


ESTUDIO DE LA SOSTENIBILIDAD DE LA REMOCIÓN DE H₂S DEL BIOGÁS A ESCALA PILOTO, MEDIANTE BIOFILTRACIÓN

STUDY OF THE SUSTAINABILITY OF THE REMOVAL OF H₂S FROM BIOGAS ON A PILOT SCALE, THROUGH BIOFILTRATION

Clara Figueroa Cornejo¹  Víctor Meza Contreras[†] 

Lawrence Quipuzco Ushñahua¹ 

¹Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima-Perú.

Correspondencia: Ph.D. Clara Figueroa Cornejo cfigueroa@lamolina.edu.pe
Como citar este artículo: Figueroa, C., Meza, V., & Quipuzco, L. (2024). Estudio de la sostenibilidad de la remoción de H₂S del biogás a escala piloto, mediante biofiltración. *Revista de Investigación Hatun Yachay Wasi*, 3(2), 82 - 96. <https://doi.org/10.57107/hyw.v3i2.75>

RESUMEN

El presente estudio se centró en evaluar la sostenibilidad de la eliminación de H₂S del biogás a escala piloto, utilizando un sistema de biofiltración. Para este propósito, se llevó a cabo una caracterización detallada tanto del soporte utilizado como del biogás antes y después del proceso de biofiltración, analizando las propiedades físicas, químicas y biológicas del compost, así como las propiedades críticas del sistema, tales como porosidad, densidad, contenido de humedad, pH y carga microbiana. Al concluir el proceso de biofiltración, se detectó un aumento en la humedad del sistema, lo cual dificultó la transferencia de nutrientes y la generación de energía mediante los procesos de óxido-reducción. Además, la presencia de trazas de azufre elemental en el soporte indica que, en condiciones de pH neutro, se mejora la transferencia de masa del H₂S de la fase gaseosa a la fase líquida. Se determinó que el diseño del sistema de biofiltración propuesto para la prueba piloto demostró una alta eficiencia en la remoción de H₂S. El biofiltro basado en compost, operando con un flujo de 0,5 L min⁻¹, mostró un alto grado de adaptación a concentraciones de sulfuro de entrada que oscilaban entre 2300 y 3700 ppmv. La abundancia de biomasa en el compost, junto con sus características físico-químicas y su capacidad amortiguadora, permitió completar el proceso sin provocar la acidificación del medio.

Palabras clave: Biofiltración, remoción de H₂S, biogás, carga másica volumétrica, capacidad de eliminación.

ABSTRACT

The present study focused on evaluating the sustainability of H₂S removal from biogas at a pilot scale using a biofiltration system. For this purpose, a detailed characterization was conducted on both the support material used and the biogas before and after the biofiltration process, analyzing the physical, chemical, and biological properties of the compost, as well as critical system properties such as porosity, density, moisture content, pH, and microbial load. Upon completing the biofiltration process, an increase in system moisture was detected, which hindered nutrient transfer and energy generation through redox processes. Additionally, the presence of elemental sulfur traces in the support indicates that, under neutral pH conditions, mass transfer of H₂S from the gas phase to the liquid



phase is improved. The design of the biofiltration system proposed for the pilot test was found to be highly efficient in H₂S removal. The compost-based biofilter, operating at a flow rate of 0.5 L min⁻¹, demonstrated a high degree of adaptation to inlet sulfide concentrations ranging from 2300 to 3700 ppmv. The abundance of biomass in the compost, along with its physicochemical characteristics and buffering capacity, allowed the process to be completed without causing acidification of the medium.

Keywords: Biofiltration, H₂S removal, biogas, volumetric mass load, removal capacity.

INTRODUCCIÓN

El crecimiento de la población y la globalización representan amenazas significativas para la seguridad del suministro energético. En respuesta, muchos países están enfocándose en la diversificación de sus matrices energéticas, con el objetivo de reducir la dependencia de los combustibles fósiles y aprovechar de manera más eficiente las abundantes reservas de energía renovable disponibles.

La utilización de fuentes de energía renovables podría ser una forma inteligente de satisfacer la creciente demanda de energía, en especial en países emergentes (Buller et al., 2022).

Los países han fomentado la implementación de políticas públicas para impulsar el uso de fuentes no fósiles para preservar los recursos y reducir el daño ambiental (Mora et al., 2020). En el Perú, se espera que para el 2030 las energías renovables no convencionales alcancen el 15 % de la matriz energética total del país.

El biogás, importante fuente de energía resultante de la fermentación anaeróbica de la biomasa, tiene una composición variable de acuerdo a la materia empleada en su obtención. Su composición aproximada es del 55 al 70 % de metano, alrededor del 35 al 40 % de dióxido de carbono y un porcentaje pequeño de siloxanos, nitrógeno y sulfuro de hidrógeno.

La eliminación del H₂S resulta esencial en la mayoría de los casos debido a su elevada corrosividad y

toxicidad, lo que representa un peligro significativo para la salud humana, la seguridad, y el medio ambiente. Además, su presencia puede causar daños considerables a los equipos utilizados en el transporte y la distribución del biogás.

El sulfuro de hidrógeno se produce durante la reducción de compuestos de azufre (aminoácidos, péptidos, sulfatos), su presencia está en el rango de 0-10,000 ppmv, dificultando su utilización práctica (Werkneh et al., 2022).

En la última década se han desarrollado muchas investigaciones que evalúan las ventajas de las biotecnologías para la limpieza del biogás por sus menores costos operativos, mayor seguridad y menor contaminación secundaria (Torres-Herrera et al., 2024).

Almenglo et al. (2023), destacan el diseño sencillo, bajos costos de capital y operación, mientras que como desventajas consideran el riesgo de obstrucción (biomasa y acumulación de H₂S).

La desulfuración biológica se fundamenta en la capacidad de diversos microorganismos para oxidar compuestos reducidos de azufre, transformándolos en sustancias de fácil eliminación, como el azufre elemental (S₀) o sulfatos (SO₄²⁻). Entre estos microorganismos se encuentran especies aerobias azufre-oxidantes como *Thiobacillus ferrooxidans*, *Methylobacterium* spp., *Paracoccus* spp., *Pseudomonas* spp., *Starkeya* spp., *Sulfolobus* spp., y anaerobias como *Allochroium* spp., *Clorobium*

spp. , Rhodopseudomonas spp. , Rhodovulum spp. , y Thiocapsa spp (Pudi et al., 2022).

Esta capacidad microbiana es crucial en la biodesulfuración de biogás, ya que permite la oxidación de H₂S y la fijación de CO₂ como parte de la función estequiométrica del proceso. Estudios recientes destacan el papel de bacterias quimiolitotróficas acidófilas, como Acidithiobacillus ferrooxidans y A. thiooxidans , en la eliminación de azufre inorgánico en condiciones extremas (Kotelnikov et al., 2020).

Además, el proceso de desulfurización bajo condiciones haloalcalinas también ha demostrado ser efectivo para convertir H₂S en azufre elemental, mejorando así la sostenibilidad del proceso y reduciendo la formación de subproductos no deseados (de Rink et al., 2019).

Las investigaciones también sugieren que la aplicación de fotobiorreactores basados en bacterias fotoautotróficas anoxigénicas podría optimizar la desulfuración biológica del biogás, aumentando tanto la eficiencia como la seguridad del proceso (Cattaneo et al., 2020). Con la eliminación del CO₂(g) y el H₂S, es posible enriquecer el biogás en CH₄(g), facilitando su utilización en diversas aplicaciones.

La obtención de azufre elemental es especialmente deseable debido a su utilidad en la fabricación de fertilizantes, además de que su aplicación al suelo tras el uso de biofiltros orgánicos no provoca efectos adversos significativos en el medio ambiente (Tang, Baskaran, & Nemati, 2009).

La biofiltración, una tecnología basada en métodos biológicos, ha demostrado ser eficaz no solo para la eliminación de compuestos orgánicos volátiles (COV) y metales pesados en el tratamiento de aguas residuales, sino también para la producción de subproductos beneficiosos como el azufre elemental. Esta técnica es rentable, sostenible y

respetuosa con el medio ambiente, lo que la hace una opción viable para la gestión de contaminantes industriales (Pachaiappan et al., 2023).

Además, la transformación de residuos de biomasa en fertilizantes orgánicos presenta una alternativa ecológica a los fertilizantes químicos convencionales, contribuyendo a la minimización de residuos y al mejoramiento agrícola. Los fertilizantes derivados de residuos de biomasa, como el estiércol animal y los lodos depuradora, no solo enriquecen el suelo con nutrientes esenciales, sino que también promueven prácticas agrícolas sostenibles (Chew et al., 2023).

Los filtros biopercoladores, o biofiltros percoladores, representan una evolución en el tratamiento biológico de contaminantes del aire en comparación con los biofiltros convencionales. La principal distinción entre ambos sistemas radica en el tipo de material utilizado como soporte. Mientras que los biofiltros emplean un medio de soporte orgánico, los filtros biopercoladores utilizan un soporte inerte, como anillos de plástico o roca de lava, sobre el cual se inmoviliza la biomasa (Cox & Deshusses, 1999).

Este diseño permite la recirculación de una fase líquida que aporta los nutrientes necesarios y ayuda a mantener el pH y otros parámetros operativos adecuados. Esta recirculación puede llevarse a cabo tanto en contracorriente como en la misma dirección del flujo de gas, dependiendo de los requerimientos del proceso (Kennes & Veiga, 2001). Los filtros biopercoladores han demostrado ser más eficientes en la eliminación de contaminantes que generan productos finales ácidos, como los contaminantes halogenados o que contienen azufre. Recientemente, se han optimizado varios parámetros de operación, como las velocidades del gas y del líquido, y las características del material de relleno, lo cual ha mejorado significativamente la capacidad de estos filtros para tratar altas cargas

de contaminantes en tiempos de residencia cortos (Kennes & Veiga, 2001).

Además, se han investigado estrategias para mitigar problemas como la acumulación de biomasa y la obstrucción del lecho, lo cual es esencial para mantener la eficiencia operativa a largo plazo (Huynh et al., 2022).

En estudios comparativos, los filtros biopercoladores han mostrado un mejor rendimiento en términos de dispersión de contaminantes en la atmósfera y de calidad del aire en comparación con los biofiltros abiertos convencionales. La mejora en el control de olores y la reducción del riesgo de cáncer asociado a contaminantes como el benceno se ha atribuido a la mayor altura de liberación y velocidad del flujo de aire saliente de los filtros biopercoladores (Schiavon et al., 2021). Por lo tanto, los filtros biopercoladores representan una alternativa más eficiente y eficaz para aplicaciones específicas de tratamiento de emisiones gaseosas.

Estudios como los reportados por Bustamante (2017), Nagendranatha, Baeb, & Min (2019) y Flores-Cortés et al. (2021), se realizaron a partir de esta tecnología, demostrando buena capacidad de eliminación (CE) de sulfuro, sin embargo, presentan inconvenientes como acumulación de biomasa y/o azufre elemental en el material de embalaje, ocasionando paradas del sistema y elevados costos de operación.

Por otro lado, el mayor problema encontrado en los biofiltros es la acidificación del medio debido a la formación de ácido sulfúrico por la degradación del H_2S , por lo que se hace necesario seguir investigando, ya que como apuntan Cano et al. (2018), las biotecnologías son económica y ambientalmente más favorables.

Tomando en consideración lo anteriormente expuesto, se planteó como objetivo de la

investigación que dio lugar a este trabajo: estudiar la sostenibilidad de la remoción del H_2S del biogás a escala piloto, mediante biofiltración.

MATERIALES Y MÉTODOS

El ensayo piloto se llevó a cabo en el Centro Modelo de Tratamiento de Residuos Sólidos (CEMTRAR), ubicado en el campus de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM).

En el experimento, se implementó un biofiltro en la línea de producción de biogás, que proviene de un biodigestor tubular de membrana con una capacidad de 8 m^3 . Durante el estudio, se realizaron análisis de las propiedades físico-químicas y biológicas del compost al inicio y al final del proceso. Asimismo, se monitoreó regularmente la concentración de sulfuro de hidrógeno en los puntos de entrada y salida del biofiltro para evaluar la eficiencia del sistema. El propósito principal fue determinar la viabilidad y sostenibilidad de esta biotecnología en condiciones de operación reales en el campo.

La investigación se estructuró en dos fases principales: el diseño del biofiltro y la caracterización del material de soporte y del biogás antes y después del proceso de biofiltración.

Diseño del biofiltro

El estudio analizó las condiciones de operación del biofiltro en el sistema de producción de biogás del CEMTRAR, que utilizó un biodigestor de membrana con capacidad de 8 m^3 .

Se diseñó una columna cilíndrica fabricada con PVC, en cuyo interior se colocó compost para la biofiltración. Las especificaciones de la columna se detallan en la Tabla 1.

TABLA 1*Características físicas de la columna de biofiltración.*

Magnitudes físicas	Dimensión
Diámetro	0,08 m
Longitud del biofiltro	0,6 m
Altura del empaque	0,55 m
Volumen del biofiltro	3,00 L
Volumen del lecho filtrante	2,40 L
Área superficial	5,00 m ²

*Fuente: Elaboración propia.***Caracterización del soporte y del biogás antes y después del proceso de biofiltración**

Se realizó la caracterización del soporte y del biogás antes y después del proceso de biofiltración.

Se llevaron a cabo determinaciones de las características físicas, químicas y biológicas del compost con el objetivo de evaluar su influencia en la capacidad para eliminar sulfuro de hidrógeno del biogás.

Esta fase resultó crucial, ya que permitió verificar el cumplimiento de las propiedades del soporte requeridas para promover el crecimiento de la biomasa y la eficacia de los microorganismos en el proceso de remoción.

Se consideraron los requerimientos de carbono, nutrientes (N, P, K, Ca, Mg, Na) al igual que la porosidad para evaluar la facilidad de transporte de nutrientes y energía necesarios para la actividad de los microorganismos.

La caracterización físico-química y biológica del material filtrante se llevó a cabo identificando

las siguientes propiedades críticas: porosidad, densidad, humedad, pH y carga microbiana.

Los análisis se realizaron en el Laboratorio de Análisis de Suelos y Plantas de la Universidad Nacional Agraria La Molina (LASPAF). Los métodos utilizados incluyeron: pH potenciométrico en pasta saturada, determinación de materia orgánica por calcinación, nitrógeno Kjeldahl, fósforo mediante el método de Olsen, y análisis de K, Ca, Mg y Na por absorción atómica.

Los de carácter microbiológicos se realizaron bajo recuento de unidad formadora de colonias por gramo (UFC/g), al inicio (t=0) y al final del trabajo experimental. (Tabla 2)

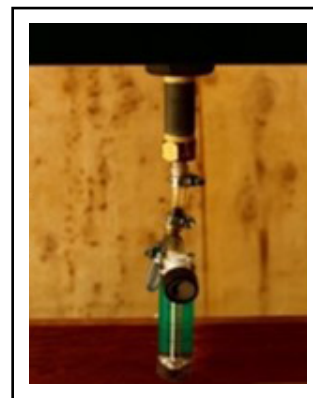
TABLA 2*Evaluación de biogás y soporte.*

Fase	Tipo de control	Técnica analítica	Frecuencia de medición
Biogás	Concentración de H ₂ S	Equipo medición de gases	Interdiario
	Caudal	Caudalímetro	Interdiario
Soporte	pH	Potenciómetro	T=0 y al finalizar el experimento
	Densidad aparente y real	Gravimetría	T=0
	Porosidad	Por relación $d_a - d_r/d_a$	T=0
	Materia orgánica	Por calcinación	T=0 y al finalizar el experimento
	Materia Inorgánica	Absorción atómica	T=0 y al finalizar el experimento
	Carga microbiológica	(UFC/g)	T=0 y al finalizar el experimento

Fuente: Elaboración propia.

La composición del biogás fue determinada utilizando el equipo MULTITEC 545 (ver Fig. 1(a)). Este dispositivo está equipado con un electrodo alargado que permite la toma de muestras del biogás por succión. La muestra es transportada al

interior del equipo, donde se mide mediante sensores electroquímicos e infrarrojos. Se empleó un flujómetro (Fig. 1(b)) para regular el flujo de ingreso del biogás al biofiltro.

FIGURA 1*Equipos para medición del biogás.**a) Multitec 545**(b) Flujómetro*

Parámetros operacionales

Los principales parámetros operacionales identificados para la evaluación fueron la Eficiencia de Remoción (RE), en porcentaje, la Capacidad de Eliminación (CE) en $\text{mgm}^{-3}\text{h}^{-1}$, determinados a partir de las fórmulas (1) y (2) declaradas por Fernández et al. (2014):

$$RE = \frac{(C_{in} - C_s)}{C_{in}} \times 100 \quad (1)$$

$$CE = \frac{(C_{in} - C_s)}{V_b} \times Q \quad (2)$$

Donde:

C_{in} = concentración inicial
 C_s = concentración de salida
 V_b = volumen del biofiltro
 Q = caudal

También se determinó la carga másica volumétrica (CMv) la cual representa la masa que entra al biofiltro por unidad de tiempo y por unidad de volumen, de acuerdo a la ecuación (3):

$$CMv = \frac{Q \times C_{in}}{V} \quad (3)$$

Donde:

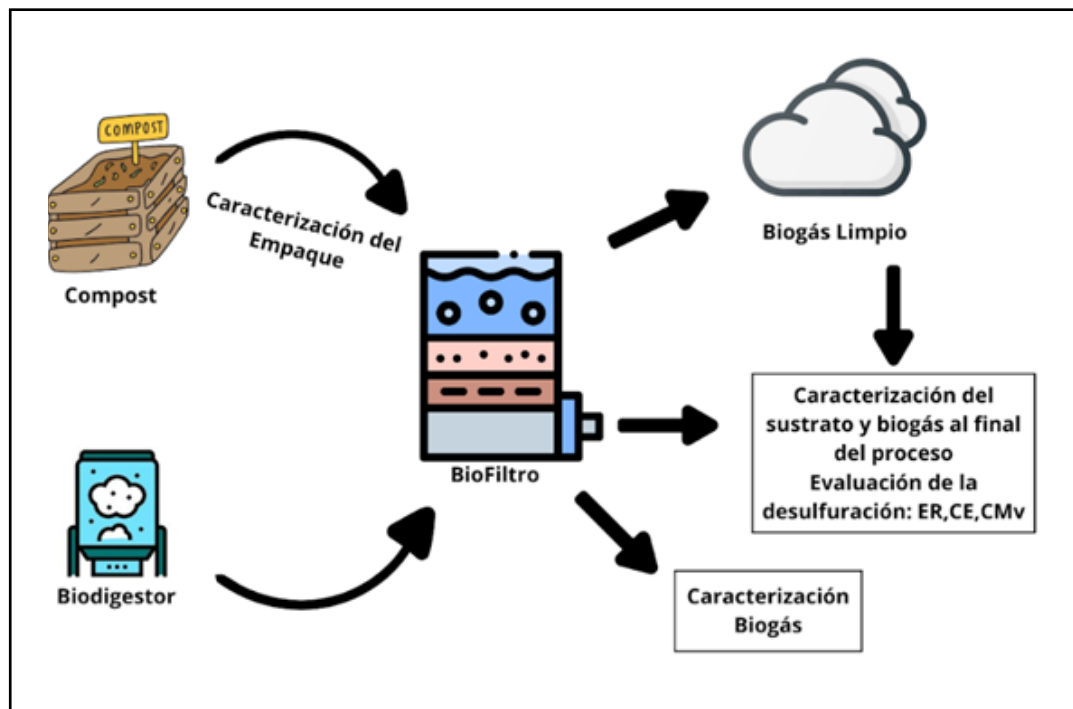
CM_v : Carga másica volumétrica ($\text{g m}^{-3}\text{h}^{-1}$).
 Q = caudal
 C_{in} : Concentración de entrada del contaminante (g m^{-3})
 V : Volumen del biofiltro (m^3)

Para la realización de la Prueba Piloto se instaló el biofiltro en la línea de obtención del biogás, desde donde y durante dos meses se realizaron las evaluaciones interdiarias. Se ajustó el flujo de ingreso del biogás al biofiltro a $0,5 \text{ L min}^{-1}$.

Cada dos días se recolectó una muestra de biogás al ingreso y salida del biofiltro (Fig. 2).

FIGURA 2

Esquema de la Prueba Piloto.



RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización del empaque

Las características de compost antes del proceso (Tabla 3), demuestran que reúne las características necesarias como medio filtrante, coincidiendo con Rybarczyk (2018) y Blanco (2019), quienes reportan como rangos recomendables de porosidad del lecho, de 40 a 80%; retención de agua entre 40 y 60% de masa; pH Neutro; presencia de nutrientes inorgánicos, contenido de materia orgánica entre 35 y 55%.

Después del proceso de biofiltración el cambio más importante es el incremento de la humedad (de 49 a 73,41 %) lo cual asociado a la disminución de porosidad (de 83 a 80 %) estaría dificultando la transmisión de nutrientes y la obtención de energía a través de los procesos de oxido-reducción.

Mudliar et al. (2010), estudiaron la estratificación del medio durante el proceso de biofiltración y encontraron que la oxidación biológica de H_2S era diferente en las capas inferiores, medias y superiores del soporte y estaba relacionada con la facilidad para el contacto con el gas residual y los nutrientes.

Uno de los problemas de la biofiltración es la acidificación debido a la formación de ácido sulfúrico en la transformación oxidativa del H_2S , en muchos casos, para contrarrestar la caída del pH y potenciar la capacidad amortiguadora de los medios es necesario agregar sustancias con propiedades alcalinas o lavar periódicamente el filtro con agua.

En la presente investigación la remoción fue llevada sin adición de sustancias, al final del proceso el pH del medio fue 7,3.

La presencia de trazas de azufre elemental (S_0) en el soporte, demuestran que a pH neutro o ligeramente alcalino aumenta la transferencia de masa de H_2S de la fase gaseosa a la líquida evitando el efecto tóxico

de la concentración elevada de H_2S , lo que repercute en un alto rendimiento de eliminación de H_2S en el sistema, como lo refieren Jianping et al. (2020).

En términos generales la amortiguación de los cambios en las propiedades del soporte se debe a que los materiales orgánicos como el compost, poseen mayores cantidades de grupos radicales (amino, carboxilo, entre otros) confiriendo buena capacidad buffer.

En cuanto a la composición microbiológica (Tabla 4) se observa una disminución general de la biomasa (mayor en bacterias), lo que se puede deber a los cambios en la estructura del biofiltro debido a la acción de la gravedad sobre la masa del soporte empleado, generándose un medio no homogéneo lo cual afecta la transferencia de masa entre las fases: gas sólido, líquido y la disponibilidad de nutrientes, sulfuro y oxígeno, necesarios para la actividad metabólica de los microorganismos.

Al final del proceso se observó la presencia de Azufre en diferentes partes del soporte y por la bibliografía consultada la oxidación de Sulfuro a Azufre elemental ocurre ante insuficiente cantidad de oxígeno y se ve favorecida por un rango de pH neutro, que es el caso del trabajo realizado.

Rabbani et al. (2016), trabajaron con un biofiltro de 10 cm de diámetro y 1.5 m de altura, soporte inorgánico inoculado con bacterias sulfooxidantes para remover sulfuro proveniente de emisiones gaseosas de aguas residuales.

Los autores alcanzaron una remoción promedio del 91.96% en sulfuro de hidrógeno a un pH ácido de 4,63-1,51 para concentraciones promedio de ingreso de H_2S al biofiltro de 31,86 ppm (0.04 g/ m^3); la oxidación biológica del H_2S produjo SO_4^{-2} en el biofiltro acumulándose en el fondo, lo que ocasionó problemas en el proceso.

TABLA 3*Caracterización Físico Química del sustrato antes y después de la desulfuración.*

Compost			
Tipo de control		Antes	Después
Humedad		49	73,41
pH		6,83	7,3
Densidad aparente		0,37	0,46
Densidad real		1,96	1,95
Porosidad (%)		83	80
Materia orgánica		35,79	37,8
Nutrientes	N	1,8	1,72
	P ₂ O ₅	1,13	1,35
	K ₂ O	0,46	0,72
	CaO	7	6,5
	Porcentaje	MgO	1,26
	Na	0,15	0,38

*Fuente: Datos experimentales.***TABLA 4***Variación en la concentración de la carga microbiana.*

Composición microbiológica	Antes	Después
Contenido (UFC/g)		
Bacterias	1,33 x 10 ⁸	4,5 x 10 ⁵
Actinomicetos	3,00 x 10 ⁶	2 x 10 ⁴
Hongos	1,67 x 10 ⁵	2,7 x 10 ⁴

*Fuente: Elaboración propia.***Caracterización del Biogás**

En la tabla 5 se presenta la composición promedio del biogás, composición en la que se destaca la alta

concentración de sulfuro de hidrógeno por provenir principalmente de estiércol porcino.

TABLA 5*Composición media del biogás.*

Componente	Valores determinados
Metano (CH ₄)	52-65%
Dióxido de carbono (CO ₂)	28-35%
Oxígeno (O ₂)	1-5%
Sulfuro de hidrógeno (H ₂ S)	650 - 4200 ppmv
Monóxido de carbono	1 - 14 ppmv

*Fuente: Datos experimentales promedio.***Evaluación de la desulfuración**

Tras la instalación del biofiltro de compost en la línea de obtención del biogás, ubicada entre el biodigestor y el tanque receptor, y después de ajustar el flujo de ingreso al biofiltro a 0.5 L/min, se procedió a iniciar la prueba piloto.

La toma de muestras y la medición del biogás, tanto en la entrada como en la salida del biofiltro, se realizó de manera interdiaria. La evaluación entre la concentración de entrada y salida (en ppmv) a lo largo del proceso se presenta en la Figura 3.

Se puede apreciar una alta capacidad de tolerancia de la carga microbiana nativa del soporte a las fluctuaciones de concentración de entrada de H₂S del biogás, las que oscilaron entre 2 700 ppmv (3 753 mg m⁻³) y 3 700 ppmv (5 143 mg m⁻³).

Cabe resaltar que el tercer día ingresaron 2 400 ppmv y salen 300 ppm, el quinto día las concentraciones de ingreso y salida son 2 600 y 51 ppmv respectivamente, iniciándose una gran capacidad degradativa del H₂S por parte de los microorganismos del compost, la que se mantiene prácticamente durante toda la etapa de la prueba piloto.

Nagendranatha, Baeb, & Min (2019) en una investigación de desulfuración empleando inóculo,

encontraron un periodo de adaptación de los microorganismos de 6 días, periodo más reducido en la presente investigación.

Transcurrido más del 90 por ciento de la prueba piloto, los resultados fueron muy favorables, aproximadamente el día 67 se observan perturbaciones del sistema, llegando a la saturación de la biodegradación el día 71 cuando la concentración de entrada y salida prácticamente se igualan y se detiene el proceso.

Al no considerarse la homogenización periódica del biofiltro, es probable que se hayan producido zonas muy saturadas de humedad lo cual podría afectar la biodegradación actuando como inhibidor del proceso.

El valor promedio de humedad al final de esta etapa fue 73,41 por ciento, ligeramente superior al recomendado (50-60 por ciento) lo cual podría haber afectado la difusión hacia la biopelícula, tanto de H₂S (fuente de energía para los microorganismos) como de nutrientes, razón por la que la biomasa disminuye, estos resultados indicarían la necesidad de realizar un proceso de homogenización del soporte en ciertas etapas del proceso.

Eficiencia de remoción y capacidad de eliminación en función a la carga másica volumétrica

La prueba piloto se diseñó para evaluar el desempeño y la sostenibilidad de la desulfuración del lecho filtrante bajo condiciones de alta carga y variabilidad temporal en las concentraciones de entrada. Los resultados demostraron un notable rendimiento del compost como lecho filtrante, ya que los microorganismos presentes en este medio natural lograron biodegradar eficazmente cargas elevadas de H₂S, que oscilaron entre 2,300 y 3,700 ppmv, durante un período de 65 días. Estos resultados superan significativamente los obtenidos en estudios anteriores que emplearon condiciones operativas similares, incluyendo diseño de biofiltro y soporte orgánico, pero sin la adición de amortiguadores o nutrientes.

Chaiprapat, Mardthing, Kantachote, & Karnchanawong (2011) evaluaron la capacidad de eliminación de H₂S en función de la carga de H₂S de entrada usando lecho lleno de turba.

Encontraron que la capacidad de eliminación de H₂S se vio comprometida por cargas de choque, especialmente cuando la carga de entrada de H₂S aumentó repentinamente de 11,7 a 60 g m³ h⁻¹. En su estudio, se reportó una capacidad máxima de eliminación de 58 g de H₂S m³ h⁻¹ en el biofiltro. En contraste, la presente investigación manejó cargas de entrada más elevadas y logró una mayor eficiencia en la remoción.

En la Figura 4, se muestra que los valores de Carga Másica Volumétrica (CMV) y Capacidad de Eliminación (CE) son consistentes a lo largo de la mayor parte del proceso, evidenciando un alto grado de degradación del H₂S. El porcentaje de remoción se mantuvo cercano al 100%, indicando una eficacia notable en la eliminación del contaminante.

Cuando la carga de entrada aumenta y la capacidad de eliminación disminuye se alcanza la capacidad máxima de eliminación, dándose inicio a la perturbación de la remoción (Almenglo et al.,2016).

FIGURA 3

Concentraciones de H₂S al ingreso y salida del biofiltro de compost.

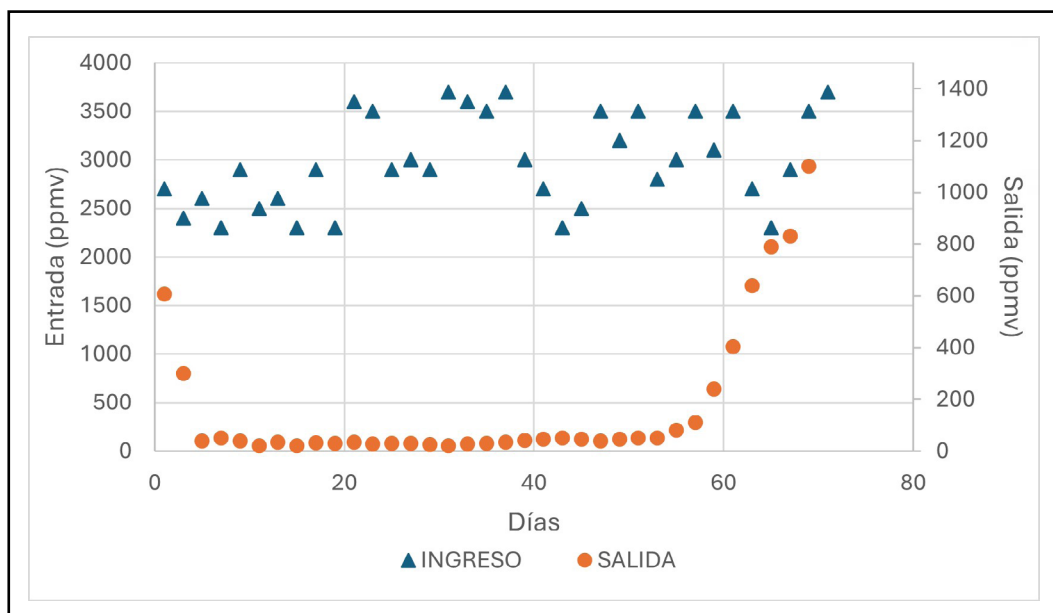
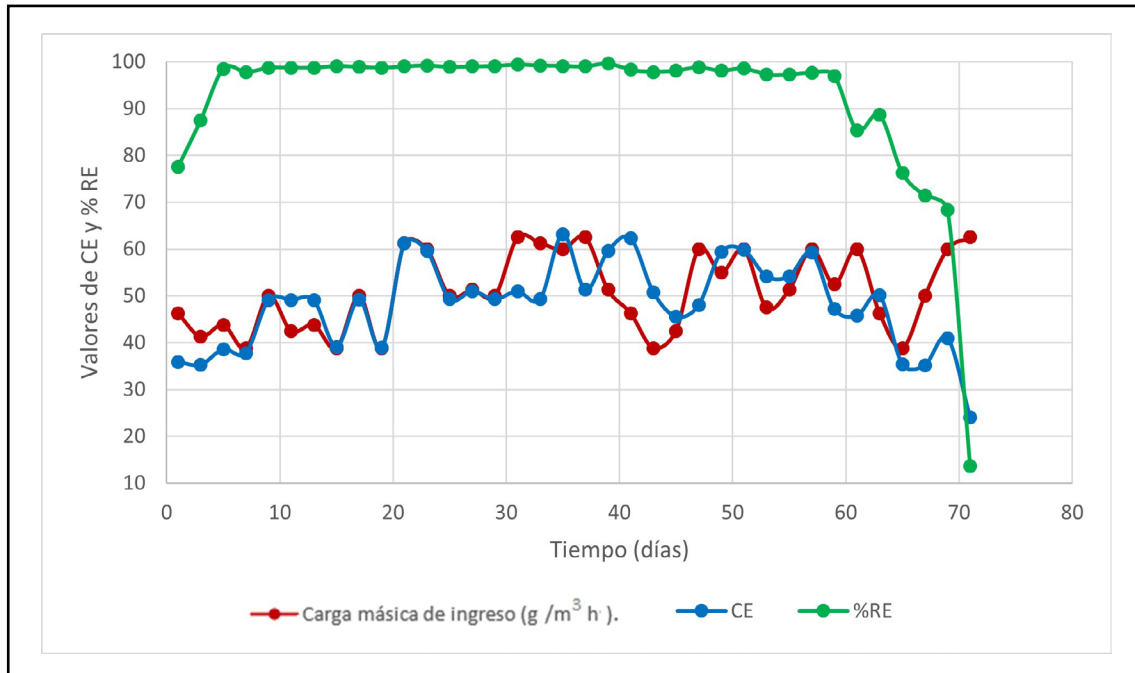


FIGURA 4

Evaluación de la sostenibilidad del biofiltro de compost, a través de la relación CMv, CE y %RE.



A partir del día 67, se observa una divergencia entre la Capacidad de Eliminación (CE) y la Carga Másica Volumétrica (CMv). Con el incremento en la carga másica, la capacidad de eliminación experimenta una disminución significativa, evidenciada por la caída abrupta en ambos parámetros el día 71. Este descenso señala el punto de saturación del proceso, donde la eficiencia de remoción del H₂S se ve comprometida.

Se hipotetiza que los factores inhibitorios surgieron debido a la estratificación del perfil del soporte, atribuida al sistema de flujo ascendente utilizado en el diseño. La formación de zonas con baja porosidad y alta humedad y densidad en la base del biofiltro comprometió la capacidad de adsorción y absorción del H₂S. Esta alteración en la transferencia interfacial generó condiciones inadecuadas para la actividad biodegradativa, resultando en una disminución de la biomasa.

La biofiltración utilizando material orgánico se presenta como una solución efectiva para

la eliminación de concentraciones elevadas y fluctuantes de sulfuro de hidrógeno (H₂S), características comunes en procesos a gran escala. La presente investigación propone adaptar la tecnología de biofiltración a las condiciones ambientales, económicas y sociales específicas del país.

CONCLUSIONES

El diseño del sistema de biofiltración, en términos de longitud y diámetro de los biofiltros, permitió alcanzar una eficiencia de remoción superior a la reportada en numerosas investigaciones previas durante la Prueba Piloto.

El biofiltro de compost, integrado en la línea de obtención de biogás y operando a un flujo de 0,5 L/min, demostró una notable capacidad de adaptación a concentraciones fluctuantes y elevadas de sulfuro, que variaron entre 2300 y 3700 ppmv.

La riqueza de biomasa presente en el compost, su composición físico química y capacidad

amortiguadora permitieron concluir el proceso sin acidificación del medio.

Los hallazgos de la investigación promueven la realización de estudios adicionales en el país sobre biofiltración utilizando soportes orgánicos como compost, que actualmente se emplea principalmente como enmienda del suelo en agricultura. A pesar de su potencial, la investigación en este campo sigue siendo incipiente, especialmente en el contexto de las políticas nacionales sobre gestión de residuos sólidos y economía circular. Es crucial llevar a cabo trabajos de caracterización de estos sustratos para expandir su aplicación y aumentar su valor, contribuyendo así al desarrollo de tecnologías sostenibles adaptadas a las condiciones locales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almenglo, F., Ramírez, M., Gómez, J., Cantero, D. (2016). Operational Conditions for Start-up and Nitrate-feeding in an Anoxic Biotrickling Filtration Process at Pilot Scale. *Chem. Eng. J.*, 285, 83–91. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.09.094>
- Almenglo, F., González-Cortés, J., Ramírez, M., & Cantero, D. (2023). Recent advances in biological technologies for anoxic biogas desulfurization. *Chemosphere*, 321, 138084. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138084>
- Blanco, M., Murillo, B., Forero, D., & Cabeza, Z.I. (2019). Evaluación y eficiencia de remoción de Sulfuro de Hidrógeno (H₂S) y Amoníaco (NH₃) a través de Biofiltración a Escala Piloto. (Tesis de pregrado inédita), Universidad Santo Tomás, Bogotá, Colombia. <http://hdl.handle.net/11634/17651>
- Buller, L., Sganzerla, W., Berni, M., Brignoli, S., & Forster-Carneiro, T. (2022). Design and techno-economic analysis of a hybrid system for energy supply in a wastewater treatment plant: A decentralized energy strategy. *Journal of Environmental Management*, 305, 114389. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114389>
- Bustamante, N. (2017). Biofiltración con un sistema de tres lechos de compost para la remoción de sulfuro de hidrógeno. *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, 4(2), 73–80. <https://doi.org/10.29166/revfig.v1i2.71>
- Cano, P., Colon, J., Ramírez, M., Lafuente, J., Gabriel, D., & Cantero, D. (2018). Life cycle assessment of different physical-chemical and biological technologies for biogas desulfurization in sewage treatment plants. *Clean. Prod.*, 181, 663–674. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.018>
- Cattaneo, C., Muñoz, R., Korshin, G., Naddeo, V., Belgiorno, V., & Zarra, T. (2023). Biological desulfurization of biogas: A comprehensive review on sulfide microbial metabolism and treatment biotechnologies. *Science of The Total Environment*, 893, 164689. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164689>
- Chaiprapat, R., Mardthing, D., Kantachote, S., & Karnchanawong, D. (2011). Removal of hydrogen sulfide by complete aerobic oxidation in acidic biofiltration. *Process Biochemistry*, 46(211), 344–352. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2010.09.007>
- Chew, K. W., Chia, S. R., Yen, H.-W., Nomanbhay, S., Ho, Y.-C., & Show, P. L. (2019). Transformation of Biomass Waste into Sustainable Organic Fertilizers. *Sustainability*, 11(8), 2266. <https://doi.org/10.3390/su11082266>
- Cox, H., Deshusses, M. (2001). Filtros biopercoladores. En: Kennes, C., Veiga, MC (eds) Biorreactores para el tratamiento de gases residuales. Contaminación ambiental, 4. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-017-0930-9_4
- de Rink, R., Klok, J. B. M., van Heeringen, G. J., Sorokin, D. Y., ter Heijne, A., Zeijlmaker, R., Mos, Y. M., de Wilde, V., Keesman, K. J., & Buisman, C. J. N. (2019). Increasing the Selectivity for Sulfur Formation in Biological Gas Desulfurization. *Environmental Science & Technology*, 53(8),

- 4519–4527. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b06749>
- Flores-Cortés, M., Pérez-Trevilla, J., De María Cuervo-López, F., Buitrón, G., & Quijano, G. (2021). H₂S oxidation coupled to nitrate reduction in a two-stage bioreactor: Targeting H₂S -rich biogas desulfurization. *Waste Management*, 120, 76–84. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.11.024>
- Huynh, H., Le Thi, V., & Tran, L. (2020). Removal of H₂S in biogas using biotrickling filter: Recent development. *Process Safety and Environmental Protection*, 144, 297 – 309. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.07.011>
- Jianping, W., Xia, J., Ziheng, J., Senlin, Y., & Jin, Z., 2020. The performance and microbial community in a slightly alkaline biotrickling filter for the removal of high concentration H₂S from biogas. *Chemosphere*, 249, 126127. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126127>
- Kennes, C., & Veiga, M. C. (2013). Biotrickling Filters. In *Air Pollution Prevention and Control*. 121 – 138. <https://doi.org/10.1002/9781118523360.ch5>
- Kotelnikov, V., Saryglar, C., & Chysyma, R. (2020). Microorganisms in Coal Desulfurization (Review). *Applied Biochemistry and Microbiology*, 56(5), 521 – 525. <https://doi.org/10.1134/S0003683820050105>
- Mora, M., Fernández-Palacios, E., Guimerá, X., Lafuente, J., Gamisans, X., & Gabriel, D., (2020). Feasibility of S-rich streams valorization through a two-step biosulfur production process. *Chemosphere* 253, 126734. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126734>.
- Mudliar, S., Giri B., Padoley, K., Satpute, D., Dixit, R., Bhatt, P., Pandey, R., Juwarkar, A., & Vaidya, A. (2010). Bioreactors for treatment of VOCs and odours – A review. *Journal of Environmental Management*, 91(2010), 1039–1054. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.01.006>
- Nagendranatha, C., Baeb, S., & Min, B. (2019). Biological removal of H₂S gas in a semi-pilot scale biotrickling filter: Optimization of various parameters for efficient removal at high loading rates and low pH conditions. *Bioresource Technology*, 285(2019), 21328. doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121328
- Pachaiappan, R., Cornejo-Ponce, L., Rajendran, R., Manavalan, K., Femilaa Rajan, V., & Awad, F. (2022). Una revisión sobre técnicas de biofiltración: avances recientes en la eliminación de compuestos orgánicos volátiles y metales pesados en el tratamiento de agua contaminada. *Bioengineered*, 13 (4), 8432 – 8477. <https://doi.org/10.1080/21655979.2022.2050538>
- Pudi, A., Rezaei, M., Signorini, V., Andersson, M.O., Baschetti, M.G., & Mansouri, S.S. (2022). Hydrogen sulfide capture and removal technologies: a comprehensive review of recent developments and emerging trends. *Sep. Purif. Technol.*, 298, 121448. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.121448>
- Rabbani, K.A., Charles, W., Kayaalp, A., Cord-Ruwisch, R., & Hoa, G. (2016). Pilot-scale biofilter for the simultaneous removal of hydrogen sulphide and ammonia at a wastewater treatment plant. *Biochemical Engineering Journal* 107, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2015.11.018>
- Rybarczyk, P., Szulczynski, B., Gebicki, J., & Hupka, J. (2018). Treatment, of malodorous air in biotrickling filters: a review. *Biochemical Engineering Journal*, 141(2019), 146-162. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2018.10.014>
- Schiavon, M., Ragazzi, M., Torretta, V., & Rada, E. C. (2016). Comparison between conventional biofilters and biotrickling filters applied to waste bio-drying in terms of atmospheric dispersion and air quality. *Environmental Technology*, 37(8), 975 – 982. <https://doi.org/10.1080/09593330.2015.1095246>
- Tang, K., Baskaran, V., & Nemati, M. (2009). Bacteria of the sulphur cycle: An overview of microbiology, biokinetics and their role in petroleum and mining industries. *Biochem*

Eng J., 44, 73-94. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2008.12.011>

Werkneh, A.A., (2022). Biogas impurities: environmental and health implications, removal technologies and future perspectives. *Heliyon*, 8(2022), e10929. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10929>