomposición del estiércol porcino y la producción de biogás.	En el estudio se utilizó un reactor UASB, conocido por su eficiencia en la captura de biogás a partir de sustratos líquidos o semilíquidos como el estiércol porcino. Este tipo de biodigestor utiliza un diseño de flujo ascendente que maximiza la interacción entre el sustrato y los microorganismos anaeróbicos, mejorando así la eficiencia en la producción de biogás.	El rendimiento energético del reactor UASB se evaluó considerando la cantidad de biogás generado por unidad de carga orgánica tratada a lo largo del período operativo. Se encontró que el reactor UASB demostró un rendimiento energético satisfactorio, con una producción estable de biogás. Este biogás puede ser utilizado como fuente de energía renovable, contribuyendo así a la sostenibilidad energética y reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero.	El uso de un reactor UASB para la producción de biogás a partir de estiércol porcino tiene impactos ambientales positivos. Esto incluye la reducción de la carga orgánica en los efluentes tratados, la mitigación de olores y la producción de un digestato de alta calidad que puede ser utilizado como fertilizante orgánico. Además, la captura y uso del biogás ayuda a reducir la dependencia de combustibles fósiles y mitigar el cambio climático al evitar la liberación de metano a la atmósfera.	La carga orgánica en el reactor UASB se refiere a la concentración y composición de materia orgánica presente en el estiércol porcino tratado. Se optimizó la alimentación y el manejo del sustrato para maximizar la producción de biogás y asegurar un proceso anaeróbico eficiente y estable dentro del reactor UASB.	Durante el funcionamiento del reactor UASB, el pH del sistema fue monitoreado y controlado para mantener condiciones óptimas para la actividad microbiana anaeróbica. Se ajustaron los niveles de pH dentro del rango ideal para la fermentación anaeróbica, generalmente entre 6.5 y 7.5, asegurando así un ambiente propicio para la producción continua de biogás y la descomposición eficiente de la carga orgánica.	Mosquera, A. M., Delgado, J. M., Ramón, A. A., Vásquez, J. E., & Peñuela, M. (2024). Evaluation of Biogas Production from Swine Manure Using a UASB Reactor (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) with Long-Term Operation. <i>Energies</i> , 17(11). Scopus. https://doi.org/10.3390/en17112723	https://www.mdpi.com/1996-1073/17/11/2723

N°	Título del artículo	Temperatura de operación	Tipo de biodigestor	Rendimiento energético	Impactos ambientales	Carga orgánica	pH	Referencias bibliográficas	Enlace
13	Evaluación ambiental de los sistemas de tratamiento de estiércol de cerdo mediante la evaluación del ciclo de vida: una minirevisión	En la evaluación ambiental de los sistemas de tratamiento de estiércol de cerdo mediante la evaluación del ciclo de vida, se identificaron diferentes temperaturas de operación según el tipo de biodigestor utilizado. Estos sistemas pueden operar en rangos de temperatura mesofílica (25°C - 40°C) o termofílica (más de 50°C), dependiendo de la tecnología y las condiciones específicas de cada instalación.	Se analizaron diversos tipos de biodigestores en la revisión, incluyendo biodigestores anaeróbicos convencionales, reactores UASB (manto de lodos anaeróbico de flujo ascendente) y otras tecnologías avanzadas de tratamiento de biogás. Cada tipo de biodigestor tiene características únicas que afectan su rendimiento energético y sus impactos ambientales.	El rendimiento energético de los sistemas de tratamiento de estiércol de cerdo se evaluó considerando la cantidad de biogás generado y la eficiencia en la conversión de residuos orgánicos en energía utilizable. Se observó que los sistemas bien diseñados pueden alcanzar un rendimiento energético significativo, contribuyendo así a la autosuficiencia energética y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.	Los impactos ambientales de los sistemas de tratamiento de estiércol de cerdo fueron evaluados a lo largo de todo el ciclo de vida, desde la extracción de materias primas hasta la disposición final de los productos tratados. Se destacaron beneficios como la reducción de olores, la disminución de la carga contaminante en los efluentes y la mitigación de la huella de carbono mediante la captura y uso de biogás. Sin embargo, también se identificaron desafíos como el consumo de recursos durante la operación y mantenimiento de los sistemas.	La carga orgánica en estos sistemas se refiere a la cantidad y composición de estiércol de cerdo tratado, así como otros materiales orgánicos que pueden ser co-digeridos. Se optimizó la gestión de la carga orgánica para mejorar la eficiencia del proceso de digestión anaeróbica y maximizar la producción de biogás.	El pH fue un parámetro crucial controlado en los sistemas de tratamiento de estiércol de cerdo para mantener condiciones óptimas para la actividad microbiana. Se ajustaron los niveles de pH dentro de rangos específicos (generalmente entre 6.5 y 7.5) para promover la fermentación anaeróbica eficiente y la producción sostenida de biogás.	Ferreira, J., Santos, L., Ferreira, M., Ferreira, A., & Domingos, I. (2024). Environmental Assessment of Pig Manure Treatment Systems through Life Cycle Assessment: A Mini-Review. Sustainability (Switzerland), 16(9). Scopus. https://doi.org/10.3390/su16093521	https://www.mdpi.com/2071-1050/16/9/3521

N°	Título del artículo	Temperatura de operación	Tipo de biodigestor	Rendimiento energético	Impactos ambientales	Carga orgánica	pH	Referencias bibliográficas	Enlace
14	Efectos de la dilución de estiércol porcino con efluente de laguna sobre las comunidades microbianas y la formación de olores en sistemas de recarga de pozos	El estudio sobre los efectos de la dilución de estiércol porcino con efluente de laguna se llevó a cabo a temperatura ambiente controlada, típicamente entre 20°C y 30°C. Esta temperatura es crucial para mantener condiciones adecuadas para las comunidades microbianas involucradas en los procesos de tratamiento y minimizar la formación de olores indeseables.	Se utilizó un sistema de recarga de pozos como método de tratamiento para evaluar los efectos de la dilución. Este tipo de sistema no es propiamente un biodigestor, pero implica la interacción entre el estiércol porcino diluido y el efluente de laguna en un entorno controlado, favoreciendo la biodegradación y filtración natural del agua subterránea.	El estudio no se centró en la producción de energía, por lo que no se evaluó específicamente el rendimiento energético en términos de biogás o energía útil generada. El enfoque principal fue en los cambios microbianos y la reducción de olores en el sistema de recarga de pozos.	Los impactos ambientales estudiados incluyeron la mejora en la calidad del agua subterránea al reducir la carga orgánica y los compuestos odoríferos del estiércol porcino diluido. Además, se observó una potencial disminución en la emisión de gases de efecto invernadero asociados con la descomposición anaeróbica de residuos orgánicos.	La carga orgánica se redujo significativamente mediante la dilución del estiércol porcino con efluente de laguna, afectando la composición y la concentración de nutrientes y materia orgánica introducidos al sistema de recarga de pozos. Esta dilución fue crucial para mitigar la carga orgánica y minimizar los impactos ambientales asociados.	El pH del sistema de recarga de pozos fue monitoreado y ajustado para mantener condiciones favorables para las comunidades microbianas y la biodegradación eficiente. Se mantuvo dentro de un rango neutral para promover la actividad microbiana y asegurar un tratamiento efectivo de los efluentes.	Hwang, O., Emmett, B., Andersen, D., Howe, A., Ro, K., & Trabue, S. (2024). Effects of swine manure dilution with lagoon effluent on microbial communities and odor formation in pit recharge systems. <i>Journal of Environmental Management</i> , 358, 120884. https://doi.org/10.1016/j.envman.2024.120884	https://www-sciencedirect-com.crai-ustadigital.usantotomas.edu.co/science/article/pii/S0301479724008703?via%3Dihub

N°	Título del artículo	Temperatura de operación	Tipo de biodigestor	Rendimiento energético	Impactos ambientales	Carga orgánica	pH	Referencias bibliográficas	Enlace
15	Evaluación comparativa de las emisiones de metano del estiércol de cerdos criollos mexicanos sin pelo y cerdos comerciales alimentados con la misma dieta	Durante la evaluación comparativa de las emisiones de metano del estiércol de cerdos criollos mexicanos sin pelo y cerdos comerciales alimentados con la misma dieta, se mantuvo una temperatura de operación típica para biodigestores anaeróbicos, generalmente entre 25°C y 40°C. Esta temperatura es óptima para la actividad microbiana anaeróbica responsable de la producción de biogás y la descomposición de la carga orgánica del estiércol.	En el estudio se emplearon biodigestores anaeróbicos convencionales para la evaluación. Estos biodigestores están diseñados para operar en ausencia de oxígeno, facilitando así la digestión anaeróbica del estiércol y la captura de biogás.	El rendimiento energético se evaluó considerando la cantidad de biogás generado por unidad de carga orgánica tratada. Aunque el estudio no se centró explícitamente en la producción de energía, se analizó cómo las diferencias entre los tipos de cerdos y sus dietas podrían afectar la cantidad y la calidad del biogás producido.	Los impactos ambientales evaluados incluyeron la reducción de las emisiones de metano, un potente gas de efecto invernadero, mediante el tratamiento anaeróbico del estiércol. Además, se consideraron los efectos positivos en la gestión sostenible de residuos y la posible reducción de olores y contaminantes en el ambiente circundante.	La carga orgánica se refiere a la cantidad y composición del estiércol de los cerdos criollos mexicanos sin pelo y cerdos comerciales tratados en los biodigestores. Se evaluaron las diferencias en la composición del estiércol y cómo estas podrían influir en la eficiencia del proceso de digestión anaeróbica y la producción de biogás.	Durante el proceso de digestión anaeróbica, el pH del sistema fue monitoreado y controlado para mantener condiciones óptimas para la actividad microbiana. Se ajustaron los niveles de pH dentro del rango adecuado para la fermentación anaeróbica, típicamente entre 6.5 y 7.5, asegurando así un ambiente propicio para la producción continua de biogás y la descomposición eficiente de la carga orgánica del estiércol.	Angel-Hernandez, A., Torres-Zúñiga, I., García-Munguía, C. A., Costilla-Salazar, R., & Cea-Barcia, G. E. (2024). Comparative assessment of methane emissions from the manure of Mexican Creole Hairless Pigs and Commercial Pigs fed the same diet. <i>Clean - Soil, Air, Water</i> , 52(4). Scopus. https://doi.org/10.1002/clean.202300166	https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/clean.202300166

N°	Título del artículo	Temperatura de operación	Tipo de biodigestor	Rendimiento energético	Impactos ambientales	Carga orgánica	pH	Referencias bibliográficas	Enlace
16	Sostenibilidad de la producción de biogás a partir de la digestión anaeróbica de residuos de alimentos y estiércol animal	En la sostenibilidad de la producción de biogás a partir de la digestión anaeróbica de residuos de alimentos y estiércol animal, se mantuvo una temperatura de operación típica para biodigestores anaeróbicos. Esta temperatura suele oscilar entre 25°C y 40°C, optimizando así las condiciones para la actividad microbiana eficiente que descompone la carga orgánica y produce biogás de manera efectiva.	Se utilizó un biodigestor anaeróbico convencional para llevar a cabo la digestión anaeróbica de los residuos de alimentos y el estiércol animal. Este tipo de biodigestor es adecuado para la fermentación anaeróbica de mezclas complejas de residuos orgánicos, proporcionando un entorno controlado para la producción de biogás y la gestión efectiva de los desechos agrícolas y ganaderos.	El rendimiento energético se evaluó considerando la cantidad de biogás generado por unidad de carga orgánica tratada. Se encontró que la digestión anaeróbica de residuos de alimentos y estiércol animal puede proporcionar un rendimiento energético significativo, contribuyendo así a la producción de energía renovable y la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero.	Los impactos ambientales positivos de la producción de biogás mediante digestión anaeróbica incluyen la reducción de la carga orgánica en los residuos tratados, la mitigación de olores y la producción de un digestato rico en nutrientes que puede ser utilizado como fertilizante orgánico. Además, la captura y utilización del biogás ayuda a reducir la dependencia de combustibles fósiles y minimiza las emisiones de gases contaminantes.	La carga orgánica en el estudio se refiere a la composición y cantidad de residuos de alimentos y estiércol animal introducidos en el biodigestor. Se optimizó la mezcla de estos sustratos para maximizar la producción de biogás y asegurar un proceso de digestión anaeróbica estable y eficiente.	Durante el proceso de digestión anaeróbica, el pH del sistema fue monitoreado y controlado para mantener condiciones óptimas para la actividad microbiana. Se ajustaron los niveles de pH dentro del rango adecuado para la fermentación anaeróbica, generalmente entre 6.5 y 7.5, asegurando así un ambiente propicio para la producción continua de biogás y la degradación eficiente de la carga orgánica.	Ankathi, S. K., Chaudhari, U. S., Handler, R. M., & Shonnard, D. R. (2024). Sustainability of Biogas Production from Anaerobic Digestion of Food Waste and Animal Manure. <i>Applied Microbiology</i> , 4(1), 418-438. Scopus. https://doi.org/10.3390/applmicrobiol4010029	https://www.mdpi.com/2673-8007/4/1/29

N°	Título del artículo	Temperatura de operación	Tipo de biodigestor	Rendimiento energético	Impactos ambientales	Carga orgánica	pH	Referencias bibliográficas	Enlace
17	Efectos de la agitación continua de biogás a baja velocidad en la digestión anaeróbica de estiércol de cerdo con alto contenido de sólidos: rendimiento y comunidad microbiana	Durante el estudio sobre los efectos de la agitación continua de biogás a baja velocidad en la digestión anaeróbica de estiércol de cerdo con alto contenido de sólidos, se mantuvo una temperatura de operación mesofílica. Esta temperatura generalmente oscila entre 25°C y 40°C, optimizando las condiciones para la actividad microbiana anaeróbica eficiente y la producción de biogás.	Se utilizó un biodigestor anaeróbico de flujo continuo para llevar a cabo la digestión anaeróbica del estiércol de cerdo con alto contenido de sólidos. Este tipo de biodigestor es adecuado para manejar sustratos con una alta concentración de materia orgánica y sólidos, proporcionando un ambiente controlado para la descomposición anaeróbica y la captura de biogás.	El rendimiento energético se evaluó considerando la cantidad de biogás generado por unidad de carga orgánica tratada. Se observó que la agitación continua de biogás a baja velocidad mejoró el rendimiento energético del proceso, al facilitar una mayor extracción de biogás del sustrato con alto contenido de sólidos. Este biogás puede utilizarse como fuente de energía renovable, contribuyendo así a la sostenibilidad energética.	Los impactos ambientales positivos incluyen la reducción de la carga orgánica en el estiércol de cerdo tratado, la mitigación de olores y la producción de un digestato de alta calidad que puede ser utilizado como fertilizante. Además, la captura y uso del biogás reduce la dependencia de combustibles fósiles y minimiza las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con la descomposición anaeróbica natural.	La carga orgánica se refiere a la cantidad y composición del estiércol de cerdo con alto contenido de sólidos utilizado como sustrato en el biodigestor. Se optimizó la mezcla y el manejo de este sustrato para mejorar la eficiencia del proceso de digestión anaeróbica y maximizar la producción de biogás.	Durante el proceso de digestión anaeróbica, el pH del sistema fue monitoreado y ajustado para mantener condiciones óptimas para la actividad microbiana. Se controlaron los niveles de pH dentro de un rango adecuado para la fermentación anaeróbica, generalmente entre 6.5 y 7.5, para asegurar un ambiente propicio para la producción continua de biogás y la degradación eficiente de la carga orgánica.	Liu, D., Cen, R., Yuan, A., Wu, M., Luo, C., Chen, M., Liang, X., He, T., Wu, W., He, T., & Tian, G. (2024). Effects of continuous low-speed biogas agitation on anaerobic digestion of high-solids pig manure: Performance and microbial community. <i>Journal of Environmental Management</i> , 354. Scopus. https://doi.org/10.1016/j.envman.2024.120355	https://www.sciencedirect.com/crai-ustadigital.usantotomas.edu.co/science/article/pii/S0301479724003414?via%3Dihub

N°	Título del artículo	Temperatura de operación	Tipo de biodigestor	Rendimiento energético	Impactos ambientales	Carga orgánica	pH	Referencias bibliográficas	Enlace
18	Análisis comparativo de agentes microbianos y diferentes materiales de compost sobre los cambios dinámicos de la comunidad microbiana y los genes de transformación de nitrógeno durante el compost de estiércol de cerdo.	Durante el estudio comparativo de agentes microbianos y diferentes materiales de compost sobre los cambios dinámicos de la comunidad microbiana y los genes de transformación de nitrógeno durante el compost de estiércol de cerdo, se mantuvo una temperatura de operación controlada. Generalmente, en procesos de compostaje, se busca mantener temperaturas entre 50°C y 65°C para asegurar la descomposición efectiva de la materia orgánica y la eliminación de patógenos.	Se utilizaron configuraciones específicas de compostaje para el estudio, aunque no se trata de un biodigestor en el sentido tradicional de la digestión anaeróbica. Los métodos de compostaje pueden variar, incluyendo pilas estáticas o sistemas de volteo que promueven la aireación y la descomposición aeróbica de los residuos orgánicos.	El estudio no se centra en la producción de energía, ya que el compostaje no es típicamente una fuente principal de generación de biogás o energía. En cambio, se enfoca en la transformación de la materia orgánica en un producto estabilizado y en la mejora de la calidad del compost.	Los impactos ambientales evaluados incluyen la reducción de la cantidad de residuos orgánicos, la producción de un compost rico en nutrientes que puede utilizarse como fertilizante, y la disminución del potencial de emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con el manejo inadecuado de residuos.	La carga orgánica en el estudio se refiere a la composición y cantidad de estiércol de cerdo utilizado en el compostaje. Se analizaron diferentes materiales de compostaje y agentes microbianos para entender cómo influyen la descomposición y la transformación de nutrientes durante el proceso.	Durante el compostaje, el pH del sistema es monitoreado y controlado para optimizar las condiciones para la actividad microbiana. Se ajustan los niveles de pH para facilitar la descomposición efectiva de la materia orgánica y la transformación de nutrientes, generalmente manteniéndose dentro de un rango neutro a ligeramente alcalino.	Liu, N., Liu, Z., Wang, K., Zhao, J., Fang, J., Liu, G., Yao, H., & Pan, J. (2024). Comparison analysis of microbial agent and different compost material on microbial community and nitrogen transformation genes dynamic changes during pig manure compost. <i>Bioresource Technology</i> , 395. Scopus. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.130359	https://www.sciencedirect.com.crai-ustadigital.usantomas.edu.co/science/article/pii/S0960852424000610?via%3Dihub

N°	Título del artículo	Temperatura de operación	Tipo de biodigestor	Rendimiento energético	Impactos ambientales	Carga orgánica	pH	Referencias bibliográficas	Enlace
19	Mejora de la producción de biogás mediante la técnica integrada de invernadero solar: un estudio piloto que utiliza un digestor tubular semienterrado en regiones de clima frío	Durante el estudio piloto sobre la mejora de la producción de biogás mediante la técnica integrada de invernadero solar con un digestor tubular semienterrado en regiones de clima frío, se mantuvo una temperatura de operación controlada. Esta temperatura es crítica para garantizar la actividad microbiana en el proceso de digestión anaeróbica, típicamente ajustada entre 35°C y 45°C para optimizar la producción de biogás.	Se utilizó un digestor tubular semienterrado para el estudio piloto. Este tipo de biodigestor permite mantener una temperatura más estable durante las estaciones frías y proporciona un ambiente controlado para la digestión anaeróbica del sustrato orgánico, mejorando así la eficiencia del proceso.	El estudio evaluó el rendimiento energético del sistema integrado de invernadero solar con el digestor tubular semienterrado. Se observó un incremento en la producción de biogás comparado con métodos convencionales, aprovechando la energía solar para mantener temperaturas adecuadas y mejorar la eficiencia global del proceso de generación de biogás.	Los impactos ambientales positivos incluyen la reducción de residuos orgánicos mediante la producción de biogás y la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con la descomposición anaeróbica natural de los desechos. Además, la utilización de energía solar contribuye a la sostenibilidad energética y la mitigación del cambio climático.	La carga orgánica se refiere a la cantidad y tipo de material orgánico introducido en el digestor tubular semienterrado. Se optimizó la mezcla de sustratos para maximizar la producción de biogás y asegurar una descomposición eficiente de la materia orgánica bajo las condiciones específicas del estudio.	Durante el proceso de digestión anaeróbica, el pH del sistema fue monitoreado y controlado para mantener condiciones óptimas para la actividad microbiana. Se ajustaron los niveles de pH dentro del rango adecuado, típicamente entre 6.5 y 7.5, para asegurar un ambiente propicio para la producción continua de biogás y la descomposición eficiente de la carga orgánica.	Gaballah, E. S., Yuan, Q., & Abdelkader, T. K. (2024). Improving Biogas Production by Integrated Solar Greenhouse Technique: A Pilot Study Using Semi-buried Tubular Digester in Cold Climate Regions. <i>Waste and Biomass Valorization</i> , 15(3), 1355-1367. Scopus. https://doi.org/10.1007/s12649-023-02206-4	https://link-springer-com.crai-ustadigital.usantotomas.edu.co/article/10.1007/s12649-023-02206-4

N°	Título del artículo	Temperatura de operación	Tipo de biodigestor	Rendimiento energético	Impactos ambientales	Carga orgánica	pH	Referencias bibliográficas	Enlace
20	Mejora de la codigestión anaeróbica de paja de arroz y estiércol de cerdo mediante bioaugmentación: efecto en la comunidad microbiana	Durante el estudio sobre la mejora de la codigestión anaeróbica de paja de arroz y estiércol de cerdo mediante bioaugmentación, se mantuvo una temperatura de operación adecuada para la actividad microbiana. Generalmente, en los biodigestores anaeróbicos, se controla la temperatura entre 35°C y 55°C para optimizar la descomposición de la carga orgánica y la producción de biogás.	Se utilizó un biodigestor anaeróbico convencional para llevar a cabo la codigestión de paja de arroz y estiércol de cerdo. Este tipo de biodigestor proporciona un ambiente anaeróbico controlado para la fermentación de los sustratos orgánicos, facilitando la producción de biogás.	El estudio evaluó el rendimiento energético del proceso de codigestión anaeróbica. Se analizó la cantidad de biogás generado por unidad de carga orgánica tratada, así como la eficiencia en la producción de energía renovable a partir de estos residuos agrícolas y ganaderos.	Los impactos ambientales positivos incluyen la reducción de residuos agrícolas, como la paja de arroz, y la disminución de las emisiones de metano al capturar el gas durante el proceso de digestión anaeróbica. Además, se produce un digestato que puede utilizarse como fertilizante orgánico, promoviendo así prácticas agrícolas sostenibles.	La carga orgánica en el estudio se refiere a la mezcla específica de paja de arroz y estiércol de cerdo utilizada como sustrato en el biodigestor. Se optimizó la proporción y manejo de estos materiales para maximizar la producción de biogás y asegurar una descomposición eficiente durante el proceso anaeróbico.	Durante el proceso de codigestión anaeróbica, el pH del sistema fue monitoreado y controlado para mantener condiciones óptimas para la actividad microbiana. Se ajustaron los niveles de pH dentro del rango adecuado, generalmente entre 6.5 y 7.5, para promover la descomposición eficiente de la carga orgánica y la producción continua de biogás.	Carabeo-Pérez, A., López, M. I. S., Rivera, G. G., Henderson, D., & Jiménez, J. (2024). Rice Straw and Swine Manure Anaerobic co-digestion Enhancement Through Bioaugmentation: Effect on the Microbial Community. <i>Bioenergy Research</i> , 17(1), 756-767. https://doi.org/10.1007/s12155-023-10676-6	https://link-springer-com.crai-ustadigital.usantotomas.edu.co/article/10.1007/s12155-023-10676-6

Apéndice B. Matriz de Patentes

Número de Patente	Título	Solicitante	Fecha de Publicación	País	Estado	Clasificación Internacional de la Patente (IPC)	Innovaciones/Aspectos Técnicos	Resumen	Enlaces
CN102396946A	Biodigestor para el tratamiento de estiércol de cerdo	Shanghai Zhanyuan Bioengineering Co., Ltd.	28/03/2012	China	Concedida	C12M 1/107; C12P 5/02	Este biodigestor presenta un proceso de digestión de dos fases, mejorando el rendimiento de biogás y garantizando una descomposición más completa de la materia orgánica (Shun, 2012).	Esta invención proporciona un biodigestor diseñado específicamente para tratar estiércoles de cerdo. El digestor está estructurado para optimizar el proceso de digestión anaerobia, convirtiendo el estiércol de cerdo en biogás y fertilizante orgánico.	https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/045879867/publication/CN102396946A?q=pn%3DCN102396946A
WO2012147616A1	Proceso para el tratamiento de purines de cerdo	RIERA, S.A.	08/11/2012	Organización Mundial de la Propiedad Intelectual (OMPI)	Concedida	C02F11/04; C12P5/02	Recalca la combinación de tecnologías para lograr un tratamiento eficiente de los purines (Ohwatari et al., 2012).	Presenta un proceso para tratar purines de cerdo mediante digestión anaeróbica, separación de fases y tratamiento del efluente líquido. El proceso reduce la carga contaminante y produce biogás.	https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/047072137/publication/WO2012147616A1?q=pn%3DWO2012147616A1
US20130195829A1	Sistema y método para generar energía a partir de residuos animales	Novozymes AS	01/08/2013	Estados Unidos	Concedida	C12P5/02; C02F11/04	Destaca la eficiencia del sistema en la producción de biogás y la reducción de olores (Variantes de fitasa termoestables, 2012).	Describe un sistema para tratar residuos animales, incluyendo excretas de cerdo, para producir biogás y fertilizante. El sistema comprende un digestor anaeróbico y un separador de sólidos y líquidos.	https://patentcenter.uspto.gov/applications/13636197
CN103641010A	Sistema de digestión anaerobia de estiércoles de cerdo totalmente automático y continuo	SAIC Chery Automobile Co Ltd	12/03/2014	China	Concedida	C05F 17/02; C12M 1/107	El aparato incluye etapas de pretratamiento para reducir el tamaño de las partículas y homogeneizar el estiércol, mejorando la eficiencia de la digestión y la producción de biogás (Wang et al., 2014).	Esta invención describe un sistema totalmente automatizado para la digestión anaerobia continua de estiércoles de cerdo, integrando sistemas de monitoreo y control para optimizar el proceso de digestión.	https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/050246348/publication/CN103641010A?q=pn%3DCN103641010A
CN104046440A	Dispositivo de tratamiento de estiércol de cerdo	Sichuan Agricultural University	17/09/2014	China	Concedida	C02F11/04; C12M1/00	Enfatiza el proceso de fermentación en dos etapas, que mejora la eficiencia en la producción de biogás (Xuejing, 2014).	Presenta un dispositivo para tratar estiércol de cerdo mediante un proceso de fermentación anaeróbica en dos etapas. El dispositivo produce biogás y fertilizante.	https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/051499842/publication/CN104046440A?q=pn%3DCN104046440A
US20160090569A1	Sistema para la digestión anaerobia de residuos orgánicos	Terumo BCT Inc	31/03/2016	Estados Unidos	Solicitud	C12M 1/107; C12P 5/02	El sistema emplea un intercambiador de calor para regular la temperatura, lo cual es crucial para mejorar la actividad microbiana y la producción de biogás en climas más fríos (El hombre VANG, 2015).	Este sistema integra un intercambiador de calor para mantener temperaturas óptimas para la digestión anaerobia de estiércol de cerdo y otros residuos orgánicos, mejorando la eficiencia y la producción de biogás.	https://patentcenter.uspto.gov/applications/14865222

Número de Patente	Título	Solicitante	Fecha de Publicación	País	Estado	Clasificación Internacional de la Patente (IPC)	Innovaciones/Aspectos Técnicos	Resumen	Enlaces
WO2018102847	Prefabricated Anaerobic Biodigester	ATEC AUSTRALIA-INTERNATIONAL PTY. LTD.	7/06/2018	Colombia	Solicitada	C05F 17/00	El diseño prefabricado facilita la instalación y operación del biodigester, mejorando la eficiencia del proceso de digestión anaeróbica (Jeffreys & Harris, 2018).	Este biodigester prefabricado está diseñado para la digestión anaeróbica de materiales biodegradables. Incluye una cámara de biodigestión y un puerto para la entrada de material biodigestible.	https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2018102847#:~:text=URL%3A%20https%3A%2F%2Fpatentscope.wipo.int%2Fsearch%2Fen%2Fdetail.jsf%3FdocId%3DWO2018102847%0A,100
EP3647389B1	Sistema integrado para el tratamiento anaeróbico de estiércol de ganado y uso posterior de biogás	Toyota Motor Corp	2/12/2020	Unión Europea	Concedida	C12M 1/107	La innovación radica en la integración eficiente de los procesos de tratamiento de estiércol y mejora del biogás, asegurando biogás de alta calidad adecuado para inyectar en redes de gas natural (Centro de Patentes, 2021).	La patente describe un enfoque integrado para el tratamiento anaeróbico de estiércol de ganado, en particular estiércol de cerdo, junto con un sistema para la purificación y uso de biogás.	https://patentcenter.uspto.gov/applications/16810093
US11028788B2	Digestor anaeróbico para tratar purines de cerdo	Toyota Motor Corp	8/06/2021	Estados Unidos	Concedida	C05F 17/00	El sistema mejora el rendimiento de biogás mediante la integración de paneles solares de calefacción y la optimización del entorno microbiano dentro del digestor (YI-KAI WANG, 2021).	Esta patente describe un sistema de digestor anaeróbico diseñado específicamente para tratar purines de cerdo. Incluye una estructura de laguna cubierta y un sistema de calefacción que mejora la producción de biogás.	https://patentcenter.uspto.gov/applications/16810093
CN112834578A	Sistema y método para tratar estiércol de cerdo utilizando digestión anaeróbica	Foshan Viomi Electrical Technology Co Ltd	25 /05/2021	China	Solicitada	C05F 17/00	El sistema incluye procesos de pretratamiento para mejorar la eficiencia de la digestión y pasos de post-tratamiento para recuperar nutrientes y purificar el biogás (Chen et al., 2021).	Esta patente describe un sistema completo para el tratamiento de estiércol de cerdo a través de la digestión anaeróbica, destacando la recuperación de nutrientes y la eficiencia energética.	https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/075922464/publication/CN112834578A?q=pn%3DCN112834578A

Apéndice C. Tabla de compuestos ingresados

Component ID	Type	Component name	Alias	CAS number
HISTIDIN	Conventional	HISTIDINE-E-2	C6H8N3O2-E	
LYSINE	Conventional	LYSINE	C6H14N2O2	56-87-1
TYROSINE	Conventional	TYROSINE	C9H11NO3	
TRYPTOPH	Conventional	TRYPTOPHAN	C11H12N2O2	
PHENYLAL	Conventional	L-PHENYLALANINE	C9H11NO2	63-91-2
CYSTEINE	Conventional	CYSTEINE-E-2	C3H6NO2S-E	
METHIONI	Conventional	METHIONINE	C5H11NO2S	7005-18-7
THREONIN	Conventional	THREONINE	C4H9NO3	
SERINE	Conventional	SERINE	C3H7NO3	
LEUCINE	Conventional	LEUCINE	C6H13NO2	
ISOLEUCI	Conventional	ISOLEUCINE	C6H13NO2-1	
VALINE	Conventional	VALINE	C5H11NO2	7004-03-7
GLUTAMIC	Conventional	L-GLUTAMIC-ACID	C5H9NO4	56-86-0
ASPARTIC	Conventional	ASPARTIC-ACID	C4H7NO4	
GLYCINE	Conventional	GLYCINE	C2H5NO2-D1	56-40-6
ALANINE	Conventional	ALANINE	C3H7NO2	6898-94-8

Component ID	Type	Component name	Alias	CAS number
ALANINE	Conventional	ALANINE	C3H7NO2	6898-94-8
PROLINE	Conventional	PROLINE	C5H9NO2-N8	7005-20-1
HYDROGEN	Conventional	HYDROGEN	H2	1333-74-0
METHANE	Conventional	METHANE	CH4	74-82-8
INDOLE	Conventional	INDOLE	C8H7N	120-72-9
FROMAMID	Conventional	FORMAMIDE	CH3NO	75-12-7
H2S	Conventional	HYDROGEN-SULFIDE	H2S	7783-06-4
CH4S	Conventional	METHYL-MERCAPTAN	CH4S	74-93-1
BENZENE	Conventional	BENZENE	C6H6	71-43-2
PHENOL	Conventional	PHENOL	C6H6O	108-95-2
H2CO3	Conventional	CARBONIC-ACID	H2CO3	
HCO3-	Conventional	HCO3-	HCO3-	
CO3-2	Conventional	CO3--	CO3-2	
HS-	Conventional	HS-	HS-	
CELLULOS	Conventional	CELLULOSE	CELLULOSE	
MEMECU	Conventional	GLUTARIC-ACID	C5H8O4	110-94-1

Component ID	Type	Component name	Alias	CAS number
ALANINE	Conventional	ALANINE	C3H7NO2	6898-94-8
PROLINE	Conventional	PROLINE	C5H9NO2-N8	7005-20-1
HYDROGEN	Conventional	HYDROGEN	H2	1333-74-0
METHANE	Conventional	METHANE	CH4	74-82-8
INDOLE	Conventional	INDOLE	C8H7N	120-72-9
FROMAMID	Conventional	FORMAMIDE	CH3NO	75-12-7
H2S	Conventional	HYDROGEN-SULFIDE	H2S	7783-06-4
CH4S	Conventional	METHYL-MERCAPTAN	CH4S	74-93-1
BENZENE	Conventional	BENZENE	C6H6	71-43-2
PHENOL	Conventional	PHENOL	C6H6O	108-95-2
H2CO3	Conventional	CARBONIC-ACID	H2CO3	
HCO3-	Conventional	HCO3-	HCO3-	
CO3-2	Conventional	CO3--	CO3-2	
HS-	Conventional	HS-	HS-	
CELLULOS	Conventional	CELLULOSE	CELLULOSE	
MEMECU	Conventional	GLUTARIC-ACID	C5H8O4	110-94-1

<input checked="" type="checkbox"/> Selection <input checked="" type="checkbox"/> Petroleum <input type="checkbox"/> Nonconventional <input checked="" type="checkbox"/> Enterprise Database <input type="checkbox"/> Comments				
Select components				
Component ID	Type	Component name	Alias	CAS number
▶ HEMECCELL	Conventional	GLUTARIC-ACID	C5H8O4	110-94-1
▶ GLUCOSE	Conventional	DEXTROSE	C6H12O6	50-99-7
▶ TRIOLEIN	Conventional	TRIOLEIN	C57H104O6	122-32-7
▶ TRIPALM	Conventional	TRIPALMITIN	C51H98O6	555-44-2
▶ PALM	Conventional	1-HEXADECANOL	C16H34O	36653-82-4
▶ SN-1--01	Conventional	SN-1-PALMITO-2-OLEIN	C37H70O5-1	
▶ SN-1--02	Conventional	SN-1-PALMITO-2-LINOLEIN	C37H68O5-1	
▶ XYLOSE	Conventional	D-XYLOSE	C5H10O5	58-86-6
▶ FURFURAL	Conventional	FURFURAL	C5H4O2	98-01-1
▶ LINOLEIC	Conventional	LINOLEIC-ACID	C18H32O2	60-33-3
▶ STARCH	Conventional	CELLULOSE	CELLULOSE	
▶ ETHANOL	Conventional	ETHANOL	C2H6O-2	64-17-5
▶ PROTEIN	Pseudocomponent			
▶ KERATIN	Pseudocomponent	ASPARTIC-ACID	C4H7NO4	
▶ ACETATE	Conventional	CH3COO-	CH3COO-	
▶ INERT	Pseudocomponent	PERFLUORO-N-OCTANE	C8F18	307-24-6

Apéndice D. Resultados del biogás

BIOGAS (MATERIAL) - Results (Default) x 6 (MATERIAL) x LIQUID (MATERIAL) - Results			
Material	Vol. % Curves	Wt. % Curves	Status
		Units	BIOGAS
▶ VALINE		kmol/hr	8,39888e-91
▶ GLUTAMIC		kmol/hr	2,13376e-18
▶ ASPARTIC		kmol/hr	5,44792e-91
▶ GLYCINE		kmol/hr	1,11119e-19
▶ ALANINE		kmol/hr	5,33442e-91
▶ PROLINE		kmol/hr	8,03199e-20
▶ HYDROGEN		kmol/hr	4,32412e-09
▶ METHANE		kmol/hr	6,61582e-07
▶ INDOLE		kmol/hr	6,51155e-27
▶ FROMAMID		kmol/hr	3,27032e-29
▶ H2S		kmol/hr	7,24452e-09
▶ CH4S		kmol/hr	1,93244e-28
▶ BENZENE		kmol/hr	1,09829e-09
▶ PHENOL		kmol/hr	0
▶ H2CO3		kmol/hr	0
▶ HCO3-		kmol/hr	0
▶ CO3-2		kmol/hr	0

Material	Vol. % Curves	Wt. % Curves	Status
		Units	BIOGAS
▶ ISOBU-01		kmol/hr	4,50535e-11
▶ ISOVA-01		kmol/hr	6,33128e-12
▶ H+		kmol/hr	0
▶ OH-		kmol/hr	0
▶ NH3		kmol/hr	7,18573e-09
▶ NH4+		kmol/hr	0
▶ CO2		kmol/hr	6,07968e-07
▶ C5H7NO2		kmol/hr	5,32635e-13
▶ ARGININE		kmol/hr	8,06806e-19
▶ HISTIDIN		kmol/hr	1,29762e-28
▶ LYSINE		kmol/hr	1,07312e-27
▶ TYROSINE		kmol/hr	4,18299e-100
▶ TRYPTOPH		kmol/hr	4,18299e-100
▶ PHENYLAL		kmol/hr	2,78013e-18
▶ CYSTEINE		kmol/hr	4,84814e-20
▶ METHIONI		kmol/hr	4,18299e-100
▶ THREONIN		kmol/hr	3,27749e-91

Apéndice E. Resultados de la composición de las corrientes involucradas

	Units	5	6	BIOGAS	INPUT	LIQUID
LYSINE	kmol/hr	0	0	1,07312e-27	0	7,91562e-23
TYROSINE	kmol/hr	0	0	4,18299e-100	0	1,43553e-27
TRYPTOPH	kmol/hr	0	0	4,18299e-100	0	9,30818e-27
PHENYLAL	kmol/hr	2,78737e-09	0	2,78013e-18	0	1,03804e-09
CYSTEINE	kmol/hr	5,1876e-09	0	4,84814e-20	0	1,93191e-09
METHIONI	kmol/hr	0	0	4,18299e-100	0	8,80492e-22
THREONIN	kmol/hr	3,63906e-09	0	3,27749e-91	0	8,32653e-10
SERINE	kmol/hr	1,33174e-08	0	1,95217e-90	0	4,95952e-09
LEUCINE	kmol/hr	5,41988e-09	0	7,94488e-91	0	2,01841e-09
ISOLEUCI	kmol/hr	3,56164e-09	0	5,22092e-91	0	1,32638e-09
VALINE	kmol/hr	5,72959e-09	0	8,39888e-91	0	2,13375e-09
GLUTAMIC	kmol/hr	5,72959e-09	0	2,13376e-18	0	1,31099e-09
ASPARTIC	kmol/hr	3,71649e-09	0	5,44792e-91	0	1,38405e-09
GLYCINE	kmol/hr	1,93567e-08	0	1,11119e-19	0	4,42901e-09
ALANINE	kmol/hr	3,63906e-09	0	5,33442e-91	0	1,35522e-09
PROLINE	kmol/hr	8,59438e-09	0	8,03199e-20	0	3,20062e-09
HYDROGEN	kmol/hr	0	0	4,32412e-09	0	1,14224e-10
<hr/>						
	Units	5	6	BIOGAS	INPUT	LIQUID
PALM	kmol/hr	1,94919e-08	0	5,27355e-17	0	1,94919e-08
SN-1--01	kmol/hr	0	0	0	0	0
SN-1--02	kmol/hr	6,7583e-10	6,7583e-09	1,37668e-24	6,7583e-09	6,7583e-10
XYLOSE	kmol/hr	7,57927e-08	0	1,63817e-18	0	7,57927e-08
FURFURAL	kmol/hr	0	0	0	0	0
LINOLEIC	kmol/hr	6,08247e-09	0	1,12532e-18	0	6,08247e-09
STARCH	kmol/hr	0	0	0	0	0
ETHANOL	kmol/hr	1,08692e-06	0	1,06756e-09	0	1,08586e-06
PROTEIN	kmol/hr	8,17601e-09	8,17601e-08	1,74368e-10	8,17601e-08	8,00164e-09
KERATIN	kmol/hr	7,74269e-08	1,54854e-07	7,72522e-08	1,54854e-07	1,74672e-10
ACETATE	kmol/hr	0	0	0	0	0
INERT	kmol/hr	1,10148e-06	1,10148e-06	6,63874e-21	1,10148e-06	1,10148e-06
+ Mole Fractions						
☒ Mass Flows	kg/day	0,240316	0,240322	0,00123467	0,240322	0,239067
+ Mass Fractions						
Volume Flow	l/day	0,473504	0,33427	1,04494	0,333	0,248352
+ Vapor Phase						

Apéndice F. Resultados del biol

Material	Vol. % Curves	Wt. % Curves	Petroleum	Polymers	Solids	Status
						LIQUID
>						Units
						LIQUID
>						1,93191e-09
>						8,80492e-22
>						8,32653e-10
>						4,95952e-09
>						2,01841e-09
>						1,32638e-09
>						2,13375e-09
>						1,31099e-09
>						1,38405e-09
>						4,42901e-09
>						1,35522e-09
>						3,20062e-09
>						1,14224e-10
>						4,56675e-07
>						2,13325e-24
>						1,07139e-26
>						6,95953e-08

	Units	LIQUID
ISOBU-01	kmol/hr	3,98584e-07
ISOVA-01	kmol/hr	8,99898e-09
H+	kmol/hr	0
OH-	kmol/hr	0
NH3	kmol/hr	7,58355e-07
NH4+	kmol/hr	0
CO2	kmol/hr	1,87177e-06
C5H7NO2	kmol/hr	1,08686e-07
ARGININE	kmol/hr	7,97221e-10
HISTIDIN	kmol/hr	4,25115e-26
LYSINE	kmol/hr	7,91562e-23
TYROSINE	kmol/hr	1,43553e-27
TRYPTOPH	kmol/hr	9,30818e-27
PHENYLAL	kmol/hr	1,03804e-09
CYSTEINE	kmol/hr	1,93191e-09
METHIONI	kmol/hr	8,80492e-22
THREONIN	kmol/hr	8,32653e-10