

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ciencias Naturales y Matemática

Diseño de un sistema de tratamiento de biogás a partir de purine para la depuración
de H₂S mediante biofiltros a escala de laboratorio

INGE-2703

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Químico

Presentado por:

Juan Carlos Antepara Pacheco

Bryan Alejandro Guin Mosquera

Guayaquil - Ecuador

Año: 2024

Dedicatoria

A mis padres, pilares de mi vida, por su amor incondicional, sacrificios y enseñanzas que me han guiado hasta este momento.

A mi novia, mi compañera y fuente de inspiración, por su apoyo inquebrantable, su luz en mis días oscuros y su fe en mí cuando yo mismo dudé.

Juan Carlos Antepara

Dedicatoria

El presente proyecto lo dedico a mis padres,
por su amor, sacrificio y ejemplo de
perseverancia. Gracias por ser mi mayor
inspiración y por enseñarme a nunca
rendirme.

A mi hermano, por su apoyo constante y por
estar siempre a mi lado, confiando en mí
incluso en los momentos más difíciles.

A mis abuelitos, por su amor incondicional y
por ser un ejemplo de fortaleza, dedicación y
sabiduría. Sus valores y enseñanzas han sido
una guía constante en mi vida y un pilar
fundamental

Y a todas las personas que de alguna manera
contribuyeron a la culminación de este
proyecto, les dedico este logro con gratitud.

Bryan Guin Mosquera

Agradecimientos

A mis padres, por ser mi mayor fortaleza, por su amor, su fe en mí y por enseñarme el valor del esfuerzo y la perseverancia.

A mis amigos, "Los Magos", por su apoyo constante, las risas y su amistad inquebrantable en los momentos más duros.

A mis tíos, por estar a mi lado en un momento difícil, brindándome su apoyo y palabras de aliento que nunca olvidaré.

A todos ustedes, gracias por ser parte de este logro.

Juan Carlos Antepara

Agradecimientos

Mi más sincero agradecimiento a Dios, por ser mi guía y fortaleza durante todo este proceso.

A mis padres, quienes han sido el pilar de mi vida. Gracias por sus sacrificios, por creer en mí y por brindarme las herramientas necesarias para alcanzar mis metas. Su amor y apoyo son la base de este logro.

A mi hermano, por ser mi motivación constante y por darme fuerzas cuando más lo necesitaba.

A mi grupo de amigos, "Los Magos", por su amistad incondicional y por hacer este camino más especial con su compañía.

A mis profesores y tutores, por su dedicación y por compartir su conocimiento, que ha sido fundamental para mi crecimiento.

Finalmente, a todas las personas que, de una u otra manera, contribuyeron a este proyecto, les expreso mi más profundo agradecimiento.

Bryan Guin Mosquera

Declaración Expresa

Nosotros Juan Carlos Antepara Pacheco y Bryan Alejandro Guin Mosquera acordamos y reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

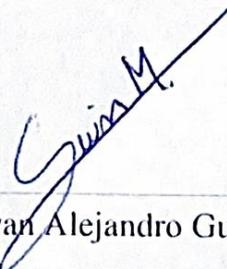
La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique a los autores que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 10 de octubre del 2024.



Juan Carlos Antepara
Pacheco



Bryan Alejandro Guin
Mosquera

Evaluadores

María Verónica Ordóñez, MSc.

Profesor de Materia

Nadia Flores Manrique, MSc.

Tutor de proyecto

Resumen

El presente proyecto tiene como objetivo diseñar y evaluar un sistema a escala de laboratorio para la remoción de sulfuro de hidrógeno (H_2S) del biogás mediante biofiltros inoculados con bacterias, con el fin de obtener azufre elemental como subproducto. Este estudio está orientado a mejorar la calidad del biogás que se puede producir en granjas a través de digestión anaeróbica.

Durante el desarrollo del proyecto, se construyó un biofiltro utilizando un medio filtrante adecuado e inoculado con bacterias oxidantes de azufre. Se caracterizó la composición inicial del biogás generado mediante digestión anaerobia y se monitorearon las concentraciones de H_2S antes y después del tratamiento biológico con bacterias quimiolitótrofa. Las mediciones se realizaron empleando normas técnicas específicas y equipos analíticos, garantizando la precisión de los datos obtenidos.

Los resultados mostraron una eficiencia promedio de remoción del 87.16%, confirmando la efectividad del sistema diseñado, demostrando el potencial de esta tecnología como una solución sostenible y viable. Se concluye que los biofiltros son una alternativa eficiente para el tratamiento del biogás, contribuyendo a su aprovechamiento energético y reduciendo su impacto ambiental.

Palabras Clave: Biofiltros, biogás, sulfuro de hidrógeno, remoción de H_2S .

Abstract

The present project aims to design and evaluate a laboratory-scale system for the removal of hydrogen sulfide (H₂S) from biogas using biofilters inoculated with bacteria, with the goal of obtaining elemental sulfur as a byproduct. This study is focused on improving the quality of biogas that can be produced on farms through anaerobic digestion.

During the project, a biofilter was constructed using a suitable filtering medium inoculated with sulfur-oxidizing bacteria. The initial composition of the biogas generated through anaerobic digestion was characterized, and the concentrations of H₂S were monitored before and after biological treatment with chemolithotrophic bacteria. Measurements were conducted following specific technical standards and using analytical equipment, ensuring the accuracy of the data obtained.

The results showed an average removal efficiency of 87.16%, confirming the effectiveness of the designed system and demonstrating the potential of this technology as a sustainable and viable solution. It is concluded that biofilters are an efficient alternative for biogas treatment, contributing to its energy utilization and reducing its environmental impact.

Keywords: *Biofilters, biogas, hydrogen sulfide, H₂S removal.*

Índice general

| | |
|---|----|
| Resumen | 9 |
| <i>Abstract</i> | 10 |
| Índice general | 11 |
| Abreviaturas | 14 |
| Simbología | 15 |
| Índice de figuras | 16 |
| Índice de tablas..... | 17 |
| Capítulo 1 | 18 |
| 1.1 Introducción..... | 19 |
| 1.2 Descripción del Problema..... | 20 |
| 1.3 Justificación del Problema..... | 22 |
| 1.4 Objetivos..... | 24 |
| 1.4.1 Objetivo general | 24 |
| 1.4.2 Objetivos específicos..... | 24 |
| 1.5 Marco teórico..... | 24 |
| 1.5.1 Métodos de Crianza en Granjas Porcinas..... | 24 |
| 1.5.2 Sistema de Cama Profunda | 25 |
| 1.5.3 Consumo de Energía en Granjas Porcinas | 26 |
| 1.5.4 Digestión Anaeróbica de Residuos Orgánicos | 27 |
| 1.5.5 Producción de Biogás en Granjas Porcinas..... | 29 |

| | | |
|------------|--|----|
| 1.5.6 | Desafíos de la Presencia de Sulfuro de Hidrógeno (H ₂ S) en el Biogás | 30 |
| 1.5.7 | Soluciones Tecnológicas para la Depuración del Biogás..... | 31 |
| 1.5.8 | Bacterias Quimiolitótrofas | 33 |
| Capítulo 2 | | 35 |
| 2. | Metodología | 36 |
| 2.1 | Recolección, caracterización y preparación de muestras | 37 |
| 2.1.1 | Recolección de las muestras..... | 37 |
| 2.1.2 | Caracterización de las muestras | 37 |
| 2.1.3 | Preparación de las muestras | 38 |
| 2.2 | Diseño experimental..... | 39 |
| 2.2.1 | Producción y cuantificación de biogás..... | 39 |
| 2.2.2 | Biofiltración y montaje del sistema..... | 40 |
| 2.2.3 | Caracterización de biogás y porcentaje de remoción de H ₂ S..... | 42 |
| 2.3 | Análisis del impacto económico del sistema de tratamiento de biogás..... | 43 |
| Capítulo 3 | | 44 |
| 3. | Resultados y análisis | 45 |
| 3.1 | Caracterización de las muestras..... | 45 |
| 3.2 | Producción de Biogás | 47 |
| 3.3 | Porcentaje de remoción de H ₂ S mediante biofiltros..... | 52 |
| 3.4 | Caracterización del biogás..... | 53 |
| 3.5 | Comparación del porcentaje de remoción de H ₂ S | 55 |

| | | |
|-------------|-------------------------------------|----|
| 3.6 | Análisis económico..... | 60 |
| Capítulo 4 | | 63 |
| 4.1 | Conclusiones y recomendaciones..... | 64 |
| 4.1.1 | <i>Conclusiones</i> | 64 |
| 4.1.2 | <i>Recomendaciones</i> | 65 |
| Referencias | | 67 |
| Apéndice A | | 72 |
| Apéndice B | | 73 |
| Anexo | | 77 |

Abreviaturas

- TIR: Tasa Interna de Retorno
- USD: Dólares estadounidenses
- LP: Gas Licuado de Petróleo
- PVC: Policloruro de vinilo
- kWh: Kilovatio-hora
- EPA: Environmental Protection Agency
- ISO: International Organization for Standardization
- ST: Sólidos Totales
- SV: Sólidos Volátiles
- D.Q.O.: Demanda Química de Oxígeno
- PE-AL: Procedimientos Estándar de Análisis de Laboratorio
- OSHA: Occupational Safety and Health Administration
- FAO: Food and Agriculture Organization

Simbología

- H_2S : Sulfuro de hidrógeno
- CH_4 : Metano
- CO : Monóxido de carbono
- CO_2 : Dióxido de carbono
- NH_3 : Amoníaco
- O_2 : Óxigeno
- N : Nitrógeno
- P : Fósforo
- m : Metro
- kg : Kilogramo
- mg : Miligramo
- ppm : Partes por millón
- kWh : Kilovatio-hora
- $^\circ\text{C}$: Grados Celsius
- L : Litro
- g : Gramo
- pH : Potencial de Hidrógeno
- D.L. : Demanda Líquida
- $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$: Glucosa
- mg/L : miligramos por Litro
- mg/kg : Miligramos por Kilogramo

Índice de figuras

| | | |
|-----------|---|----|
| Figura 1 | <i>Granja del cliente con el método de cama profunda</i> | 26 |
| Figura 2 | <i>Etapas del Proceso de Digestión Anaeróbica para la Producción de Biogás</i> | 29 |
| Figura 3 | <i>Ciclo de Producción y Uso del Biogás</i> | 30 |
| Figura 4 | <i>Diagrama de bloques del proceso de crianza por el método de cama profunda</i> | 36 |
| Figura 5 | <i>Esquema del procedimiento para la preparación de las muestras</i> | 39 |
| Figura 6 | <i>Ficha técnica del complejo microbiano AC – MICRO comercializado por la empresa VIALTEC SA, Guayaquil – Ecuador</i> | 41 |
| Figura 7 | <i>Sistema experimental de biofiltros</i> | 42 |
| Figura 8 | <i>Fórmula para calcular el % de remoción de H₂S</i> | 43 |
| Figura 10 | <i>Comparación de la producción de biogás según el tipo de sustrato vs tiempo</i> | 49 |
| Figura 11 | <i>Simulación en Aspen Plus de la producción de biogás y desulfuración mediante Óxido de hierro (Ferrita)</i> | 56 |
| Figura 12 | <i>Simulación en Aspen Plus de la producción de biogás y desulfuración mediante Óxido de Zinc</i> | 56 |
| Figura 13 | <i>Diagrama de barras de la comparación de los biofiltros vs otras tecnologías</i> | 58 |
| Figura 14 | <i>Método de cama profunda de la Granja “Hadel”</i> | 73 |
| Figura 15 | <i>Recolección de muestra de la granja "Hadel"</i> | 74 |
| Figura 16 | <i>Preparación de tubos digestores</i> | 74 |
| Figura 17 | <i>Determinación de NTK</i> | 75 |
| Figura 18 | <i>Muestras digestando en el baño termostático</i> | 75 |
| Figura 19 | <i>Analizador de gases Dräger X-am® 5600</i> | 76 |
| Figura 20 | <i>Ensamblaje de la columna de filtración para tratamiento de biogás</i> | 76 |
| Figura 21 | <i>Ficha técnica del complejo microbiano</i> | 78 |

Índice de tablas

| | | |
|----------|---|----|
| Tabla 1 | <i>Características de las diferentes muestras de purine</i> | 37 |
| Tabla 2 | <i>Parámetros para la caracterización de las muestras</i> | 38 |
| Tabla 3 | <i>Tipos de variables del diseño experimental</i> | 40 |
| Tabla 4 | <i>Parámetros fisicoquímicos considerados para la caracterización de las muestras</i> | 45 |
| Tabla 5 | <i>Relación C/N de las muestras</i> | 47 |
| Tabla 6 | <i>Producción de biogás a partir de la digestión anaerobia de las muestras</i> | 48 |
| Tabla 7 | <i>Concentraciones de entrada y salida de H₂S y eficiencia de remoción mediante biofiltros</i> | 52 |
| Tabla 8 | <i>Composición del biogás a la entrada del biofiltro</i> | 53 |
| Tabla 9 | <i>Composición del biogás a la salida al biofiltro</i> | 54 |
| Tabla 10 | <i>Resultados de la simulación en Aspen Plus (*) y experimental</i> | 56 |
| Tabla 11 | <i>Tecnologías de remoción de H₂S</i> | 59 |
| Tabla 12 | <i>Costos de implementación inicial a escala de laboratorio</i> | 60 |
| Tabla 13 | <i>Costos operativos anuales</i> | 61 |
| Tabla 14 | <i>Ingreso anuales</i> | 61 |
| Tabla 15 | <i>Tasa interna de retorno</i> | 62 |
| Tabla 16 | <i>Resultado de los análisis de sulfuros</i> | 72 |

Capítulo 1

1.1 Introducción

En el sector agropecuario, la producción de biogás mediante la digestión anaeróbica de residuos en granjas porcinas representa una práctica sostenible para el manejo de desechos y la generación de energía renovable. Sin embargo, el uso biogás obtenido es limitado por la presencia de sulfuro de hidrógeno (H_2S), un gas altamente tóxico y corrosivo. La existencia de H_2S en el biogás afecta directamente la infraestructura de las granjas, causando daños en tuberías, motores y otros equipos, lo que incrementa los costos de mantenimiento y limita el aprovechamiento eficiente de este recurso energético. Estas complicaciones ponen en riesgo la sostenibilidad operativa de las granjas, especialmente en zonas rurales donde el acceso a fuentes confiables de energía es limitado.

Ante esta problemática, el presente proyecto tiene como objetivo desarrollar un sistema de biofiltros a escala de laboratorio que permita la remoción de H_2S en el biogás generado en las granjas porcinas. Los biofiltros constituyen una solución eficaz y sostenible al utilizar bacterias que oxidan el H_2S , transformándolo en azufre elemental, un subproducto que puede ser aprovechado en la agricultura. Este modelo promueve una economía circular al maximizar el aprovechamiento de los recursos y minimizar el impacto ambiental.

El proyecto busca contribuir a la sostenibilidad de las granjas porcinas mediante la purificación del biogás, haciéndolo apto para su uso como fuente de energía térmica en áreas críticas, como las maternidades porcinas, donde el control de temperatura es esencial para el bienestar animal. La aplicación de esta tecnología a escala de laboratorio permitirá evaluar su viabilidad y replicabilidad en entornos rurales, beneficiando así a pequeños y medianos productores.

1.2 Descripción del Problema

En las granjas porcinas, existen diversos métodos de manejo de los desechos generados por los animales. Algunos sistemas tradicionales emplean pisos de concreto o rejillas que permiten la separación y recolección de los excrementos, los cuales son gestionados regularmente para mantener condiciones higiénicas y reducir el impacto ambiental. Sin embargo, uno de los métodos de crianza más eficientes para la gestión de desechos es el sistema de "cama profunda". Este sistema utiliza materiales absorbentes como paja o aserrín, que, al mezclarse con los desechos, crean un ambiente que facilita su descomposición y, al mismo tiempo, reduce la necesidad de limpieza constante. Además, los residuos generados por la cama profunda son particularmente adecuados para ser tratados mediante digestión anaeróbica, lo cual permite producir biogás y gestionar eficientemente estos residuos orgánicos.

A pesar de los beneficios de este sistema, el biogás resultante de la digestión anaeróbica contiene sulfuro de hidrógeno (H_2S), un compuesto corrosivo y tóxico que plantea retos importantes para las instalaciones agrícolas. El H_2S puede dañar severamente la infraestructura, afectando tuberías, motores y sistemas de generación de energía, lo que incrementa los costos de mantenimiento y afecta la viabilidad económica del biogás como fuente de energía renovable (Tait et al., 2009). Esta situación limita la capacidad del productor para aprovechar el biogás de manera eficiente y proteger su infraestructura, poniendo en riesgo la sostenibilidad a largo plazo de las operaciones agrícolas.

El contenido de H_2S en el biogás proviene principalmente de la descomposición de los sulfatos presentes en los materiales de cama profunda, como la paja y el aserrín, que se utilizan para mantener la higiene en las áreas de crianza de los cerdos. Estos materiales, al integrarse en el proceso de digestión anaerobia junto con residuos líquidos, pueden aportar compuestos de azufre y nutrientes en proporciones que favorecen la generación de H_2S (Lourinho et al., 2020). La presencia de H_2S limita el uso directo del biogás en la generación de calor o electricidad, ya

que el gas necesita ser purificado antes de poder utilizarse de forma segura, lo que representa un costo adicional para las granjas (de Mendonça & dos Santos, 2021).

Además de los desafíos relacionados con el manejo del H₂S, la gran cantidad de residuos generados plantea otro problema. Aunque parte de estos residuos pueden ser utilizados como fertilizante orgánico, el exceso de residuos puede sobresaturar los niveles de nutrientes en los suelos, generando desequilibrios y afectando su capacidad productiva a largo plazo (FAO, 2020). Esto limita la posibilidad de destinar todo el residuo orgánico a fertilización, lo que obliga a buscar alternativas de manejo más sostenibles.

Por otro lado, en las granjas porcinas, el uso intensivo de agua es crucial para mantener la limpieza y el bienestar de los animales, ya que este recurso es esencial para garantizar la salud del ganado porcino y la eficiencia productiva. No obstante, diversos métodos de crianza requieren un consumo considerable de energía, especialmente en las áreas donde es necesario controlar la temperatura, como en las secciones de maternidad de cerdos. En particular, en las granjas que utilizan el sistema de cama profunda, el consumo energético es elevado debido a las necesidades específicas de manejo y mantenimiento de las condiciones óptimas de descomposición en la cama. Dado que muchas de estas granjas se ubican en zonas rurales, suelen enfrentar limitaciones de acceso a una fuente de energía confiable y suficiente, lo que representa un desafío importante para suplir sus necesidades energéticas y mantener un ambiente adecuado para el desarrollo de los animales.

Reducir la concentración de H₂S en el biogás permitirá que las granjas puedan aprovechar esta fuente de energía para sistemas de calefacción en áreas críticas, como las de maternidad de cerdos, sin comprometer la infraestructura ni incurrir en costosos procesos de purificación. La implementación de este proyecto tiene el potencial de optimizar la gestión de residuos en granjas porcinas, aumentando la durabilidad del equipo y maximizando el

aprovechamiento de los recursos internos, lo cual es fundamental para la sostenibilidad del sistema y la reducción de costos operativos.

1.3 Justificación del Problema

Este proyecto surge de la necesidad de resolver varios desafíos claves en las granjas porcinas relacionadas con la producción de biogás y el manejo sostenible de residuos. La investigación se enfoca en desarrollar una solución que permita la remoción del sulfuro de hidrógeno (H_2S) presente en el biogás generado a partir de purines de las granjas porcinas, con el fin de optimizar su uso como fuente de energía renovable y, al mismo tiempo, proteger la infraestructura de las granjas de los daños corrosivos que este gas provoca. La presencia de H_2S en el biogás no solo limita el aprovechamiento energético, sino que también incrementa significativamente los costos operativos debido a la constante necesidad de reparaciones en equipos como tuberías y motores (Johnson et al., 2020).

Por tanto, la implementación de un sistema de biofiltros para la remoción de H_2S no solo es relevante desde el punto de vista técnico, sino que resulta esencial para garantizar la sostenibilidad a largo plazo de estas operaciones agroindustriales. Adicionalmente, este proyecto busca abordar el problema de la gestión del exceso de residuos en las granjas porcinas con cama profunda. Aunque los residuos generados en la digestión anaerobia pueden utilizarse como fertilizante orgánico, la saturación de nutrientes en los suelos es una preocupación ambiental importante, ya que podría afectar negativamente la productividad agrícola a largo plazo (FAO, 2021).

El desarrollo de una solución que permita el manejo integral de estos residuos contribuirá a reducir la dependencia de prácticas que, a largo plazo, pueden ser insostenibles para el entorno natural. Esto es particularmente relevante en el contexto de la agricultura sostenible, donde se busca minimizar el impacto ambiental y preservar los recursos naturales (Smith, 2021). Desde

una perspectiva energética, el proyecto adquiere una gran importancia debido a las limitaciones que enfrentan las granjas porcinas, especialmente aquellas ubicadas en zonas rurales.

El consumo de energía es particularmente elevado en áreas como la maternidad, donde el control de la temperatura es esencial para la supervivencia de los lechones (Lopez & Cruz, 2020). Sin embargo, estas granjas a menudo carecen de un acceso confiable a fuentes energéticas externas, lo que pone en riesgo la continuidad de las operaciones. El uso de biogás purificado como fuente de energía térmica representa una alternativa sostenible para cubrir las necesidades energéticas de las granjas, al mismo tiempo que se reduce la dependencia de fuentes externas de energía.

Un aspecto adicional clave de este proyecto es la recuperación de azufre elemental como subproducto de la remoción del biogás a través de biofiltros; el azufre obtenido puede tener aplicaciones valiosas en la agricultura, especialmente como fertilizante en cultivos que requieren este elemento para su crecimiento (EPA, 2020). Además, el azufre elemental puede ser utilizado en la industria química para la producción de compuestos, como el ácido sulfúrico, o en productos fitosanitarios utilizados en la protección de cultivos (Ramirez & Gonzalez, 2021). De esta manera, la recuperación y aprovechamiento del azufre contribuye a una economía circular, convirtiendo lo que originalmente sería un contaminante en un recurso útil y rentable para el productor.

Este estudio es relevante no solo para el campo de la ingeniería química, la bioenergía y la gestión de residuos, sino también para la sostenibilidad agrícola. La implementación de tecnologías innovadoras como los biofiltros puede marcar un antes y un después en la eficiencia energética de las granjas porcinas, así como en la gestión ambiental de los residuos generados. Las proyecciones sociales de este proyecto incluyen no solo una reducción en los costos operativos de las granjas, sino también un impacto positivo en la calidad de vida de las comunidades rurales al promover el uso de energías limpias y sostenibles.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Diseñar un sistema a escala de laboratorio de tratamiento del biogás mediante biofiltros para una remoción superior al 80% del sulfuro de hidrógeno presente en el biogás producido a partir de la digestión anaerobia del purine de las granjas porcinas.

1.4.2 Objetivos específicos

- Caracterizar el biogás generado a partir de la digestión anaerobia para la determinación de su composición química, con especial énfasis en la concentración de sulfuro de hidrógeno (H₂S).
- Construir un sistema a escala de laboratorio de captura de H₂S mediante biofiltros inoculados con bacterias quimiolitótrofas.
- Analizar el impacto económico de la implementación del sistema de biofiltros, considerando la mejora en la producción de biogás.

1.5 Marco teórico

1.5.1 Métodos de Crianza en Granjas Porcinas

En la industria porcina, existen distintos métodos de manejo y crianza que buscan optimizar el bienestar animal y mejorar la eficiencia productiva. Uno de los métodos más comunes es el sistema de pisos de concreto, que permite la limpieza frecuente mediante el uso intensivo de agua. Este sistema ayuda a mantener condiciones higiénicas en las instalaciones, necesarias para prevenir enfermedades en los animales. Sin embargo, su implementación requiere un alto consumo de agua y sistemas de tratamiento para gestionar los residuos líquidos generados (FAO, 2021).

Otra alternativa es el sistema de pisos de rejilla, en el cual el suelo presenta aperturas que permiten que los desechos sólidos y líquidos caigan hacia un área de recolección subterránea.

Este método reduce la necesidad de limpieza constante en el área de crianza y facilita la recolección de los desechos. Sin embargo, requiere equipos especializados para el almacenamiento y tratamiento de los residuos en el subsuelo, así como el uso de energía para su transporte y disposición final (Smith, 2021).

Finalmente, el sistema de cama profunda emplea materiales absorbentes, como paja o aserrín, que absorben los líquidos y permiten la descomposición controlada de los desechos, disminuyendo la necesidad de limpieza y el consumo de agua (Ward et al., 2008). Este sistema ofrece ventajas en términos de reducción de agua, aunque requiere un manejo cuidadoso para mantener las condiciones adecuadas de descomposición y evitar la acumulación de gases perjudiciales, como el amoníaco, que pueden afectar el bienestar de los animales y la seguridad de los trabajadores (Johnson et al., 2020).

1.5.2 Sistema de Cama Profunda

El sistema de cama profunda es un método de manejo en granjas porcinas que utiliza materiales absorbentes, como paja o aserrín, en el área de crianza para absorber los excrementos líquidos de los animales. Este sistema reduce la necesidad de limpieza constante y minimiza el consumo de agua, aspectos clave en el manejo de granjas en áreas donde los recursos hídricos pueden ser limitados. Además de su eficiencia en la gestión de desechos, la cama profunda proporciona un ambiente más seco y cómodo para los cerdos, mejorando su bienestar y promoviendo un entorno favorable para su crecimiento (Ward et al., 2008).

Una característica destacada de la cama profunda es que facilita la descomposición controlada de los desechos. Al mezclarse los materiales de la cama con los excrementos de los animales, se inicia un proceso de fermentación y degradación de la materia orgánica en condiciones que pueden ser aeróbicas o anaeróbicas, dependiendo de la compactación y del nivel de oxígeno disponible en la cama. Este proceso de descomposición genera calor, lo que puede

ser beneficioso en climas fríos al ayudar a mantener una temperatura estable en el área de crianza sin la necesidad de calefacción adicional (Chamy & Ramos, 2012).

Figura 1

Granja del cliente con el método de cama profunda



Sin embargo, el sistema de cama profunda requiere una gestión cuidadosa para evitar problemas como la acumulación de gases nocivos, especialmente amoníaco, que se genera durante la descomposición de la materia orgánica y puede afectar la salud tanto de los animales como de los trabajadores si no se ventila adecuadamente. Además, el mantenimiento de la cama profunda implica un consumo energético significativo para asegurar condiciones óptimas de descomposición y control de gases, lo cual puede ser un desafío en granjas ubicadas en áreas rurales donde el acceso a fuentes de energía confiables es limitado (Johnson et al., 2020).

1.5.3 Consumo de Energía en Granjas Porcinas

En las granjas porcinas, el consumo de energía es un aspecto crucial que afecta tanto la eficiencia operativa como la sostenibilidad económica y ambiental del establecimiento. Estas granjas requieren energía constante para mantener condiciones adecuadas de ventilación, iluminación, climatización y manejo de desechos, todos factores esenciales para la producción porcina (Sotelo et al., 2017). Sin embargo, la infraestructura en muchas granjas, especialmente

en zonas rurales, suele depender de fuentes de energía convencionales como la electricidad de red o combustibles fósiles, lo cual no siempre es viable o rentable.

Según un estudio de Valderrama y Gómez (2020), el uso de energías alternativas como el biogás producido a partir de residuos orgánicos de las propias granjas, puede reducir la dependencia de fuentes externas y disminuir los costos de energía. Esta alternativa ayuda a reducir el impacto ambiental de las operaciones agrícolas al disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero, contribuyendo a una producción más sostenible.

1.5.4 Digestión Anaeróbica de Residuos Orgánicos

La digestión anaeróbica es un proceso biológico en el cual microorganismos descomponen la materia orgánica en ausencia de oxígeno, generando productos como metano, dióxido de carbono y otros subproductos menores. Este proceso es ampliamente utilizado en el tratamiento de residuos orgánicos debido a su capacidad para reducir la cantidad de desechos y, al mismo tiempo, producir biogás, una mezcla rica en metano que puede ser utilizada como fuente de energía renovable (Chamy & Ramos, 2012).

El proceso de digestión anaeróbica se lleva a cabo en varias etapas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. Durante la hidrólisis, las moléculas complejas como proteínas y carbohidratos se descomponen en compuestos más simples. Estos productos son transformados en ácidos grasos volátiles y otros compuestos por bacterias acidogénicas en la segunda etapa, para luego ser convertidos en acetato en la fase de acetogénesis. Finalmente, en la etapa de metanogénesis, arqueas metanogénicas convierten el acetato y otros compuestos en metano y dióxido de carbono, constituyendo el biogás (Ward et al., 2008).

La digestión anaerobia de alta densidad se caracteriza por el tratamiento de sustratos con un contenido de sólidos totales (ST) superior al 10%. Este enfoque es ideal para materiales sólidos o semisólidos, como residuos sólidos urbanos, estiércol seco o biomasa lignocelulósica. Según Mata-Alvarez et al. (2014), los sistemas de alta densidad son más eficientes en términos

de manejo de residuos sólidos y pueden procesar materiales con alta carga orgánica, generando menores volúmenes de efluentes líquidos. Sin embargo, debido a la alta viscosidad del sustrato, estos sistemas requieren tecnologías especializadas para facilitar la mezcla y el contacto entre los microorganismos y el material biodegradable.

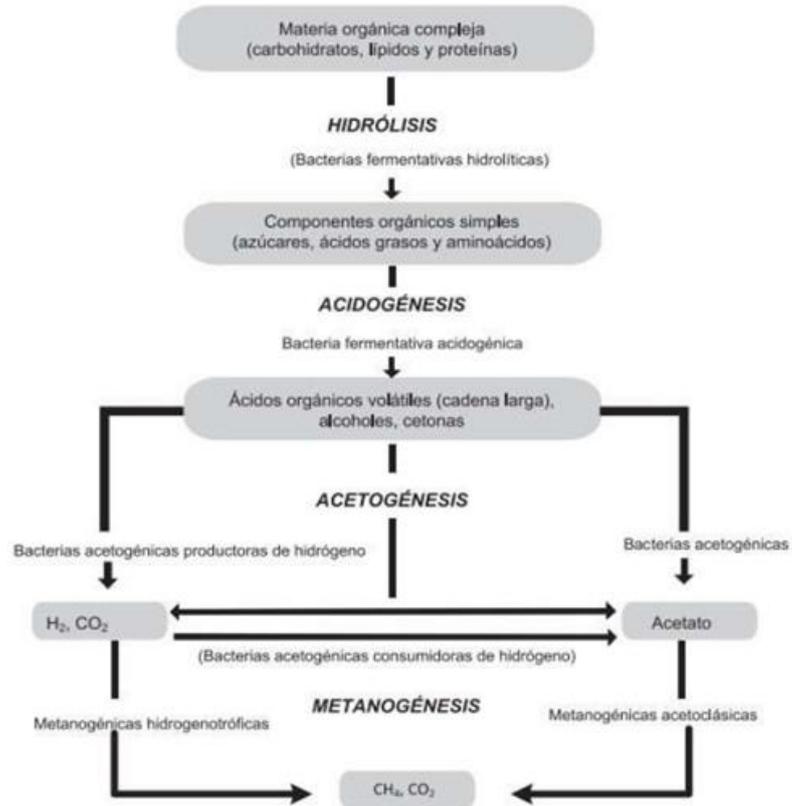
Además, los digestores para alta densidad, como los digestores de lecho fijo o de flujo ascendente, están diseñados para manejar sustratos altamente viscosos y optimizar el tiempo de retención. Este tipo de digestión es particularmente adecuado en aplicaciones donde el agua es escasa o donde se busca reducir el volumen de efluentes generados (FAO, 2018). Sin embargo, la acumulación de sólidos no biodegradables puede representar un desafío operativo, afectando la eficiencia a largo plazo.

Por otro lado, la digestión anaerobia de baja densidad se utiliza para sustratos con un contenido de sólidos totales (ST) inferior al 10%, como purines, aguas residuales o lodos de tratamiento de aguas. Estos sistemas son más fáciles de operar debido a la menor viscosidad del material, lo que facilita la mezcla y la transferencia de calor (Chen et al., 2019). Sin embargo, la baja densidad del sustrato puede implicar una menor concentración de materia orgánica disponible para la producción de biogás, lo que reduce la eficiencia volumétrica del sistema.

Los digestores de baja densidad suelen ser de tipo continuo, como los de mezcla completa, que mantienen el material en constante movimiento, maximizando el contacto entre los microorganismos y los sustratos (Ghosh, 2016). Según el Ministerio de Energía de Chile (2019), esta tecnología es más adecuada para sistemas con altas tasas de generación de residuos líquidos, como en granjas porcinas o plantas de tratamiento de aguas residuales. No obstante, su principal limitación es el mayor volumen de agua requerido, lo que puede incrementar los costos de manejo y tratamiento de efluentes.

Figura 2

Etapas del Proceso de Digestión Anaeróbica para la Producción de Biogás



Fuente: Davis, M. (2010). Water and Wastewater Engineering. McGraw-Hill Professional.

1.5.5 Producción de Biogás en Granjas Porcinas

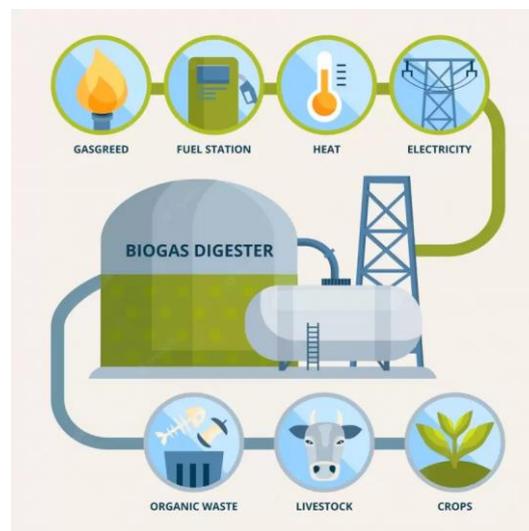
La producción de biogás en granjas porcinas es una práctica cada vez más utilizada para gestionar de manera eficiente los residuos orgánicos generados en estas instalaciones. Al someter los desechos a un proceso de digestión anaeróbica, se logra no solo reducir el volumen de residuos, sino también producir biogás, una mezcla de gases compuesta principalmente por metano y dióxido de carbono, con potencial para ser utilizada como fuente de energía (Chamy & Ramos, 2012).

El biogás generado en este proceso puede emplearse para cubrir diversas necesidades energéticas en las granjas, como la calefacción en áreas de maternidad o el funcionamiento de maquinaria, lo que disminuye la dependencia de fuentes de energía convencionales. Estudios han

señalado que el uso de biogás en granjas porcinas es una solución ambientalmente sostenible que contribuye a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, al transformar residuos en energía útil (Ridder & Rabbe, 2013). Esta práctica no solo ayuda a reducir los costos energéticos en las granjas, sino que también mitiga los impactos ambientales asociados con la acumulación de residuos orgánicos (Muñoz et al., 2015).

Figura 3

Ciclo de Producción y Uso del Biogás



Sin embargo, el biogás producido puede contener impurezas como el sulfuro de hidrógeno (H_2S), un gas corrosivo que presenta riesgos significativos tanto para la infraestructura como para la salud humana (Muñoz, Meier, Díaz & Jeison, 2015). La presencia de H_2S plantea la necesidad de tratamientos de purificación específicos para proteger los equipos y mejorar la calidad del biogás. La implementación de tecnologías de eliminación de H_2S , es esencial para optimizar el aprovechamiento del biogás y asegurar su viabilidad como recurso energético confiable (Janssen, 2003; Allegue & Hinge, 2019).

1.5.6 Desafíos de la Presencia de Sulfuro de Hidrógeno (H_2S) en el Biogás

La presencia de sulfuro de hidrógeno (H_2S) en el biogás es un obstáculo importante para su aprovechamiento como fuente de energía, debido a las propiedades altamente tóxicas y

corrosivas de este gas. Incluso en concentraciones bajas, el H₂S puede provocar corrosión acelerada en la infraestructura de las instalaciones, afectando componentes críticos como tuberías, motores y generadores. Esta corrosión incrementa significativamente los costos de mantenimiento y reduce la vida útil de los equipos, lo cual disminuye la viabilidad económica del biogás para uso industrial y agrícola (Allegue & Hinge, 2019).

Además de los daños materiales, el H₂S representa un riesgo importante para la salud y la seguridad. La inhalación de H₂S puede tener efectos graves en la salud humana, como irritación del sistema respiratorio y, en casos extremos, puede ser letal. En este contexto, la gestión y el manejo del biogás contaminado con H₂S requieren precauciones estrictas para proteger a los trabajadores y al ambiente circundante, especialmente en granjas y áreas rurales donde las medidas de seguridad pueden ser limitadas (OSHA, 2020).

Por último, la variabilidad en la concentración de H₂S en el biogás plantea un desafío adicional, ya que el nivel de H₂S puede fluctuar según la composición y el manejo de los desechos orgánicos, así como las condiciones del proceso de digestión anaeróbica. Estas fluctuaciones dificultan el control de calidad del biogás y pueden afectar su consistencia como fuente energética. Esta variabilidad demanda un monitoreo constante para identificar cambios en la composición del biogás y para mantener los estándares de seguridad necesarios en las instalaciones (Yazdani & Ng, 2020).

1.5.7 Soluciones Tecnológicas para la Depuración del Biogás

La remoción eficiente de H₂S es crucial para la valorización del biogás, permitiendo su uso en aplicaciones energéticas que requieren gas de alta pureza, como en la generación de electricidad o calor (Muñoz et al., 2015). Los métodos convencionales de eliminación de H₂S

incluyen procesos físicos, químicos y biológicos, entre los cuales los biofiltros han ganado popularidad por su efectividad y bajo costo operativo (Chamy & Ramos, 2012).

La biofiltración se presenta como una tecnología innovadora y ambientalmente sostenible para la remoción de compuestos contaminantes en gases, incluida la eliminación de H₂S en biogás (Mudliar et al., 2010). Este método consiste en hacer pasar el biogás a través de un lecho bioactivo donde microorganismos específicos oxidan el H₂S, transformándolo en compuestos menos tóxicos, como el azufre elemental o el sulfato (Smet, Lens & Van Langenhove, 1998).

En un sistema de biofiltros, el H₂S se disuelve en una fase líquida y luego es metabolizado por bacterias quimiolitótrofas como *Thiobacillus* spp., que utilizan el H₂S como fuente de energía (Janssen, 2003). Los biofiltros ofrecen una alta eficiencia en la eliminación de contaminantes gracias a la actividad biológica, y son especialmente útiles para el tratamiento de gases a baja concentración, lo cual es característico del biogás de origen animal (Kapdi et al., 2005). Los estudios realizados en esta área demuestran que la biofiltración puede lograr una eficiencia de remoción superior al 80%, cumpliendo con el objetivo de este proyecto de reducir el H₂S a niveles seguros para aplicaciones industriales (Ridder & Rabbe, 2013).

La eficiencia de los biofiltros depende de varios factores, tales como la temperatura, el pH y el tiempo de retención del gas en el biofiltro. Los biofiltros operan de manera óptima en rangos de temperatura entre 15 y 35 °C, ya que esta es la temperatura ideal para la actividad bacteriana (Janssen, 2003). En cuanto al pH, es esencial mantener un ambiente ligeramente ácido (pH 4-7) para optimizar la actividad enzimática de las bacterias oxidadoras de H₂S (Mudliar et al., 2010).

Además, el tiempo de retención debe ajustarse para asegurar un contacto adecuado entre el biogás y los microorganismos. En un sistema a escala de laboratorio, como el planteado en este estudio, estos parámetros se pueden controlar de manera precisa, facilitando la optimización del proceso (Ward et al., 2008).

La biofiltración ha sido aplicada en diversas investigaciones con resultados prometedores. Por ejemplo, el estudio de Muñoz et al. (2015) demostró que los biofiltros pueden adaptarse a diversas fuentes de biogás y lograr altos niveles de remoción de H₂S en condiciones de operación controladas. Asimismo, Chamy y Ramos (2012) reportaron que la implementación de biofiltros en sistemas de tratamiento de biogás de residuos porcinos reduce efectivamente el impacto ambiental, además de disminuir los costos de operación en comparación con métodos químicos. Por otro lado, Ridder y Rabbe (2013) evidenciaron la viabilidad económica y técnica de los biofiltros en sistemas de tratamiento de biogás de pequeña escala, señalando que esta tecnología es particularmente útil en contextos rurales y agrícolas.

1.5.8 Bacterias Quimiolitótrofas

Las bacterias quimiolitótrofas son un grupo de microorganismos que obtienen energía a partir de la oxidación de compuestos inorgánicos, en lugar de fuentes orgánicas, lo cual las hace especialmente útiles en procesos de biorremediación y tratamiento de gases contaminantes (Madigan, Martinko, & Parker, 2015). Este tipo de bacterias utiliza compuestos como el amoníaco, el nitrato, el hierro y el sulfuro de hidrógeno (H₂S) como donadores de electrones, generando energía a través de reacciones químicas de oxidación. Un ejemplo representativo es el género *Thiobacillus*, ampliamente estudiado por su capacidad de oxidar compuestos de azufre, como el H₂S, para producir sulfatos, proceso que resulta en la eliminación de este contaminante en aplicaciones industriales (Janssen, 2003).

Las bacterias quimiolitótrofas son comúnmente encontradas en ambientes extremos, como zonas geotermales o ambientes de alta concentración de sulfuros, donde desempeñan un rol fundamental en el ciclo biogeoquímico del azufre.

En sistemas de biofiltración aplicados al tratamiento de biogás, las bacterias quimiolitótrofas desempeñan un papel crucial en la oxidación biológica del H₂S, convirtiéndolo en compuestos menos tóxicos como el sulfato, que es inofensivo para el medio ambiente

(Muñoz, Meier, Díaz & Jeison, 2015). Estas bacterias son seleccionadas y cultivadas en biofiltros debido a su capacidad para adaptarse y prosperar en condiciones específicas de alta acidez y bajos niveles de oxígeno, como ocurre en muchos sistemas de tratamiento de biogás. En el caso de sistemas de biofiltros diseñados para la remoción de H₂S, el mantenimiento de condiciones óptimas de pH, temperatura y disponibilidad de compuestos inorgánicos es fundamental para maximizar la actividad de estas bacterias y asegurar la eficiencia del proceso (Kapdi et al., 2005).

Capítulo 2

2. METODOLOGÍA

Descripción del proceso de crianza del cerdo por el método de cama profunda

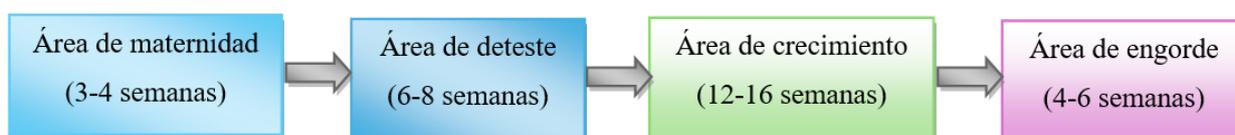
El proceso de crianza del cerdo mediante el método de cama profunda se basa en un sistema sostenible que utiliza una cama orgánica de aproximadamente 50-60 cm de profundidad, compuesta inicialmente por materiales como cascarilla de arroz, paja o viruta de madera (Barlocco & Carballo, 2014). Los cerdos recién nacidos permanecen en el área de maternidad junto a sus madres durante las primeras 3 a 4 semanas, donde la cama se mantiene con una humedad controlada entre el 30 % y 50 %, asegurando un ambiente cálido y confortable. A lo largo del ciclo productivo, se adiciona cascarilla de arroz de forma periódica para mantener las condiciones óptimas de la cama y garantizar su funcionalidad

Posteriormente, los lechones son trasladados al área de destete, donde permanecen alrededor de 6 a 8 semanas; aquí, la cama profunda actúa como aislante térmico y reduce el estrés asociado a la separación de las madres (García et al., 2020). Una vez alcanzan la etapa de engorde, los cerdos se trasladan al área de crecimiento, donde pasan entre 12 y 16 semanas. Durante este tiempo, la cama favorece la fermentación de los desechos, reduciendo olores y generando un entorno más saludable (Martínez & López, 2019).

Finalmente, los cerdos son trasladados al área de engorde, donde permanecen entre 4 y 6 semanas hasta alcanzar el peso comercial. Al concluir el ciclo productivo, la cama profunda es retirada y procesada cuidadosamente. Este material es transformado en abono orgánico, promoviendo prácticas sostenibles y un manejo eficiente en la granja (Rodríguez et al., 2021).

Figura 4

Diagrama de bloques del proceso de crianza por el método de cama profunda



2.1 Recolección, caracterización y preparación de muestras

2.1.1 Recolección de las muestras

El muestreo fue realizado en la granja porcina del cliente y una granja aledaña de uno de sus familiares, ambas granjas ubicadas en Marcabeli, El Oro, pero con diferentes métodos de crianzas, se tomaron 3 muestras y en la siguiente tabla se resumen las características relevantes:

Tabla 1

Características de las diferentes muestras de purine

| Muestra | Composición | Origen | Método de crianza |
|---------|-------------------------------------|---|---------------------------------|
| A | Purine extruido | Área de engorde | Tradicional (suelo de concreto) |
| B | Purine + cascarilla de arroz | Área de crecimiento (6 meses de uso) | Cama profunda |
| C | Purine + cascarilla de arroz (tamo) | Área de engorde (6 meses de uso + 4 meses de almacenamiento en sacos) | Cama profunda |

2.1.2 Caracterización de las muestras

Una vez tomadas las muestras, se procedió a la caracterización física y química. Los ensayos ejecutados se detallan en la Tabla 2.

Tabla 2*Parámetros para la caracterización de las muestras*

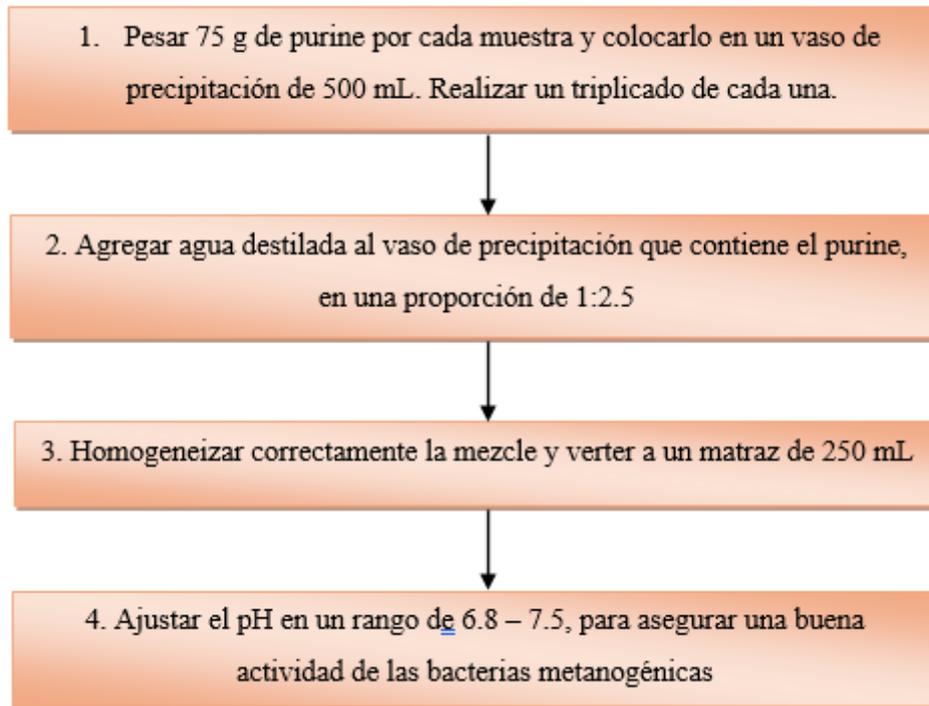
| Parámetro | Unidades | Procedimiento/Norma |
|-------------------------------------|--|---|
| Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK) | mg/kg de muestra seca | Standard Method 4500 N org C, protocol PE-AL-73 (Acid digestion and volumetry) |
| Carbono orgánico (C) | % del peso seco total | Oxidación química con dicromato de potasio (Volumetría) |
| Fósforo total (P) | mg/kg de muestra seca | EPA 3015A, EPA 6010D, PE-AL-18 (ICP-AES, Digestión ácida y emisión atómica) |
| Demanda química de oxígeno (DQO) | mg O ₂ /kg de muestra seca | Standard Method 5220B and 5220C (Oxidación química de la materia orgánica) |
| Sólidos Volátiles (SV) | % del peso seco total | Standard Method 2540G (Determinación por combustión a altas temperaturas) |
| Sólidos Totales (ST) | % del peso seco total | Standard Method 2540E (Secado a peso constante en condiciones controladas) |
| pH | - | Standard Methods, Ed 23. 2017 4500- H+ B |

2.1.3 Preparación de las muestras

Para esta etapa de la metodología, se llevó a cabo el siguiente procedimiento:

Figura 5

Esquema del procedimiento para la preparación de las muestras



2.2 Diseño experimental

2.2.1 Producción y cuantificación de biogás

Una vez que las muestras fueron cuidadosamente preparadas, se llevó a cabo el proceso de digestión anaerobia durante un periodo de cinco días bajo condiciones mesofílicas controladas a una temperatura constante de 37 °C. Para medir con precisión la cantidad de biogás producido, se utilizó un sistema compuesto por probetas invertidas llenas con agua acidulada a un pH de 2, en el cual el volumen de agua desplazado reflejaba directamente la cantidad de biogás generado por cada una de las muestras de purín analizadas. Las mediciones del volumen de biogás producido se registraron de manera sistemática cada 24 horas desde el inicio del proceso de digestión anaerobia, asegurando un monitoreo constante y detallado de los resultados.

Tabla 3

Tipos de variables del diseño experimental

| Tipo de variables | Parámetro | Unidad |
|--------------------------|-------------------|---------------------|
| Controladas | pH | - |
| Dependientes | Volumen de biogás | mL |
| Independientes | Temperatura | Grados Celsius (°C) |

2.2.2 Biofiltración y montaje del sistema

En la segunda etapa del diseño experimental se realizaron actividades clave para garantizar la eficiencia del sistema de tratamiento de biogás. Estas incluyeron la selección de bacterias oxidativas adecuadas, la preparación de la solución bacteriana, y el montaje del sistema de biofiltros. Estas acciones fueron esenciales para establecer las condiciones óptimas que permitirían el funcionamiento eficaz del sistema:

2.1.1.1 Selección de bacterias oxidativas

Se realizó una investigación sobre el tipo de bacterias específico para la degradación de H₂S en biogás, ciertas especies bacterianas, como *Bacillus*, *Desulfovibrio* y *Aspergillus*, mediante la oxidación, ayudan a convertir el H₂S en azufre elemental o en compuestos menos nocivos. Por lo cual, se seleccionó un complejo microbiano comercial denominado AC – MICRO, el cual es un producto natural diseñado para minimizar el impacto ambiental ocasionado por las actividades comerciales, agroindustriales y municipales. Está compuesto de sustancias 100% naturales, por tanto, es completamente biodegradable e inocuo para el ser humano, además, es adecuado para la remoción de H₂S en biogás.

Figura 6

Ficha técnica del complejo microbiano AC – MICRO comercializado por la empresa VIALTEC SA, Guayaquil – Ecuador

INGREDIENTE ACTIVO

Complejo Microbiano de Bacterias Lácticas, Streptococcus sp, Bacillus sp, Aspergillus oryzae, Levaduras (Saccharomyces cerevisiae.) y hongos descomponedores.

INGREDIENTE ACTIVO

Apariencia: Líquido
Color : Rojizo
Olor : Agradable – fermentación alcohólica
Volatilidad: No es volátil
pH: 4.0
Toxicidad: Ninguna

COMPOSICIÓN

Complejo Microbiano caracterizado por:

| | |
|--|-----------------------------|
| COMPLEJO NATURAL DE BACTERIAS Aeróbicas, Facultativas y Anaeróbicas | 1 X 10 ¹¹ UFC/mL |
| HONGOS DESCOMPONEDORES | 1 X 10 ⁴ UFC/mL |
| LEVADURAS DE TIPO ALIMENTICIO | 1 X 10 ³ UFC/mL |

2.1.1.2 Preparación de la solución bacteriana

Se preparó una solución al 2% siguiendo las indicaciones del fabricante del producto AC-MICRO, la cual se utilizó para inocular el medio de soporte contenido en los biofiltros. Este proceso permitió la formación de una biopelícula, favoreciendo así el desarrollo de microorganismos necesarios para el tratamiento. La biopelícula formada fue esencial para potenciar la actividad biológica requerida en la remoción de compuestos presentes en el biogás.

2.1.1.3 Montaje del sistema de biofiltros

Se diseñaron torres de absorción a escala de laboratorio, ensambladas con tuberías de PVC de 2 pulgadas de diámetro y 50 cm de altura, tapones de PVC macho y hembra, válvulas de control y se colocó el material de soporte utilizado dentro de los biofiltros. Además, se empleó una bomba de agua sumergible de marca EVANS 12 V, para la recirculación de la corriente líquida de la solución de bacterias en el sistema.

Figura 7

Sistema experimental de biofiltros



Para la recolección del biogás previamente tratado, se emplearon frascos de vidrio equipados con tapas herméticas, a las cuales se adaptaron válvulas de cierre para facilitar su manipulación. Posteriormente, mediante el uso de una bomba de vacío, se procedió a evacuar completamente el aire presente dentro de los frascos, asegurando así un entorno libre de contaminantes. De esta forma, los frascos quedaron adecuadamente preparados para el almacenamiento seguro y eficiente del biogás producido.

2.2.3 Caracterización de biogás y porcentaje de remoción de H₂S

En la última etapa del diseño experimental, se procedió a realizar las pruebas prácticas con la muestra que representó la mayor producción de biogás. Por lo que se realizó en triplicado para garantizar la consistencia de los resultados. La concentración de los componentes principales presentes en el biogás fueron medidas utilizando un analizador de gases portátil de marca Dräger. La concentración del sulfuro de hidrógeno presente en el biogás tanto a la entrada como a la salida del biofiltro se determinó mediante el análisis de sulfuros empleando el procedimiento PE/AL/08 Standard Methods Ed.23.2017 4500 S₂-C y D.

Una vez conocidas las concentraciones de H₂S a la entrada y a la salida, se calculó el porcentaje de remoción de H₂S utilizando la siguiente fórmula:

Figura 8

Fórmula para calcular el % de remoción de H₂S

$$\% \text{ remoción } H_2S = \left(\frac{\text{Concentración de } H_2S \text{ en la entrada} - \text{Concentración de } H_2S \text{ en la salida}}{\text{Concentración de } H_2S \text{ en la entrada}} \right)$$

Este cálculo permitió cuantificar de manera precisa la efectividad del sistema de biofiltros en reducir la concentración de H₂S.

2.3 Análisis del impacto económico del sistema de tratamiento de biogás

Una vez se evaluó la eficacia técnica del sistema en la remoción de H₂S, se procedió a realizar un análisis económico detallado para evaluar la viabilidad del sistema de tratamiento en términos de costos y beneficios. Este análisis tuvo en cuenta una serie de factores, como los costos iniciales de adquisición y montaje de los equipos y los costos asociados con el tratamiento de biogás.

Capítulo 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Caracterización de las muestras

El análisis de la composición de las muestras permitió evaluar las propiedades químicas y físicas del purín de cerdo en distintas condiciones de tratamiento.

Tabla 4

Parámetros fisicoquímicos considerados para la caracterización de las muestras

| Tipo de muestra | | Purine de cerdo extruido | | Purine + cascarilla (6 meses) | | Tamo (10 meses) | |
|------------------------|--------|--------------------------|-----------------|----------------------------------|---------------|--------------------|---------------|
| Parámetro | Unidad | Resultado | Rango | Resultado | Rango | Resultado | Rango |
| Nitrógeno total (N) | mg/kg | >10000 | 100-10,000 | >10000 | 100-10000 | >10000 | 100-10000 |
| Fósforo (P) | mg/kg | 1971 | 10 – 10,000 | 1728 | 10 – 10,000 | 1557 | 10 – 10,000 |
| Carbono orgánico | % | 53.5 | | 46 | | 35 | |
| DQO | mg/L | 11,7 | 10,000 – 18,000 | 12,3 | 8000 – 18,000 | 10 | 8000 – 12,000 |
| Sólidos totales (ST) | % | 70.0 | | 50.0 | | 35.0 | - |
| Sólidos volátiles (SV) | % | 40.0 | | 35.0 | | 20.0 | - |
| pH | - | 6,52 | 1,00-14,00 | 7,06 | 1,00-14,00 | 5,36 | 1,00-14,00 |

La primera muestra, correspondiente al purín de cerdo extruido, presentó una concentración de nitrógeno total superior a 10,000 mg/kg. Este resultado se debe al proceso de extrusión, que elimina gran parte del contenido líquido del purín, concentrando los sólidos. El nitrógeno total en purines está mayormente compuesto por nitrógeno amoniacal y nitrógeno orgánico, y su concentración elevada es característica de purines frescos.

Este nitrógeno es clave en procesos de digestión anaerobia, ya que sirve como nutriente para las bacterias metanogénicas en concentraciones óptimas, aunque en exceso puede inhibir la producción de biogás debido a la acumulación de amoníaco libre (Chen et al., 2008). El contenido de fósforo (P), de 1,971 mg/kg, indica una rica fuente de este nutriente, que es común en purines debido a la dieta rica en fósforo de los cerdos y este fósforo está presente mayoritariamente en forma de compuestos inorgánicos, que pueden ser liberados durante la digestión anaerobia o adsorbidos en sustratos externos como la cascarilla de arroz.

La segunda muestra, correspondiente a la mezcla de cascarilla de arroz y purín de cerdo, se caracterizó por una ligera disminución en los niveles de fósforo (1,728 mg/kg) y carbono orgánico (46%) en comparación con el purín extruido. La cascarilla de arroz, al ser un material lignocelulósico, actúa como soporte físico y adsorbente de nutrientes, lo que puede reducir la disponibilidad inmediata de fósforo y otros compuestos en la mezcla. Además, durante los 6 meses de uso en cama profunda, se desarrollaron procesos de biodegradación parcial, como la fermentación y la actividad microbiana, que transformaron el carbono orgánico en compuestos más simples o liberaron gases como dióxido de carbono y metano. El carbono orgánico es una medida clave del potencial energético del sustrato, ya que refleja la cantidad de materia disponible para ser descompuesta por los microorganismos anaerobios (Khalid et al., 2011).

La última muestra, correspondiente al tamo, mostró características distintivas debido a su manejo y almacenamiento. Este material, retirado de la cama profunda tras 6 meses de uso y almacenado durante 4 meses a la intemperie, presentó un contenido de carbono orgánico reducido (35%) y una menor DQO (10 mg/L), lo que indicó un avance en los procesos de estabilización del material. Durante el almacenamiento, el tamo estuvo expuesto a condiciones ambientales que promovieron la lixiviación de nutrientes solubles y la oxidación de compuestos orgánicos volátiles, reduciendo la carga orgánica del material. Además, la disminución en los sólidos volátiles (20%) en comparación con el purín extruido (40%) refuerza la hipótesis de que

una gran proporción del material biodegradable fue consumida durante los procesos de degradación en la cama profunda y el almacenamiento posterior.

Desde un punto de vista teórico, la disminución en el carbono orgánico y los sólidos volátiles está estrechamente relacionada con el ciclo de biodegradación en condiciones anaerobias y aeróbicas. En la cama profunda, los microorganismos descomponen los compuestos orgánicos en ausencia de oxígeno, generando subproductos como ácidos grasos volátiles (AGV), dióxido de carbono y metano. Sin embargo, durante el almacenamiento a la intemperie, las condiciones pasan a ser parcialmente aeróbicas, lo que favorece la oxidación de los AGV y otros compuestos intermedios, resultando en una mayor estabilización del material (De la Rubia et al., 2009).

3.2 Producción de Biogás

La evaluación de la producción de biogás se realizó a lo largo de cinco días para tres tipos de sustratos: purín de cerdo extruido, mezcla de cascarilla de arroz con purín de cerdo (cama profunda, 6 meses) y tamo estabilizado (cama profunda, 10 meses).

Tabla 5

Relación C/N de las muestras

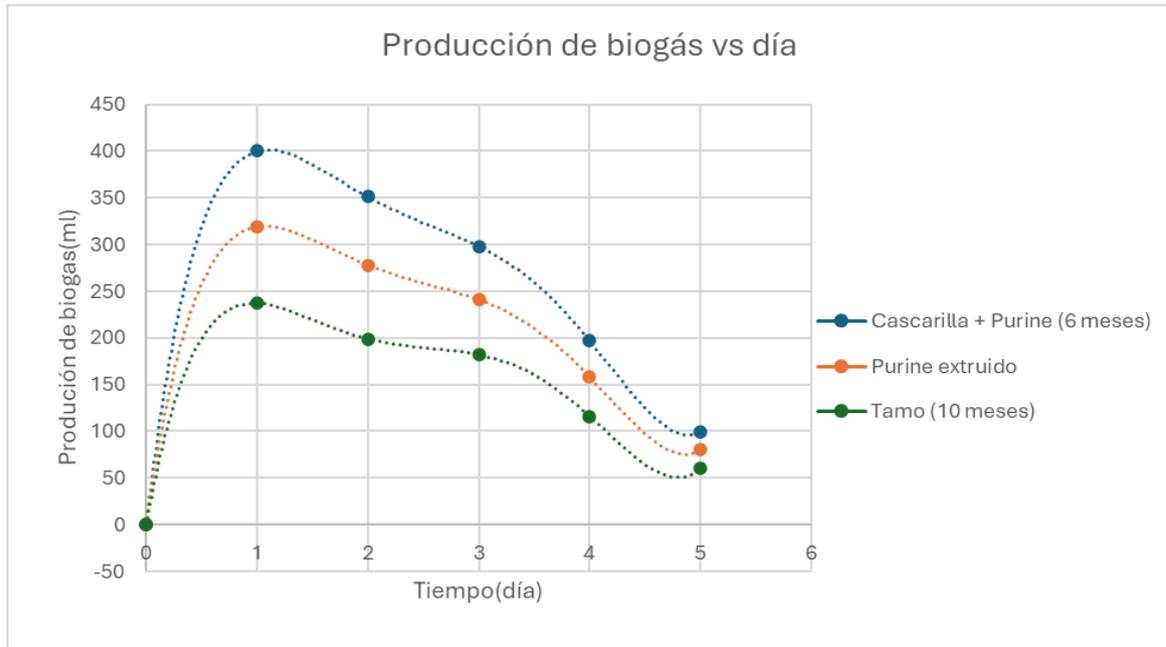
| Muestra | Relación C/N |
|----------------------------------|--------------|
| Purine extruido | 20 |
| Cascarilla + Purine (6 meses) | 25 |
| Tamo (10 meses) | 15 |

Tabla 6*Producción de biogás a partir de la digestión anaerobia de las muestras*

| Fecha | Día | #repetición | Purine extruido ml/día | Cascarilla + purine (6 meses) ml/día | Tamo (10 meses) ml/día |
|------------|-----|-------------|---------------------------|--|---------------------------|
| 9/12/2024 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | 0 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 0 |
| | | Promedio | 0 | 0 | 0 |
| 10/12/2024 | 1 | 1 | 319 | 400 | 237 |
| | | 2 | 331 | 392 | 251 |
| | | 3 | 310 | 408 | 232 |
| | | Promedio | 320 | 400 | 240 |
| 11/12/2024 | 2 | 1 | 278 | 351 | 199 |
| | | 2 | 273 | 339 | 204 |
| | | 3 | 284 | 360 | 196 |
| | | Promedio | 278 | 350 | 200 |
| 12/12/2024 | 3 | 1 | 241 | 298 | 182 |
| | | 2 | 247 | 304 | 178 |
| | | 3 | 234 | 295 | 185 |
| | | Promedio | 241 | 299 | 182 |
| 13/12/2024 | 4 | 1 | 158 | 197 | 116 |
| | | 2 | 166 | 206 | 123 |
| | | 3 | 160 | 193 | 114 |
| | | Promedio | 161 | 199 | 118 |
| 14/12/2024 | 5 | 1 | 80 | 99 | 60 |
| | | 2 | 85 | 104 | 64 |
| | | 3 | 78 | 97 | 59 |
| | | Promedio | 81 | 100 | 61 |

Figura 9

Comparación de la producción de biogás según el tipo de sustrato vs tiempo



Los resultados en la Tabla 6, mostraron diferencias significativas entre las muestras, lo que reflejó la influencia de las características fisicoquímicas de cada sustrato sobre la generación de biogás. Adicionalmente, la dinámica de la producción diaria se ilustra gráficamente en la Figura 10.

En el día 0, no se registró producción de biogás en ninguna de las muestras, lo cual era previsible, dado que los microorganismos anaerobios requieren un tiempo inicial para adaptarse al medio y activar los procesos metabólicos necesarios para la digestión de la materia orgánica (Weiland, 2010). A partir del día 1, la mezcla de cascarilla de arroz y purín de cerdo presentó la mayor producción promedio, alcanzando 400 mL, mientras que el purín de cerdo extruido y el tamo estabilizado generaron 320 mL y 240 mL, respectivamente (Tabla 6 y Figura 10). Este comportamiento reflejó la mayor biodisponibilidad de compuestos orgánicos en la mezcla de cascarilla y purín, en comparación con los otros sustratos. La estructura porosa de la cascarilla

pudo haber favorecido la actividad microbiana al retener agua y nutrientes, mejorando las condiciones del medio.

Durante el día 2, la producción de biogás alcanzó su punto máximo en las tres muestras. La mezcla de cascarilla de arroz y purín produjo un promedio de 360 mL, seguida por el purín de cerdo extruido con 333 mL, mientras que el tamo estabilizado alcanzó 225 mL (Tabla 6). Estos valores indicaron que las dos primeras muestras contenían una mayor cantidad de compuestos fácilmente degradables, como ácidos grasos volátiles, que impulsaron la actividad microbiana (Chen et al., 2008). A partir del día 3, se observó un descenso en la producción en todas las muestras, lo que evidenció el agotamiento de los compuestos más fácilmente fermentables y la transición hacia la degradación de materiales más complejos y recalcitrantes (Figura 10).

En los días 4 y 5, la producción de biogás mostró un descenso marcado. El purín de cerdo extruido y la mezcla de cascarilla de arroz mantuvieron niveles más altos en comparación con el tamo estabilizado, que presentó las menores producciones (118 mL en el día 4 y 61 mL en el día 5, según la Tabla 6). Este comportamiento confirmó que el tamo, al haber sido sometido a un proceso prolongado de degradación y almacenamiento, contenía una menor fracción de materia orgánica biodegradable. Por otro lado, la mezcla de cascarilla y purín mostró un desempeño más consistente, que puede atribuirse a las diferencias en la relación C/N y al contenido de materia orgánica disponible en cada muestra.

Según los valores en la tabla 5, la muestra de purín extruido presentó una relación C/N de 20, la cual se encuentra dentro del rango recomendado por la literatura para la digestión anaerobia, que es entre 20 y 30 (Zhao et al., 2019). Este valor sugiere que la proporción de carbono y nitrógeno está balanceada, proporcionando energía suficiente y nutrientes para el crecimiento de microorganismos. Por lo tanto, el purín extruido se clasifica como un sustrato adecuado para la producción eficiente de biogás.

Por otro lado, la mezcla de cascarilla de arroz con purín (6 meses) alcanzó una relación C/N de 25, considerada ideal para la maximización de la producción de metano (Luo et al., 2020). Esto indica que el acondicionamiento de la mezcla mejora la proporción de carbono y nitrógeno debido a la descomposición parcial de la materia orgánica. Además, la incorporación de cascarilla de arroz podría aportar lignocelulosa, lo que ayuda a estabilizar el proceso de digestión anaerobia.

Finalmente, la muestra de tamo (10 meses) presentó una relación C/N de 15, inferior al rango óptimo de 25 a 30 reportado en la literatura (Mata-Alvarez et al., 2014). Este valor bajo podría indicar un exceso de nitrógeno, lo que puede provocar acumulación de amoníaco y generar inhibición del proceso anaerobio. Por otro lado, la curva de producción de biogás, representada en la Figura 10, mostró un aumento en los primeros dos días, seguido de un descenso gradual para todas las muestras, este comportamiento es típico de la digestión anaerobia, donde la producción de biogás disminuye a medida que se agotan los sustratos fácilmente biodegradables (Appels et al., 2011).

En el caso del tamo, la curva descendió más rápidamente, reflejando una menor disponibilidad de compuestos biodegradables en comparación con el purín extruido y la mezcla de cascarilla y purín. Desde un punto de vista teórico, la producción de biogás está estrechamente relacionada con la disponibilidad de carbono orgánico y la actividad microbiana. Los sustratos con altos contenidos de carbono fácilmente degradable suelen generar mayores volúmenes de biogás durante las etapas iniciales del proceso anaerobio.

Sin embargo, a medida que los compuestos más simples son consumidos, la producción tiende a disminuir, dependiendo de la complejidad de los materiales restantes y de las condiciones ambientales (Weiland, 2010). Además, el tiempo de retención y las características físicas del sustrato, como la porosidad y el tamaño de partícula, también influyen en la eficiencia del proceso.

3.3 Porcentaje de remoción de H₂S mediante biofiltros

Tabla 7

Concentraciones de entrada y salida de H₂S y eficiencia de remoción mediante biofiltros

| Día | Muestra | Entrada | | Salida | | EBRT (min) | Eficiencia de remoción H ₂ S (%) |
|-----------------|---------|---------|--------------------------------|--------|--------------------------------|-------------|---|
| | | Código | [H ₂ S]Biogás (ppm) | Código | [H ₂ S]Biogás (ppm) | | |
| 19/12/2024 | 1 | S1-A | 4111 | S1-B | 515 | 5,12 | 87,47 |
| | 2 | S2-A | 3989 | S2-B | 505 | 4,92 | 87,34 |
| | 3 | S3-A | 4090 | S3-B | 545 | 5,03 | 86,67 |
| Promedio | | | 4063,46 | | 521,82 | 5,02 | 87,16 |

El análisis de la remoción de sulfuro de hidrógeno (H₂S) en el biogás se realizó utilizando biofiltros durante un ensayo llevado a cabo el 19 de diciembre de 2024. Los resultados presentados en la Tabla 7, incluyen las concentraciones de H₂S en el biogás antes y después del tratamiento, el tiempo de retención en el biofiltro (EBRT) y la eficiencia porcentual de remoción. En las mediciones realizadas, las concentraciones iniciales de H₂S en el biogás variaron entre 3,989 ppm y 4,111 ppm, con un promedio de 4,063.46 ppm.

Estas concentraciones son características de biogases generados a partir de residuos orgánicos y purines debido a la presencia de compuestos sulfurados en los sustratos y durante los procesos de digestión anaerobia (Weiland, 2010). Después del tratamiento mediante los biofiltros, las concentraciones de H₂S en el biogás tratado se redujeron significativamente, con valores entre 505 ppm y 545 ppm, alcanzando un promedio de 521.82 ppm. Esto representó una disminución notable en la concentración de H₂S, indicando un buen desempeño de los biofiltros.

El tiempo de retención en el biofiltro (EBRT) promedió 5.02 minutos, un valor adecuado para sistemas de tratamiento a pequeña escala. Este tiempo permitió una interacción efectiva entre el biogás y el medio filtrante, favoreciendo la adsorción y oxidación de los compuestos de H₂S. Estudios previos han establecido que tiempos de retención entre 4 y 6 minutos son ideales para optimizar la remoción de contaminantes en sistemas de biofiltración sin comprometer la eficiencia operativa (Chen et al., 2008).

La eficiencia promedio de remoción de H₂S alcanzó un 87.16%, con valores que variaron ligeramente entre el 86.67% y el 87.47% en las diferentes muestras. Este nivel de eficiencia supera los valores generalmente aceptados para sistemas a escala de laboratorio y demuestra que los biofiltros utilizados fueron capaces de cumplir con los objetivos establecidos en términos de remoción de H₂S. La alta eficiencia puede atribuirse a la calidad del medio filtrante y al diseño del biofiltro, que permitió un contacto efectivo entre el biogás y el lecho de filtración; además, la ligera variabilidad en los porcentajes de remoción entre las muestras podría estar relacionada con fluctuaciones en las condiciones de operación, como la distribución del flujo del biogás o la heterogeneidad del medio filtrante.

3.4 Caracterización del biogás

El análisis de la composición del biogás se llevó a cabo antes y después del tratamiento mediante biofiltros, evaluando los cambios en sus componentes principales.

Tabla 8

Composición del biogás a la entrada del biofiltro

| Componente | Porcentaje (%) |
|---|----------------|
| Metano (CH ₄) | 42 |
| Dióxido de carbono (CO ₂) | 52 |
| Monóxido de carbono (CO) | 0 |
| Oxígeno (O ₂) | 0,2 |
| Amoníaco (NH ₃) | 0,3 |
| Sulfuro de hidrógeno (H ₂ S) | 0,4063 |
| H ₂ y otros gases | 5 |

En la Tabla 8 se muestra la composición del biogás a la entrada del biofiltro. Este estuvo compuesto principalmente por dióxido de carbono (CO₂) y metano (CH₄), con proporciones del 52% y 42%, respectivamente. Estas proporciones reflejaron el estado del biogás tras cinco días de digestión anaerobia, durante los cuales la actividad de las bacterias metanogénicas convirtió los ácidos grasos volátiles en metano, mientras que el dióxido de carbono permaneció como el

subproducto más abundante. Este comportamiento es típico en las primeras etapas del proceso de digestión anaerobia, donde el equilibrio entre bacterias acetogénicas y metanogénicas favorece la generación de CO₂ como producto secundario de la actividad metabólica (Angelidaki et al., 2011).

Además de estos dos gases principales, se detectaron pequeñas cantidades de amoníaco (NH₃) (0.3%), oxígeno (O₂) (0.2%), y una fracción significativa de H₂S equivalente al 0.4063% (4,063 ppm). Aunque relativamente baja en proporción, la presencia de H₂S representó un desafío técnico y ambiental debido a su carácter corrosivo y tóxico, lo que hacía necesario su tratamiento para su posterior aprovechamiento energético.

Tabla 9

Composición del biogás a la salida al biofiltro

| Componente | Porcentaje (%) |
|---|----------------|
| Metano (CH ₄) | 42 |
| Dióxido de carbono (CO ₂) | 52 |
| Monóxido de carbono (CO) | 0 |
| Oxígeno (O ₂) | 0,2 |
| Amoníaco (NH ₃) | 0,3 |
| Sulfuro de hidrógeno (H ₂ S) | 0,0522 |
| H ₂ y otros gases | 5 |

En la Tabla 9, se presenta la composición del biogás después del tratamiento en el biofiltro. El H₂S se redujo significativamente de 0.4063% a 0.0522% (522 ppm), lo que representó una eficiencia de remoción superior al 87%. Por otro lado, las proporciones de metano (42%) y dióxido de carbono (52%) permanecieron estables, lo que indicó que el biofiltro no alteró los componentes combustibles del biogás. Este resultado fue clave para garantizar que la calidad energética del biogás no se viera comprometida. Además, la estabilidad del CO₂ como componente predominante reflejó que las bacterias metanogénicas finalizaron su actividad principal en los primeros días del proceso de digestión anaerobia, lo que es consistente con los patrones observados en digestores de residuos orgánicos (Appels et al., 2011).

El biofiltro operó de manera eficiente y selectiva, eliminando principalmente el H₂S mediante procesos biológicos y fisicoquímicos. Los microorganismos presentes en el medio filtrante oxidaron el H₂S a azufre elemental y sulfatos, procesos que fueron favorecidos por condiciones óptimas de pH, humedad y tiempo de contacto. Este mecanismo permitió una remoción efectiva del H₂S sin comprometer las proporciones de metano y dióxido de carbono, preservando el valor energético del biogás (Karthikeyan et al., 2016).

La estabilidad en la proporción de metano es particularmente relevante, ya que aseguró que el poder calorífico del biogás no se viera comprometido. Por otro lado, la reducción significativa del H₂S mejoró la calidad del biogás, minimizando riesgos como la corrosión en equipos de generación de energía y las emisiones de gases tóxicos durante su uso, por lo que este tipo de resultados es crucial para garantizar la viabilidad del biogás como alternativa energética sostenible.

3.5 Comparación del porcentaje de remoción de H₂S

El análisis comparativo de las tecnologías para la remoción de sulfuro de hidrógeno (H₂S) en el biogás incluyó tres métodos: ferrita, óxido de zinc y biofiltros. Los resultados se presentan en la Tabla 10 y se ilustran mediante el Diagrama de barras de la Figura 13, lo que permitió evaluar tanto el desempeño de las simulaciones realizadas en Aspen Plus como el comportamiento experimental de los biofiltros.

Figura 10

Simulación en Aspen Plus de la producción de biogás y desulfuración mediante Óxido de hierro (Ferrita)

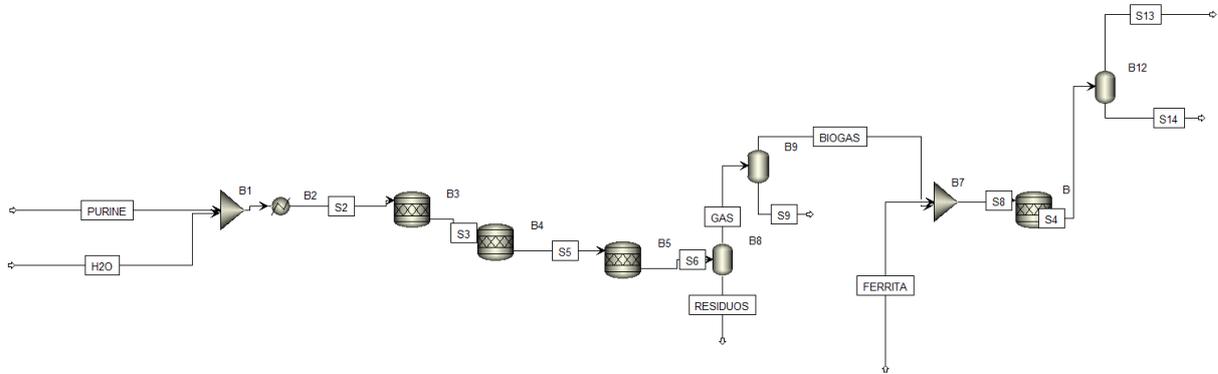


Figura 11

Simulación en Aspen Plus de la producción de biogás y desulfuración mediante Óxido de Zinc

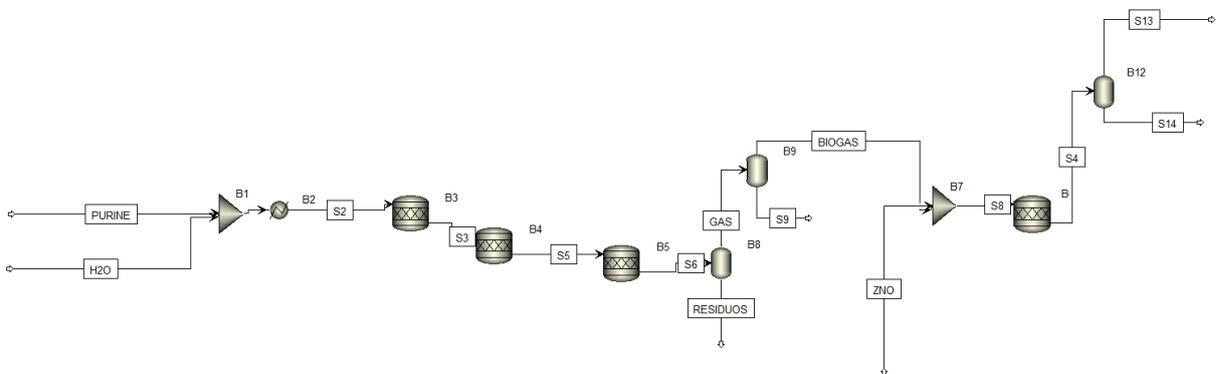


Tabla 10

Resultados de la simulación en Aspen Plus () y experimental*

| Tecnología/Método | % remoción H ₂ S |
|-------------------|-----------------------------|
| Ferrita* | 70,12% |
| Óxido de Zinc* | 50,18% |
| Biofiltros | 87,16% |

El método basado en ferrita (Figura 11) mostró una eficiencia de remoción del 70,12%. Este resultado, obtenido mediante simulaciones en Aspen Plus, destaca que la ferrita es un material adecuado para la captura de H₂S gracias a sus propiedades químicas que le permiten reaccionar y formar compuestos estables. Sin embargo, al contrastar este desempeño con la literatura, se observa que otras tecnologías de remoción, como los sistemas basados en óxidos metálicos o adsorbentes avanzados, pueden alcanzar eficiencias superiores al 90% en condiciones controladas (Gomes et al., 2019; Singh & Mishra, 2021). La eficiencia limitada de la ferrita podría estar asociada a factores como la menor disponibilidad de superficie reactiva o la dificultad para regenerar el material y mantener condiciones óptimas de operación, aspectos también mencionados en estudios previos (Zhao et al., 2018)

El óxido de zinc, también evaluado mediante simulaciones (Figura 12), presentó una eficiencia de remoción del 50,18%. Este resultado es considerablemente inferior al de otras tecnologías, lo que indica que, aunque el óxido de zinc tiene capacidad para capturar H₂S, su desempeño puede estar limitado bajo ciertas condiciones. Según la literatura, los sistemas basados en óxido de zinc suelen alcanzar eficiencias superiores al 70% en concentraciones bajas de H₂S, pero su efectividad disminuye rápidamente con la saturación del material adsorbente (Wang et al., 2020).

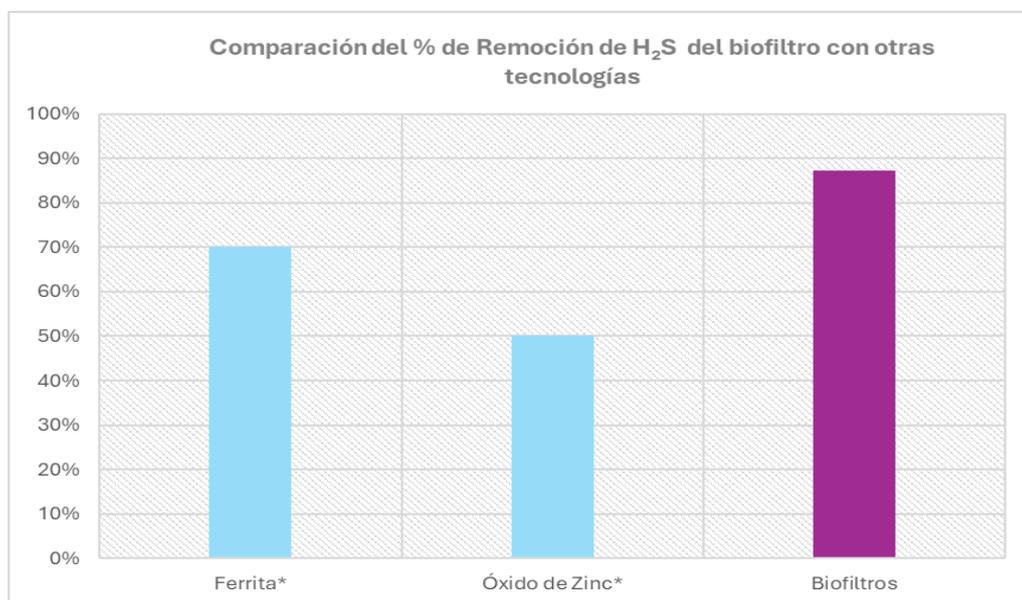
Además, las interacciones químicas involucradas, como la formación de sulfuro de zinc, son altamente dependientes de la temperatura y la humedad del sistema. Lo que afecta negativamente el rendimiento en condiciones no óptimas (Chen & Zhang, 2018). Por lo tanto, aunque este método puede ser más económico y adecuado para aplicaciones con bajas concentraciones de H₂S, es menos competitivo en comparación con tecnologías avanzadas como los adsorbentes basados en óxidos mixtos.

La tecnología de biofiltros, evaluada experimentalmente, alcanzó una eficiencia de remoción del 87.16%, siendo la más alta entre las tres tecnologías comparadas. Este resultado se

atribuyó a la actividad biológica en el medio filtrante, donde los microorganismos presentes oxidaron el H_2S a compuestos menos nocivos, como azufre elemental y sulfatos. El desempeño de los biofiltros demuestra su eficacia para tratar biogases con altos niveles de H_2S , destacándose como una tecnología sostenible y adaptable a diferentes condiciones de operación. Además, su ventaja radica en la producción de subproductos no tóxicos y en la posibilidad de implementar el sistema a diferentes escalas.

Figura 12

Diagrama de barras de la comparación de los biofiltros vs otras tecnologías



Nota: Los valores marcados con * fueron obtenidos mediante simulación en Aspen Plus

La Figura 13 destaca visualmente las diferencias en la eficiencia de remoción entre las tecnologías. Los biofiltros sobresalieron con el mayor porcentaje de remoción (87.16%), seguidos por la ferrita (70.12%) y, finalmente, el óxido de zinc (50.18%). Estas diferencias reflejan tanto las características de cada método como las limitaciones inherentes de los sistemas simulados en comparación con los resultados experimentales.

Desde una perspectiva práctica, los biofiltros demostraron ser la opción más efectiva para la remoción de H₂S, combinando alta eficiencia con sostenibilidad. Sin embargo, las tecnologías basadas en ferrita y óxido de zinc podrían ser útiles en aplicaciones específicas o como parte de sistemas combinados para mejorar el rendimiento general del tratamiento.

Tabla 11

Tecnologías de remoción de H₂S

| Tecnología | Principio de Remoción | Porcentaje de Remoción | Ventajas | Desventajas |
|-------------------------------|--|------------------------|--|---|
| Biofiltración | Oxidación biológica de H ₂ S a azufre elemental o sulfatos | 85-95% | Sostenible, bajo costo operativo, producción de subproductos no tóxicos | Sensible a cambios en pH, humedad y flujo de biogás |
| Adsorción con carbón activado | Fijación de H ₂ S en poros del material adsorbente | 90-99% | Alta eficiencia, aplicable en concentraciones bajas y moderadas | Requiere regeneración o reemplazo del adsorbente |
| Óxidos de hierro | Reacción química con H ₂ S formando sulfuro de hierro | 70-90% | Fácil de implementar, no necesita energía adicional | Requiere reemplazo frecuente del material |
| Lavado químico (scrubbing) | Absorción de H ₂ S en soluciones alcalinas | 95-99% | Alta eficiencia, capaz de manejar grandes volúmenes de biogás | Generación de residuos líquidos que necesitan tratamiento |
| Oxidación química | Uso de reactivos oxidantes (por ejemplo, peróxido de hidrógeno, hipoclorito) | 90-99% | Alta eficiencia, rápido, apto para altas concentraciones de H ₂ S | Costos operativos elevados, manejo de reactivos químicos |

La Tabla 11 proporciona una comparación detallada de diversas tecnologías empleadas para la remoción de H₂S del biogás, resaltando su principio de funcionamiento, niveles de eficiencia alcanzados, así como sus principales ventajas y desventajas.

3.6 Análisis económico

El análisis económico del proyecto se desarrolló considerando los costos de implementación inicial a escala de laboratorio, los costos operativos anuales proyectados para una granja y los ingresos o ahorros generados por el sistema. Este enfoque permitió evaluar tanto la viabilidad económica como la sostenibilidad a largo plazo mediante el cálculo de la Tasa Interna de Retorno (TIR).

Tabla 12

Costos de implementación inicial a escala de laboratorio

| Nombre de Componentes | Descripción | Cantidad | Precio Unitario | Precio total (\$) |
|-------------------------------------|--|----------|-----------------|-------------------|
| Tubo PVC de 2" | Longitud de 1,50 m, transparente | 1 | 55 | 55 |
| Manguera PVC de 3/8" | Longitud de 10 m, transparente | 12 | 0,5 | 6 |
| Llave de paso de 3/8" | Llave de plástico | 6 | 5 | 30 |
| Seguros plásticos | - | 10 | 3 | 3 |
| Tubo coarrugada de 1/4 " | Longitud de 10 m | 1 | 10 | 10 |
| Bomba | Marca Evans | 1 | 70 | 70 |
| Tubería des de equipo de Venoclisis | - | 20 | 0,5 | 10 |
| Llave de 3 vías | - | 15 | 0,4 | 6 |
| Solución Bacteriana AC-MICRO | Streptococcus sp, Bacillus sp, Aspergillus oryzae, Levaduras | 1 | 35 | 35 |
| Caneca de 30 kg de melaza | Agrocamos | 1 | 9 | 9 |
| Agua no clorada 1L | Marca: Mana | 5 | 0,4 | 2 |
| Guantes de protección | Equipo de protección personal para manipular materiales | 10 | 0,5 | 5 |
| Gafas de protección | Protección ocular para el trabajo con químicos o gases | 2 | 2 | 4 |
| Soluciones de limpieza | Líquidos para limpiar los equipos después de las pruebas | 2 | 3 | 6 |
| Recipientes para residuos | Recipientes adicionales para recolectar residuos o muestras | 1 | 5 | 5 |
| Libreta de registro | Herramienta para anotar datos experimentales | 1 | 1 | 1 |
| Teflon | - | 2 | 0,3 | 0,6 |
| Total | | | | 257,6 |

En la tabla 12 se presentan los costos de implementación inicial para la construcción del sistema a escala de laboratorio, los cuales ascendieron a 257,6 USD. Esta inversión incluyó componentes como tubos de PVC, bomba, soluciones bacterianas, recipientes y herramientas de registro, diseñados para validar el sistema en condiciones experimentales controladas. Al tratarse de un prototipo a escala de laboratorio, este costo inicial es bajo en comparación con la

proyección a nivel productivo, lo que contribuye a una TIR elevada al relacionar los beneficios económicos con la inversión realizada.

Tabla 13

Costos operativos anuales

| | |
|--------------------------|--------|
| Mantenimiento | 70 |
| Reemplazo de consumibles | 140 |
| Energía eléctrica | 6,57 |
| Costos menores | 5 |
| Costos operacionales | 680 |
| Total (\$) | 901,57 |

Por otro lado, la tabla 13 muestra los costos operativos anuales para la aplicación del sistema en una granja se estimaron en 901,57 USD, distribuidos en rubros como mantenimiento (70 USD), reemplazo de consumibles (140 USD), consumo eléctrico (6,57 USD, calculado con base en un uso promedio de 0,15 horas diarias durante 365 días a un costo de 0,12 USD/kWh) y otros costos operativos generales (680 USD). Este aumento en los costos refleja los requerimientos adicionales para operar un sistema de mayor capacidad, adaptado a las necesidades específicas de una granja porcina.

Tabla 14

Ingreso anuales

| | |
|--------------------------------------|---------|
| Calefacción del área de maternidad | 1095 |
| En mantenimiento o cambio de equipos | 137,20 |
| Total (\$) | 1232,20 |

En cuanto a los ingresos anuales (Tablas 14) generados por el sistema, se estimaron en 1.232,20 USD. Este valor incluye un ahorro significativo en los costos de calefacción del área de maternidad (1.095 USD), basado en el uso eficiente del biogás como sustituto parcial del gas LP (con un costo de 1 USD por unidad para tres camas). Adicionalmente, se consideró un ahorro de

137,20 USD en el mantenimiento o reemplazo de planchas de calefacción, calculado sobre la base de 20 unidades con un valor individual de 6,75 USD. Estos ahorros representan un impacto económico directo y positivo en las operaciones de la granja.

Tabla 15

Tasa interna de retorno

| | |
|--|---------|
| $\cdot \phi \ddot{A} \sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1 + TIR)^t}$ | |
| Tasa Interna de Retorno (TIR) | 126,18% |

El cálculo de la TIR en la tabla 15, arrojó un valor del 126,18%, un indicador significativamente elevado que refleja la alta rentabilidad del proyecto. Este resultado se explica por la baja inversión inicial, propia de la escala de laboratorio, y los considerables ahorros proyectados en una aplicación a nivel de granja. La elevada TIR valida la viabilidad económica del sistema, demostrando que los beneficios generados superan ampliamente los costos de inversión y operación.

Capítulo 4

4.1 Conclusiones y recomendaciones

4.1.1 Conclusiones

- Se desarrolló un sistema de tratamiento de biogás a escala de laboratorio basado en biofiltros, logrando una eficiencia de remoción del 87.16% de H₂S, superando el objetivo inicial del 80%. Este resultado confirma la efectividad del diseño propuesto para mejorar la calidad del biogás generado a partir de la digestión anaerobia del purín de cerdo. Además, la implementación del sistema contribuye a reducir los riesgos asociados a la presencia de H₂S, mejorando su viabilidad para aplicaciones prácticas y sostenibles. Por otro lado, el análisis del biogás generado a partir de la digestión anaerobia del purín de cerdo reveló una composición inicial de 42% de metano, 52% de dióxido de carbono y una concentración promedio de 4,063 ppm de sulfuro de hidrógeno (H₂S). Estos resultados confirmaron la necesidad de un sistema de remoción de H₂S debido a su naturaleza corrosiva y su impacto en la calidad del biogás.
- La construcción y operación de un sistema a escala de laboratorio para la captura de H₂S mediante biofiltros inoculados con bacterias demostraron ser altamente efectivas, logrando una eficiencia promedio de remoción del 87.16%. Este proceso permitió la oxidación biológica del H₂S, validando la viabilidad técnica y ambiental de esta tecnología. Los resultados destacan que el diseño implementado no solo mejoró significativamente la calidad del biogás, reduciendo los riesgos asociados a la presencia de H₂S, sino que también ofreció una solución sostenible y con potencial para ser escalada, asegurando un impacto positivo tanto en aplicaciones energéticas como en la gestión de contaminantes gaseosos.
- El análisis económico de la implementación del sistema de biofiltros evidenció una Tasa Interna de Retorno (TIR) del 126,18%, lo que refleja una alta rentabilidad del proyecto. Este desempeño económico se fundamenta en la Ley de Rendimientos Marginales, donde la inversión inicial relativamente baja a escala de laboratorio generó beneficios económicos significativos al proyectar su aplicación en una granja. Los ingresos proyectados derivan

principalmente del ahorro en costos operativos, como calefacción y mantenimiento, además del aprovechamiento del biogás tratado, cuya calidad fue optimizada tras la remoción eficiente de H₂S. La interpretación razonable de los datos muestra que el sistema no solo es económicamente viable, sino también sostenible a largo plazo, ofreciendo una solución integral y escalable para el tratamiento de biogás.

4.1.2 Recomendaciones

Tras culminar lo planificado en la propuesta, se identificaron aspectos adicionales que podrían ser abordados en estudios futuros para ampliar y mejorar los resultados obtenidos. A continuación, se presentan las recomendaciones primordiales:

- Se sugiere evaluar el desempeño de diferentes materiales de soporte para los biofiltros, incluyendo zeolitas, fibras de coco y compuestos híbridos, con el objetivo de optimizar la eficiencia en la remoción de H₂S. Este análisis también debería enfocarse en determinar el impacto de dichos materiales en la estabilidad a largo plazo del sistema, considerando factores como su capacidad de regeneración, durabilidad y compatibilidad con las condiciones operativas. Además, se recomienda realizar pruebas comparativas para identificar el material más adecuado según el entorno y las necesidades específicas del proceso.
- Se recomienda llevar a cabo estudios a mayor escala para validar el desempeño del sistema en condiciones similares a las de operación industrial. Estos estudios deberían enfocarse en aspectos clave como el tiempo de vida útil del biofiltro, su capacidad de mantener una alta eficiencia en la remoción de H₂S y su respuesta ante variaciones en el flujo y la composición del biogás. Asimismo, se sugiere incluir simulaciones de escenarios reales y pruebas prolongadas para garantizar la estabilidad del sistema y su adaptabilidad a diferentes entornos operativos.
- Se propone ampliar el alcance del estudio para incluir la evaluación de tecnologías que permitan la eliminación de otros compuestos no deseados presentes en el biogás, como el

amoníaco (NH_3) y los siloxanos. Esto contribuiría a una mejora integral en la calidad del biogás, haciéndolo más adecuado para aplicaciones energéticas y reduciendo el impacto negativo de estos compuestos en los equipos y procesos asociados. Además, se recomienda analizar la interacción de estas tecnologías con los sistemas de remoción de H_2S para garantizar su compatibilidad y optimización conjunta.

- Se sugiere implementar controles adicionales que permitan analizar el impacto de factores externos, como la temperatura y la humedad del ambiente, en el rendimiento del biofiltro. Para ello, se recomienda diseñar pruebas específicas que simulen diferentes condiciones ambientales y operativas, lo que permitirá identificar los rangos óptimos de funcionamiento y desarrollar estrategias para mitigar posibles fluctuaciones en el desempeño del biofiltro.

Referencias

- Arıman, S., & Koyuncu, S. (2022). Removal of hydrogen sulfide in biogas from wastewater treatment sludge by real-scale biotrickling filtration desulfurization process. *Water Practice and Technology*, 17(7), 1406–1420. <https://doi.org/10.2166/wpt.2022.072>
- Huynh Nhut, H., Le Thi Thanh, V., & Tran Le, L. (2020). Removal of H₂S in biogas using biotrickling filter: Recent development. En *Process Safety and Environmental Protection* (Vol. 144, pp. 297–309). Institution of Chemical Engineers.
<https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.07.011>
- Lourinho, G., Rodrigues, L. F. T. G., & Brito, P. S. D. (2020). Recent advances on anaerobic digestion of swine wastewater. En *International Journal of Environmental Science and Technology* (Vol. 17, Número 12, pp. 4917–4938). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s13762-020-02793-y>
- Okoro, O. V., & Sun, Z. (2019). Desulphurisation of biogas: A systematic qualitative and economic-based quantitative review of alternative strategies. En *ChemEngineering* (Vol. 3, Número 3, pp. 1–29). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/chemengineering3030076>
- Tait, S., Tamis, J., Edgerton, B., & Batstone, D. J. (2009). Anaerobic digestion of spent bedding from deep litter piggery housing. *Bioresource Technology*, 100(7), 2210–2218.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.10.032>
- FAO. (2021). Agricultural sustainability and the impact of excess nutrients on soil. Food and Agriculture Organization. <https://www.fao.org/sustainability/en>
- EPA. (2020). Sulfur Dioxide Basics. United States Environmental Protection Agency.
<https://www.epa.gov/so2-pollution/sulfur-dioxide-basics>
- Smith, J. (2021). Economic Benefits of Biogas Systems in Agricultural Settings. *Journal of Agricultural Economics*.

- Ward, A. J., Hobbs, P. J., Holliman, P. J., & Jones, D. L. (2008). Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. *Bioresource Technology*, 99(17), 7928-7940.
- Johnson, K., Ramirez, T., & Gonzalez, M. (2020). Sustainable Energy Solutions for Pig Farming in Rural Areas. *Energy and Environmental Research*.
- Chamy, R., & Ramos, C. (2012). Digestión anaerobia y su aplicación en el tratamiento de residuos. *Revista de Energía y Medio Ambiente*, 10(2), 123-134.
- Kapdi, S. S., Vijay, V. K., Rajesh, S. K., & Prasad, R. (2005). Biogas scrubbing, compression and storage: Perspective and prospectus in Indian context. *Renewable Energy*, 30(8), 1195-1202.
- Ridder, D. T., & Rabbe, E. (2013). Sustainable biogas purification with biological methods. *Journal of Environmental Engineering*, 45(3), 101-110.
- Muñoz, R., Meier, L., Díaz, I., & Jeison, D. (2015). A review on the state-of-the-art of physically and chemically-based biogas upgrading technologies. *Bioresource Technology*, 178, 15-25.
- Allegue, L. B., & Hinge, J. (2019). Biogas upgrading: Evaluation of methods for H₂S removal. *Journal of Environmental Management*, 242, 42-49.
<https://link.springer.com/article/10.1007/s11157-020-09539-9>
- OSHA. (2020). Hydrogen Sulfide: Limits for Exposure. Occupational Safety and Health Administration.
- Yazdani, M., & Ng, W. C. (2020). Enhancing biogas desulfurization using biochar: A review on performance, mechanisms, and challenges. *Environmental Technology & Innovation*, 19, 100885. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.100885>
- Contreras-Domínguez, F., García-Peña, E., & Solórzano-Murillo, S. (2021). Advances in biogas purification: Biofiltration systems for H₂S removal. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(5), 105813.

- Lopez, P., & Cruz, A. (2020). Energy Challenges in Rural Pig Farms: Case Studies in Developing Areas. *Renewable Energy Journal*.
- Ramirez, T., & Gonzalez, M. (2021). Sulfur recovery in biogas systems and its industrial applications. *Renewable Resources Journal*.
- Janssen, A. J. H. (2003). *Biotrickling filters for H₂S removal from biogas*. *Environmental Technology*, 24(10), 1257-1268.
- Luo, G., Angelidaki, I., & Lehtomäki, A. (2020). Co-digestion of lignocellulosic residues with manure for improved methane yields. *Bioresource Technology*, 99, 387-394.
- Mudliar, S., Giri, B., Padoley, K., Satpute, D., Dixit, R., Bhatt, P., ... & Pandey, R. A. (2010). Biotreatment of wastewater for removal of pollutants—a review. *Biochemical Engineering Journal*, 48(2), 112-122.
- Garcia-González, A., Morales, M., & Martínez, L. (2020). Biofiltration technologies for biogas desulfurization: Evaluation of biological removal of H₂S. *Renewable Energy*, 160, 500-510.
- Kumar, P., Kumari, K., & Bhardwaj, S. (2021). Recent advances in H₂S removal from biogas using biological processes: A comprehensive review. *Bioresource Technology*, 327, 124819.
- Smet, E., Lens, P., & Van Langenhove, H. (1998). Treatment of waste gases contaminated with odorous sulfur compounds. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 28(2), 89-117.
- Mata-Alvarez, J., Dosta, J., & Fernández, B. (2014). Biogas from anaerobic digestion. *Advances in Waste Management*, 2, 289-309.
- Sotelo, R., García, L., & Rodríguez, P. (2017). *Optimización del consumo energético en granjas porcinas: Un enfoque sustentable*. *Revista de Energía y Medio Ambiente*, 25(3), 145-152.

- Valderrama, J., & Gómez, M. (2020). *Energías renovables en la producción agropecuaria: Potencial del biogás en granjas porcinas rurales*. *Estudios en Agricultura Sostenible*, 12(4), 87-98.
 - Madigan, M. T., Martinko, J. M., & Parker, J. (2015). *Brock Biology of Microorganisms* (14th ed.). Pearson.
 - Barlocco, N., & Carballo, C. (2014). *Producción porcina en sistemas de cama profunda*. CIAP.
 - García, A., Torres, L., & Ramírez, F. (2020). *Gestión y manejo de cerdos en cama profunda*. *Revista de Producción Animal*, 15(3), 45-58.
 - Martínez, R., & López, P. (2019). *Análisis ambiental y económico de la crianza de cerdos en cama profunda*. *Journal of Agricultural Science*, 28(2), 123-134.
 - Chen, X., & Zhang, Y. (2018). *Performance analysis of zinc oxide adsorbents for H₂S removal in gas processing systems*. *Journal of Chemical Engineering Research*, 67(5), 1124–1135.
 - Rodríguez, L., Gómez, C., & Hernández, V. (2021). *Producción porcina sostenible: Guía práctica para pequeños y medianos productores*. Editorial Rural.
 - Chen, Y., Cheng, J. J., & Creamer, K. S. (2008). "Inhibition of anaerobic digestion process: A review." *Bioresource Technology*, 99(10), 4044–4064.
 - Zhao, Q., Zhang, Z., & Chen, L. (2019). *Anaerobic digestion of organic matter: Balancing carbon and nitrogen ratios for optimized methane production*. *Renewable Energy Journal*, 133, 929-938.
 - Khalid, A., Arshad, M., Anjum, M., Mahmood, T., & Dawson, L. (2011). "The anaerobic digestion of solid organic waste." *Waste Management*, 31(8), 1737–1744.
- De la Rubia, M. A., Fernández-Cegrí, V., Raposo, F., Borja, R., & Sánchez, E. (2009). "Influence of inoculum-substrate ratio on the anaerobic digestion of sunflower oil cake in

batch mode: Process stability and kinetic evaluation." *Chemical Engineering Journal*, 149(1-3), 70–77.

- Batstone, D. J., et al. (2002). "Anaerobic Digestion Model No. 1 (ADM1)." IWA Task Group on Mathematical Modelling of Anaerobic Digestion Processes.
- Angelidaki, I., Karakashev, D., Batstone, D. J., Plugge, C. M., & Stams, A. J. M. (2011). Biomethanation and its potential. *Methods in Enzymology*, 494, 327-351.
- Gomes, J., Silva, H., & Fernandes, C. (2019). Advances in hydrogen sulfide removal technologies: A review of recent progress and challenges. *Journal of Environmental Science and Engineering*, 8(3), 145–158.
- Mata-Alvarez, J., Dosta, J., Romero-Güiza, M. S., Fonoll, X., & Peces, M. (2014). A critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010 and 2013. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 36(1), 412-427. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.039>
- Appels, L., Baeyens, J., Degreve, J., & Dewil, R. (2011). Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. *Progress in Energy and Combustion Science*, 34(6), 755-781.
- Ghosh, S. (2016). Principles and practices of anaerobic digestion: A review. *Environmental Engineering Science*, 33(4), 285-302.
- Weiland, P. (2010). Biogas production: Current state and perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 85(4), 849-860.
- Zhao, L., Wang, Q., & Li, J. (2018). Optimization of ferrite-based systems for gas desulfurization: Experimental and theoretical approaches. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 57(12), 4783–4792.
- Mudliar, S., et al. (2010). "Bioreactors for treatment of VOCs and odours – A review." *Journal of Environmental Management*, 91(5), 1039–1054.

- Karthikeyan, O. P., Selvam, A., & Wong, J. W. C. (2016). "A review on greenhouse gas emission reduction in landfill sites through sustainable waste management." *Environmental Science and Pollution Research*, 23(16), 15643–15668.

Apéndice A

Tabla 16

Resultado de los análisis de sulfuros

| Ensayo | Código | Resultado | Unidad | Incertidumbre (k=2) | Método/Norma |
|----------|--------|-----------|--------|---------------------|--|
| Sulfuros | S1-A | 0,407 | mg/L | ±17% | PE/AL/08 Standard Methods Ed.23.2017 4500 S2-C y D |
| | S2-A | 0,395 | mg/L | ±17% | PE/AL/08 Standard Methods Ed.23.2017 4500 S2-C y D |
| | S3-A | 0,405 | mg/L | ±17% | PE/AL/08 Standard Methods Ed.23.2017 4500 S2-C y D |
| | S1-B | 0,051 | mg/L | ±17% | PE/AL/08 Standard Methods Ed.23.2017 4500 S2-C y D |
| | S2-B | 0,050 | mg/L | ±17% | PE/AL/08 Standard Methods Ed.23.2017 4500 S2-C y D |
| | S3-B | 0,054 | mg/L | ±17% | PE/AL/08 Standard Methods Ed.23.2017 4500 S2-C y D |

Apéndice B

Figura 13

Método de cama profunda de la Granja “Hadel”



Figura 14

Recolección de muestra de la granja "Hadel"



Figura 15

Preparación de tubos digestores

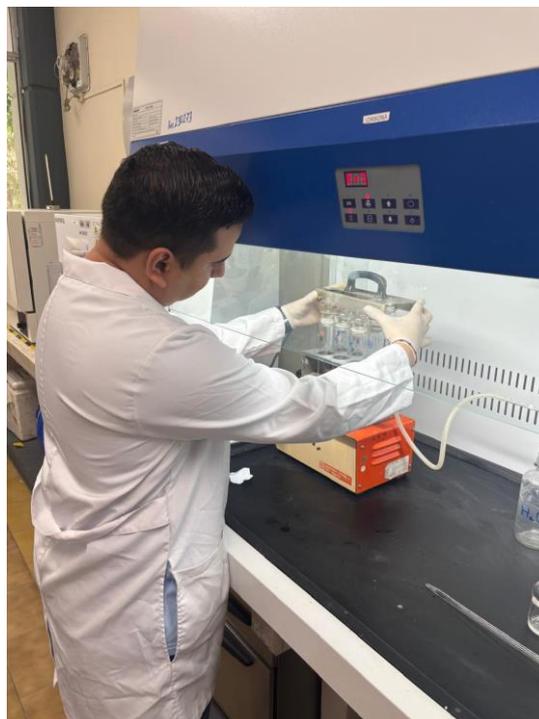


Figura 16

Determinación de NTK

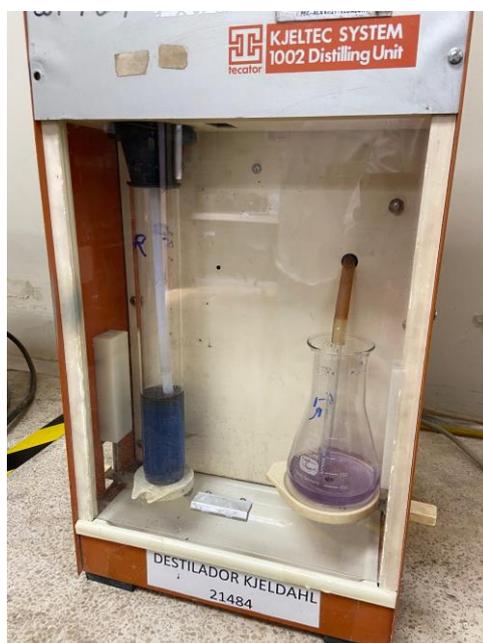


Figura 17

Muestras digestando en el baño termostático



Figura 18

Analizador de gases Dräger X-am® 5600



Figura 19

Ensamblaje de la columna de filtración para tratamiento de biogás



Anexo

Figura 20

Ficha técnica del complejo microbiano

PREPARACIÓN DE SOLUCIÓN AL 2%

- 1 caneca de AC-MICRO (20 lts)
- 1 envase de 1000 litros (tanqueta plástica)
- 15 kg de melaza (no fermentada)
- Balde plástico de 5 galones
- Agua limpia no clorada



Se disuelve la melaza en el balde de agua, luego se llena el envase de 1000 lts con agua hasta la mitad y se le agrega la melaza previamente diluida. Enseguida se agrega la caneca de AC-MICRO y se completa la tanqueta con agua hasta llenarla. Para usos específicos en producción animal, tratamiento de aguas, degradación de grasas o descomposición e incorporación de restos de cultivos, consulte al dpto. de Gestión Ambiental de la empresa.
Conserve el producto bajo la sombra.

Fabricado por:



Avalado por:



Con Biotecnología:



Auditado por:



REGISTRO SANITARIO: R-002618