



Eficiencia de la desulfuración del biogás mediante biofiltración empleando soportes orgánicos

Efficiency of desulfurization from biogas through biofiltration using organic supports

Clara Figueroa*; Cecilia Alegría; Víctor Meza; Lawrence Quipuzco 

Universidad Nacional Agraria La Molina, Av. La Molina s/n- Lima, Perú.

RESUMEN

Se diseñaron biofiltros de flujo ascendente (volumen de empaque: 2,4 L) empleando compost, mezclas de compost-humus y compost- aserrín, para evaluar su eficiencia como filtros microbiano-orgánico del H₂S del biogás obtenido en un biodigestor tubular del Centro Modelo de Tratamiento de Residuos de la UNALM. Se investigó la influencia de las variables flujo de biogás: 0,5 y 1 L min⁻¹ y concentraciones del contaminante: 750, 2700 y 3500 ppmv, sobre el porcentaje de remoción (%RE) y la capacidad de eliminación (CE) del H₂S en cada soporte, obteniéndose CE máximas de 25,2, 90,6 y 114 g H₂S m⁻³h⁻¹ y % RE superiores al 98%. Cabe resaltar la tolerancia al ayuno y la rápida recuperación de los medios los que sin adición de inóculo, agua o nutrientes presentaron características adecuadas para actuar como soporte: pH neutro, humedad alrededor del 50%, porosidad entre 80 y 83%, densidad aparente entre 0,25 y 0,37 y materia orgánica de 35,7; 45,45 y 45,85. Los resultados obtenidos demuestran que el compost y humus, usados como mejoradores del suelo, son además eficientes medios para la remoción de H₂S del biogás mejorando su uso como energía, principalmente para las poblaciones vulnerables de los sectores agropecuario y agroindustrial.

Palabras clave: Biofiltros; remoción de H₂S; biogás; desulfuración; soporte orgánico.

ABSTRACT

Biofilters of upward flow (packing volume: 2.4 L) were designed using compost, compost-humus mixtures and compost-sawdust, to evaluate their efficiency as microbial-organic filters of the H₂S of the biogas obtained in a tubular biodigester of the Model Center of Waste Treatment of the UNALM. The influence of the biogas flow variables was investigated: 0.5 and 1 L min⁻¹ and contaminant concentrations: 750, 2700 and 3500 ppmv, on the percentage of removal (% RE) and the elimination capacity (CE) of H₂S in each support, obtaining CE maximum of 25.2; 90.6 and 114 g H₂S m⁻³h⁻¹ and % RE greater than 98%. It is worth noting the tolerance to fasting and the rapid recovery of the media which without the addition of inoculum, water or nutrients presented adequate characteristics to act as support: neutral pH, humidity around 50%, porosity between 80 and 83%, apparent density between 0.25 and 0.37 and organic matter of 35.7; 45.45 and 45.85. The results obtained show that compost and humus, used as soil improvers, are also efficient means for the removal of H₂S from biogas, improving its use as energy, mainly for the vulnerable populations of the agricultural and agroindustrial. evaluated.

Keywords: Biofilters; H₂S removal; biogas; desulfurization; organic support.

1. Introducción

La producción de biogás y su utilización tiene muchos beneficios ambientales, pone en valor los desechos orgánicos y es una valiosa fuente de energía alternativa, sin embargo, señalan Muñoz *et al.* (2015) que la gran cantidad de contaminantes que posee el biogás (CO₂, H₂S, H₂O, N₂, O₂, metil siloxanos, halocarburos) ha llevado en los últimos años a la búsqueda de

tecnologías de limpieza del biogás para la producción de biometano para ser inyectada en la red de gas natural o ser utilizada como combustible de vehículos locales ha dado como resultado procesos complejos de mejora basados en tecnologías físicas/químicas capaces de proporcionar purezas de CH₄ de 88 a 98% y remoción de H₂S, halocarbonos y metil siloxano > 99%, desafortunadamente, el alto con-

sumo de energía y productos químicos limita hoy en día la sostenibilidad ambiental y económica de las tecnologías de mejoramiento de biogás convencionales. En este contexto, las biotecnologías pueden ofrecer una alternativa económica y respetuosa con el medio ambiente pues son sistemas con muchas ventajas debido a que las bacterias y otros microorganismos que se encuentran dentro de los biofiltros y bioprocesadores no necesitan ser reemplazados, descomponen los compuestos nocivos en lugar de absorberlos como sucede por ejemplo con carbón activado el cual requiere un reemplazo constante o compuestos químicos que son costosos y comúnmente peligrosos. Uno de los componentes que dificulta el empleo del biogás es la presencia de sulfuro de hidrógeno, compuesto altamente corrosivo (Lestari et al., 2016) afirman que cuando no se remueve el H₂S, la combustión del biogás genera dióxido de azufre (SO₂), que además de ser dañino para el medio ambiente (promotor de la lluvia ácida), es tóxico para el ser humano, este compuesto, en el rango de concentración de 50 a 10 000 ppm, causa corrosión en los motores y tuberías especialmente cuando se usa como combustible para producir electricidad, de acuerdo a Brito et al. (2017) una eficiente técnica de desulfuración biológica del biogás requiere de una biomasa totalmente adaptada y desarrollada con una alta oxidación de sulfuros y buena transferencia de masa entre el gas y el líquido. Según Barbusinski et al. (2017), una ventaja importante de los métodos de tratamiento biológico sobre las tecnologías físicas y químicas es que los procesos biológicos se pueden realizar a temperaturas moderadas (10 - 40 °C) y presión atmosférica normal, además, los procesos de degradación microbiana son generalmente de naturaleza oxidativa y producen compuestos tales como dióxido de carbono, agua, sulfato y nitrato que son ecológicamente seguros, del mismo modo. Según Moreno (2008) la capacidad de mantener altas tasas de degradación y desempeño depende en gran medida del origen y naturaleza del soporte, de sus propiedades intrínsecas, de los consorcios microbianos presentes en los medios, señala además que los soportes deben reunir ciertas características como: a) Porosidad homogénea del lecho, entre el 40 y el 80%, b) pH Neutro, c) contenido de materia orgánica, entre el 35 y 55%, d) presencia de nutrientes inorgánicos como N, P, K y S y e) Alta concentración de microorganismos. Acosta et al.

(2009) empleando soportes orgánicos como lecho filtrante determinaron una remoción de 81 a 97% con compost y de 52,9 a 79,8% con lombricompost; para concentraciones de ingreso del sulfuro de hidrógeno en el biogás de 270 µLL⁻¹. Chávez et al. (2004) usando como soporte bagazo de caña de azúcar y piedra pómez, estudiaron el efecto de la variación de la concentración de H₂S en el gas influente, en el rango de 100 y 1800 ppmv de H₂S, sobre la eficiencia de remoción observando eficiencias mayores al 99% para todas las concentraciones. Ramírez (2007) en un estudio de eliminación conjunta NH₃, H₂S empleando dos biofiltros de escurrimiento empaquetados con espuma de poliuretano y como microorganismos una bacteria azufre oxidante (*Thiobacillus thio-parus*), logró porcentajes de eliminación de H₂S del 99% para un efluente con concentraciones de hasta 129 ppmv de H₂S y una capacidad de eliminación máxima de 43,9 g S m⁻³h⁻¹ para una carga de alimentación de 55,0 g S m⁻³h⁻¹. Investigaciones como la realizada por Mehdinia et al. (2013) señalan que los esfuerzos de la investigación en biofiltración, basada fundamentalmente en la capacidad de los microorganismos para transformar contaminantes orgánicos e inorgánicos en compuestos menos tóxicos e inodoros a través de dos mecanismos: absorción/adsorción y biooxidación, deben centrarse en evaluar las formas de mejorar el rendimiento de los biofiltros considerando que los medios orgánicos como el compost, son sistemas vivos de control de la contaminación y están sujetos a cambios dinámicos, por lo que señalan tres factores generales importantes que determinan el desempeño del biofiltro: (1) la calidad de los medios de filtro, la porosidad, el tamaño de las partículas, el contenido de humedad, la diversidad microbiana y los nutrientes), (2) las condiciones predominantes del flujo de gas dentro de la unidad de biofiltración, incluyendo velocidad superficial y distribución de gas (3) la solubilidad del sustrato, la degradabilidad y la velocidad de carga aplicada. Fernández et al. (2014) estudian la biofiltración en condiciones anóxicas y señalan que una de las ventajas de la biofiltración en estas condiciones es que el biogás no es diluido con aire, por lo que no se reduce la concentración de metano, CH₄. Jaber et al. (2014) examinaron la remoción de compuestos olorosos de azufre en una mezcla de, sulfuro de hidrógeno (H₂S), disulfuro de dimetilo (DMDS) y etanotiol (EtSH), mediante

biofiltración, la investigación se centró en el impacto del suministro de nutrientes, sin olvidar el efecto de otros parámetros, como el pH, en los rendimientos del proceso. Se compararon las eficiencias de eliminación de tres biofiltros empacados con corteza de pino y astillas de madera compostada y rociados con diferentes soluciones nutritivas, observándose que debido a la biodegradabilidad del H₂S, su eliminación no se vio afectada por la falta de nutrientes en el biofiltro, se encontró disminución de pH causada por la acumulación de ácido sulfúrico en el material de empaque, sin embargo, no afectó de manera significativa la remoción del H₂S. Zhou *et al.* (2015) emplearon un sistema de biofiltración microaeróbico lleno de polipropileno para evaluar la eliminación de altas concentraciones de H₂S contenidas en el biogás de un digestor anaeróbico, los resultados mostraron que el H₂S en el biogás se eliminó completamente bajo diferentes concentraciones de entrada de H₂S de 2065 +/- 234 a 7818 +/- 131 ppmv, y la capacidad de eliminación de H₂S en el filtro alcanzó aproximadamente 122 g de H₂S m⁻³ h⁻¹, por otro lado, el contenido de CH₄ en el biogás aumentó después del proceso de biodesulfuración del biogás, se observó presencia de azufre elemental y sulfato, siendo el azufre elemental dominante (alrededor del 80%) en concentraciones altas de H₂S en la entrada. Los resultados mostraron que la población de especies de bacterias oxidantes de sulfuro en el filtro cambió con diferentes concentraciones de H₂S. El sistema de biofiltración microaeróbico permite el uso potencial de biogás y la recuperación de azufre elemental simultáneamente. Vikromvarasiri *et al.* (2017) emplearon un biofiltro inoculando una bacteria oxidante de azufre, aislada y purificada a partir de lodos activados para degradar el H₂S y el tiosulfato a azufre y sulfato, respectivamente, los parámetros operativos fueron :caudal de gas (0,5 – 0,75 L min⁻¹); EBRT (40 – 120 s), concentraciones de H₂S de entrada (0 – 2040 ppmv); velocidad de recirculación del líquido (3,6 – 4,8 L h⁻¹); el tiempo de retención (EBRT) mostró un efecto mayor en la eficiencia de eliminación que el aumento de la concentración de H₂S, un EBRT más largo resultó en una mayor eficiencia de remoción, la capacidad de eliminación máxima fue 78,57 g H₂S m⁻³h⁻¹. Aita *et al.* (2016) investigaron el rendimiento de un biofiltro a escala piloto para la eliminación del H₂S

presente en un biogás sintético. El inóculo utilizado en el experimento estaba compuesto por *Acidithiobacillus thiooxidans* fijado en un embalaje de astillas de madera, el biogás sintético tenía una composición de 60% de CH₄, 39% de CO₂ y 1% de H₂S, el biofiltro funcionó de manera continua durante 37 días con una eficiencia promedio de remoción de H₂S de 75 ± 13% y un máximo de 97%, la capacidad de eliminación del sistema alcanzó un promedio de 130 ± 23 g m⁻³h⁻¹ y un máximo de 169 g m⁻³h⁻¹. Omri *et al.* (2013) empleando un sistema de biofiltración conteniendo turba como material filtrante, investigaron los efectos de la carga de ingreso de H₂S sobre el rendimiento del biofiltro y la capacidad de eliminación, así también sobre la diversidad y dinámica bacteriana, se monitorearon los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, incluyendo contenido de humedad, pH, oxígeno químico, demanda (DQO), concentración de sulfato y formación de colonias. Los resultados indican que para concentraciones de entrada de H₂S, de 200 a 600 mg.m³ se obtuvieron concentraciones de salida de 5 mg.m³ (5 ppm) y mayores eficiencias de remoción (99%), ésta se redujo hasta 89% cuando las concentraciones de H₂S de entrada variaron de 600 a 1300 mg.m³, la máxima capacidad de eliminación fue de 58 g H₂S m³h⁻¹, la exposición a altas concentraciones de H₂S podría causar toxicidad para la comunidad microbiana de la turba provocando la disminución de la eficiencia de remoción, Chaipaprat *et al.* (2015) trabajaron con biofiltros de tres etapas y de una etapa con recirculación de líquidos oxigenados para mejorar la biodesulfuración del biogás, encontraron que el filtro de tres etapas (T-BTF) fue superior al filtro de una sola etapa (S-BTF), el coeficiente de tasa de remoción de T-BTF de primer orden fue 47% más alto que el de S-BTF, la eliminación de H₂S aumentó con el tiempo de retención (EBRT 100 – 180 s) y se apreció un incremento de ácido sulfúrico al aumentar el tiempo de retención, cuando la carga fue más baja: 165 g H₂S m⁻³h⁻¹, se obtuvo un rendimiento equivalente en los filtros de tres etapas y de una sola etapa y en la prueba de operación continua posterior, se encontró que el T-BTF podía mantener una mayor capacidad de eliminación de H₂S y una mayor eficiencia de remoción a 175,6 ± 41,6 g H₂S m⁻³h⁻¹ versus S-BTF a 159,9 ± 42,8 g H₂S m⁻³h⁻¹. Si bien es cierto la tecnología de biofiltración lleva

algunos años siendo evaluada, en últimas investigaciones se profundizan esfuerzos para mejorar su eficiencia y hacer viable económica y ambientalmente la producción de biogás. En el Perú los trabajos de investigación de las bondades de esta biotecnología recién se inician, aún es necesario demostrar su enorme potencial para un mayor desarrollo y explotación de los recursos disponibles en nuestra región, por lo tanto, el propósito del presente trabajo es evaluar la adaptación de la tecnología a las condiciones locales, logrando la optimización del proceso de biofiltración y la capacidad de mantener altas tasas de degradación del sistema lo cual depende en gran medida del origen y naturaleza del tipo de soporte orgánico, por lo cual el objetivo central de la presente investigación ha sido evaluar la eficiencia de tecnología de biofiltración para remover H_2S del biogás obtenido en el CEMTRAR, empleando como soporte el compost y mezclas de compost-humus y compost-aserrín, caracterizar estos medios y determinar su influencia en la eficiencia de remoción (%RE) y la capacidad de eliminación (CE) bajo condiciones determinadas de flujo del biogás, concentración del contaminante y características del diseño del biofiltro ya que aunque esta tecnología es aparentemente simple, su efectividad se basa en la optimización de variables en los sistemas operativos.

2. Material y métodos

El trabajo experimental se desarrolló en el laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ciencias de la UNALM y comprendió dos etapas (Figura 1).

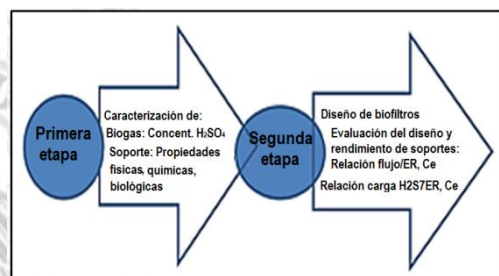


Figura 1. Diseño del trabajo experimental.

2.1 Primera etapa

Como se detalla en la Tabla 1, a cada soporte: compost (S1), compost-humus (S2) y compost-aserrín (S3), mezclas en proporción 75/25, se determinó el pH, C.E, M.O, N, P_2O_5 , K_2O , CaO, MgO, Hd, Na, densidad y composición micro-

biológica los que fueron realizados en el Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Agua y Fertilizantes de la UNALM (LASPAF) especializado además en análisis de compost y humus.

2.2 Segunda etapa

Se diseñó el sistema experimental (Figura 2) conformado por tres columnas de biofiltración de flujo ascendente fabricadas con PVC de 8 cm de diámetro interior y 60 cm de altura, las que estaban cerradas en la parte superior con una tapa hermética, el volumen de lecho filtrante fue 2,4 L. Se realizaron pruebas de funcionamiento del sistema durante 30 días, las muestras de biogás fueron tomadas del biodigestor tubular del CEMTRAR.

Tabla 1

Caracterización de los materiales

Fase	Tipo de control	Técnica analítica	Frecuencia de medición
Biogás	Temperatura		
	Concentración de H_2S	Equipo de medición de gases	Interdiario
	Caudal	Caudalímetro	Una vez por día
Soporte	pH	Potenciómetro	T=0 y al finalizar el experimento
	Densidad aparente y real	Gravimetría	T=0
	Porosidad	Por relación $da - dr/da$	T=0
	Granulometría	Perfil granulométrico	T=0
	Materia orgánica		T=0 y al finalizar el experimento
	Materia inorgánica		
Carga microbiológica			

Para evaluar las variables concentración de sulfuro y flujo de biogás se emplearon el equipo MULTITEC 545, previamente estandarizado y un flujómetro, el equipo de medición de gases cuenta con un electrodo alargado el cual succiona el biogás y lo transporta hacia el interior del aparato, dentro del cual se encuentran los sensores electroquímicos e infrarrojos (Figura 3).

Con los datos obtenidos en las diferentes etapas del proceso se determinó la eficiencia de remoción (%RE) y la capacidad de eliminación (CE) a partir de las fórmulas:

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

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

Donde: C_{in} : concentración inicial (mgm^{-3});
 C_s : concentración de salida (mgm^{-3});
 V_b : volumen de biofiltro; Q : caudal, según [Fernández et al. \(2014\)](#).

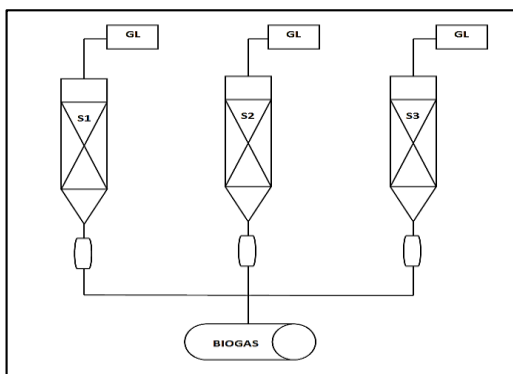


Figura 2. Sistema experimental de biofiltración: S1: compost, S2: compost-humus, S3: compost-aserrín

La capacidad de eliminación (CE) se define como la cantidad de contaminante degradado por unidad de tiempo, normalizado al volumen de la cama empacada.



Figura 3. Equipos para medición del Biogás: Multitec y flujómetro.

El monitoreo del sistema se realizó durante tres periodos, determinados así por las concentraciones de ingreso de H_2S , 750 ppmv (periodo 1: del día 1 al 9), 2700 ppmv (periodo 2: del día 12 al 20) y 3 500 ppmv, (periodo 3: del día 22 al 30) dentro de cada uno de los cuales se tomaron datos interdiarios considerando 2 flujos de biogás en cada caso: Flujo 1: $0,5 \text{ L min}^{-1}$ y Flujo 2: 1 L min^{-1} .

3. Resultados y discusión

3.1 Caracterización del soporte

Por los resultados reportados en la [Tabla 2](#), respecto al pH, neutro de los tres medios (6,83 a 6,95), la densidad aparente y la densidad

absoluta con valores de 0,25 a 0,37 y de 1,76 a 1,98 respectivamente, la porosidad entre 80 y 86%, contenido de materia orgánica entre 35,79 y 45,82%, se comprueba que los tres medios cumplen con los factores críticos para su buen desempeño como biofiltros, como lo señala [Moreno \(2008\)](#), pH neutro, porosidad homogénea del lecho, entre el 40 y el 80%, contenido de materia orgánica, entre el 35 y 55%, características adecuadas para el mantenimiento y desarrollo de los microorganismos.

Tabla 2

Caracterización de los soportes orgánicos

Tipo de control	C(S1)	C+H (S2)	C+A (S3)
pH	6,83	6,85	6,95
Densidad aparente	0,37	0,36	0,25
Densidad real	1,96	1,98	1,76
Porosidad (%)	83	80	86
Humedad	49,00	55,35	48,00
Materia orgánica	35,79	45,45	45,82
Relación C/N	11,28	10,72	18,84

Tabla 3

Composición inorgánica y microbiológica

Tipo de control	...	C(S1)	C+H (S2)	C+A (S3)
Nutrientes (%)	N	1,8	2,1	1,9
	P_2O_5	1,13	1,48	1,58
	K_2O	0,46	0,45	0,47
	CaO	7,00	7,25	7,37
	MgO	1,26	1,06	1,13
	Na	0,15	0,16	0,16
Composición microbiológica (UFC/g)	B	$1,33 \times 10^8$	$5,33 \times 10^7$	$1,13 \times 10^8$
	A	$3,00 \times 10^6$	$2,30 \times 10^6$	$2,80 \times 10^6$
	H	$1,67 \times 10^5$	$1,83 \times 10^5$	$1,67 \times 10^5$

B: bacterias; A: actinomicetos y H: hongos.

En la [Tabla 3](#) se observa la composición de los medios en cuanto a nutrientes inorgánicos y composición microbiológica, se aprecia que los tres aportan P, K, Ca, Mg, Na, la carga microbiana (bacterias) presenta valores de UFC/g de $5,33 \times 10^7$, $1,13 \times 10^8$ y $1,13 \times 10^8$, para los soportes S1, S2 y S3, respectivamente, valores semejantes a los reportados por [Omri et al. \(2013\)](#). Los resultados del perfil granulométrico determinan que el mayor porcentaje de tamaño de partícula se distribuye entre 0,425 mm y 9,525 mm representando el 66% de las partículas, este resultado demuestra que los soportes están constituidos principalmente por una fracción equivalente a las partículas de arena lo que favorece la distribución del gas a lo largo

de la columna de biofiltración presentando una buena área superficial de contacto con la fase gaseosa, necesaria para favorecer la actividad microbiana, por lo tanto se puede afirmar que los tres medios proveen un ambiente adecuado para favorecer el metabolismo de los microorganismos los que son responsables de las transformaciones químicas. Involucradas en la remoción de sulfuro de hidrógeno, adicionalmente, se observó como un hecho favorable al proceso de biofiltración que no se presentaron problemas de apelmazamiento como se anota en investigaciones semejantes.

3.2 Caracterización del biogás

En la [Tabla 4](#) se observa que la composición media del biogás determinada con el equipo MULTITEC 545, sobre el contenido de CH₄, estaba entre 52 y 65 por ciento, contenido que no fue afectado por ninguno de los soportes, lo cual es de suma importancia pues lo que se busca con el biofiltro es mejorar la calidad del biogás, conservando la concentración del metano. Para regular el flujo en el biofiltro se empleó un flujómetro colocado antes del ingreso al biofiltro. El tiempo de retención del biogás fue aproximadamente 3 minutos, el biogás procedía de la conversión del estiércol de porcino.

Tabla 4

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

3.3. Diseño y construcción de biofiltros

En la [Tabla 5](#) se detallan las características del biofiltro.

Tabla 5

Características de diseño del biofiltro

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

3.4 Operatividad del Sistema de Biofiltración y comparación de los resultados obtenidos en los tres biofiltros

Los ensayos tuvieron una duración de 30 días, las tres columnas fueron alimentadas en cada periodo con la misma fuente de biogás y bajo

las mismas condiciones ambientales, desarrollándose esta parte de la investigación en tres periodos, definidos por la concentración de ingreso de H₂S y dos flujos de ingreso del biogás como se detalla en la parte metodológica, los resultados reportados en la [tabla 6](#) muestran que la salida de H₂S en los tres soportes y a lo largo de la investigación no supera los 8 ppmv en los tres periodos. La adaptación de los tres biofiltros fue de 24 horas lo que permite inferir que la carga microbiana natural presente en los soportes tiene un enorme potencial degradativo de sulfuro de hidrógeno, se puede inferir que la biomasa presente de manera natural en los medios presenta una rápida adaptación, capacidad de oxidación de sulfuros y buena transferencia de masa entre el gas y el líquido. Es importante señalar que en trabajos semejantes se reportan tiempos de adaptación no menores a 10 días y más aún requieren de adición de microorganismos arrancadores.

Tabla 6

Promedio de remoción de H₂S

Ci (ppmv)	T (d)	Cs (ppmv)					
		S1		S2		S3	
		F1	F2	F1	F2	F1	F2
Periodo 1 750	1	2	3	3	3	5	2
	3	1	2	3	2	5	2
	5	1	1	2	2	3	1
	7	0	1	0	1	3	1
	9	0	0	2	0	1	1
Periodo 2 2700	12	3	4	4	4	7	3
	14	3	2	4	3	6	4
	16	2	2	3	4	4	3
	18	1	1	2	2	4	4
	20	1	1	1	1	3	2
Periodo 3 3500	22	4	4	6	5	7	6
	24	2	3	4	4	7	8
	26	2	4	2	5	5	6
	28	3	2	2	4	4	4
	30	2	2	2	2	4	4

C_{in}: concentración de ingreso

C_s: concentración de salida

F1: flujo 0,5L min⁻¹, hora de monitoreo: 10 am

F2: flujo 1L min⁻¹, hora de monitoreo: 2 pm

F1: flujo 0,5L min⁻¹, hora de monitoreo: 10 am

F2: flujo 1L min⁻¹, hora de monitoreo: 2 pm

En el periodo 1 ([figuras 5 y 6](#)) para una concentración de ingreso de sulfuro de 750 ppmv y trabajando a flujos de biogás de 0,5L min⁻¹ y 1L min⁻¹ tanto en el soporte de compost como el de compost-humus se logra el mayor consumo de H₂S, sin embargo las diferencias de remoción de los tres medios no son significativas, además se aprecia un incremento de la remoción de sulfuro con el paso de los días debido a la adaptación de los microorganismos al consumo del sulfuro, alcanzándose valores

de salida de H₂S del biofiltro entre 0 y 5 ppmv. El incremento del flujo no cambia el resultado de remoción lo cual es muy importante pues permitirá continuar investigando a nivel piloto en el Centro Modelo de Tratamiento de Residuos de la UNALM.

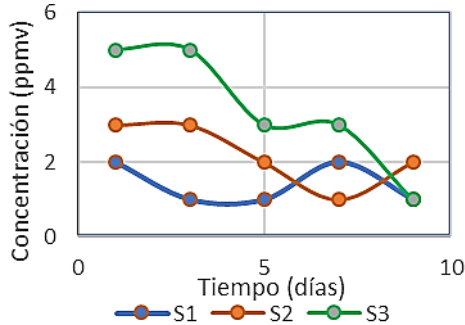


Figura 5. Periodo 1: salida de H₂S en cada soporte frente a un flujo de 0,5 L min⁻¹ y una concentración de ingreso de 750 ppmv.

En las figuras 7 y 8, correspondientes al segundo periodo, muestran que los tres filtros mantienen su eficiencia de remoción, llegando al término del periodo a concentraciones de salida entre 1 y 7 ppmv de H₂S. Se aprecia igualmente ligeras ventajas de remoción en los soportes de compost y compost-humus.

En el periodo 3 (figura 9 y 10) para una concentración elevada de ingreso muy alta (3 500 ppmv) se observa que la concentración de salida de H₂S no supera los 8 ppmv, demostrando que los microorganismos presentes en los tres medios tienen una capacidad intrínseca de adaptación a diferentes cargas de H₂S(g), el cual es utilizado como fuente de energía en la síntesis de las sustancias necesarias para sus funciones vitales, por otro lado, no existe diferencia importante en el comportamiento de remoción de los tres soportes.

A partir de las concentraciones del sulfuro, de ingreso y salida y aplicando las ecuaciones 1 y 2 descritas en el capítulo de metodología, se obtienen porcentajes de remoción (%RE) cuyos resultados muestran que los tres soportes presentan valores muy cercanos al 100 por ciento para rangos de concentración de ingreso de H₂S de 750 ppmv (1,043 gm⁻³) a 3500 ppmv (4,9 gm⁻³), concentraciones elevadas, comparadas con los reportados por Acosta et al. (2009) quienes trabajando con concentraciones de ingreso de 270 µLL⁻¹ (3,7x10⁻⁷ gm⁻³) logran remociones de 81 a 97% con compost y de 52,9 a 79,8% con lombricompost; en el caso de Omri et al. (2013) quienes obtienen porcentajes de remoción de 99% para concentraciones de

ingreso entre 147 ppmv (0,2 gm⁻³) y 956 ppmv (1,3 gm⁻³).

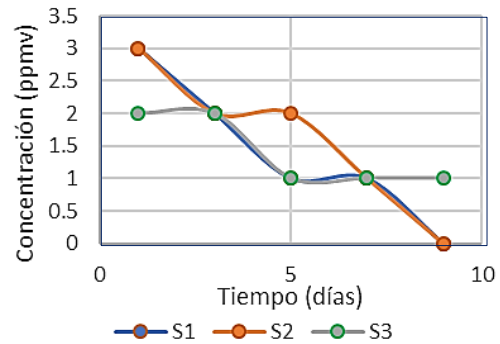


Figura 6. Periodo 1: salida de H₂S en cada soporte frente a un flujo de 1 L min⁻¹ y una concentración de ingreso de 750 ppmv.

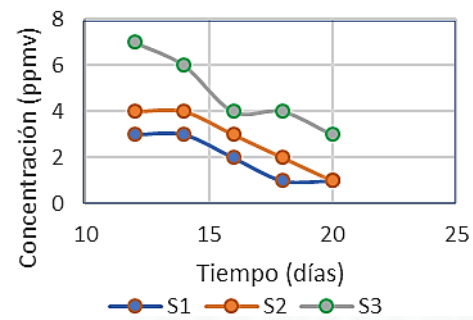


Figura 7. Periodo 2: salida de H₂S en cada soporte frente a un flujo de 0,5 L min⁻¹ y una concentración de ingreso de 2700 ppmv.

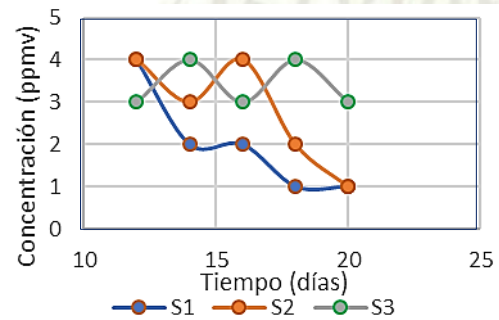


Figura 8. Periodo 2: salida de H₂S en cada soporte frente a un flujo de 1 L min⁻¹ y una concentración de ingreso de 2700 ppmv.

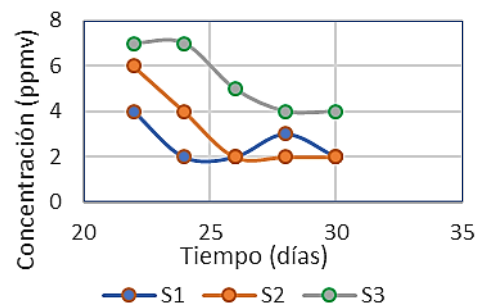


Figura 9. Periodo 3: salida de H₂S en cada soporte frente a un flujo de 0,5 L min⁻¹ y una concentración de ingreso de 3 500 ppmv.

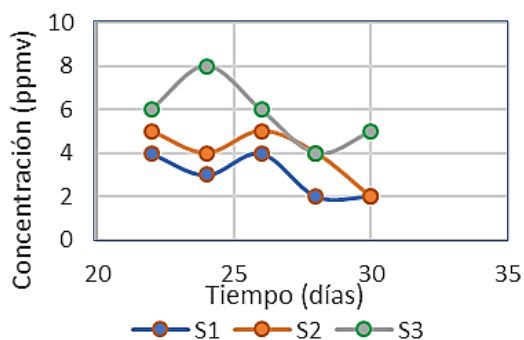


Figura 10. Periodo 3: salida de H₂S en cada soporte frente a un flujo de 1 L min⁻¹ y una concentración de ingreso de 3 500 ppmv.

Por los resultados de capacidad de eliminación (CE) para cada periodo considerando las condiciones de diseño, las concentraciones de ingreso de H₂S que van de 1020 a 4760 mgm⁻³ y los flujos de biogás de 0,5L min⁻¹ y 1L min⁻¹, se observa que los biofiltros presentan muy buena capacidad de eliminación de sulfuro de hidrógeno por volumen de biofiltro llegando a valores de 114g H₂S m⁻³h⁻¹, superiores a los reportados en investigaciones semejantes como la realizada por *Lebrero et al.* (2016) quienes reportan una CE máxima de 26g S-H₂S m⁻³h⁻¹, o los resultados obtenidos por *Vikromvarasiri et al.* (2017) los que trabajando con variables semejantes a las de la presente investigación, concentraciones de ingreso en rangos de 0 - 2040 ppmv y flujos de gas de 3,6 - 4,8 Lh⁻¹ logran una CE de 78,57 g H₂S m⁻³ h⁻¹.

4. Conclusiones

La modificación química de la superficie aplicados a las fibras de ST (mercerización / silanización), modificaron sus características físicas y químicas superficiales:

- ✓ Disminuyendo sus secciones longitudinales (diámetros),
- ✓ Disminuyendo su capacidad de hinchamiento en agua
- ✓ Incrementando rugosidad superficial
- ✓ Disminuyendo carácter hidrofílico inicial
- ✓ Disminuyendo contenidos de lignina y hemicelulosa, incrementando en promedio la celulosa.

La modificación química de la superficie aplicados a las fibras de ST (mercerización / silanización), modificaron los atributos mecánicos en los compuestos obtenidos en matriz poliéster:

- ✓ El incremento de los porcentajes en peso

de fibras fue directamente proporcional a la resistencia al impacto y a la resistencia a la tracción, en todos los niveles evaluados en la presente investigación.

- ✓ El valor máximo de resistencia al impacto obtenido fue de 68 kJ/m² (30% en peso de fibras, mercerizado (20% p/v) – silanizado (2% v/v), fibra continua).
- ✓ El valor máximo de resistencia a la tracción fue de 121 MPa (30% en peso de fibras, mercerizado (20% p/v) – silanizado (2% v/v), fibra continua).

Agradecimientos

Al Laboratorio de Materiales Compuestos de la Escuela de Ingeniería de Materiales de la Universidad Nacional de Trujillo.

Orcid

L. Quipuzco  <https://orcid.org/0000-0002-7282-0409>

Referencias bibliográficas

- Acosta, M.; Revelo, O.; Ruiz, O.; Botero. 2009. Capacidad de Filtración y Retención Del Sulfuro de Hidrógeno (H₂S) Del Biogás, En Dos Diferentes Sustratos Orgánicos (Em-Compost y Lombricompost). *Tierra Tropical* 5(1): 109–13.
- Aita, B.; Mayer, F.; Muratt, D. 2016. Biofiltration of H₂S-rich biogas using *Acidithiobacillus thiooxidans*. *Clean Technologies and Environmental Policy* 18(3): 689-703.
- Barbusinski, K.; Kalembe, K.; Kasperczyk, D. 2017. Biological methods for odor treatment. *Journal of cleaner production* 152: 223-241.
- Brito, J.; Almenglo, F.; Ramírez, M.; Gómez, J.; Cantero, D. 2017. PID Control System for Biogas Desulfurization under Anoxic Conditions. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* 92(9): 2369–75.
- Chaiprapat, S.; Charnok, B.; Kantachote, D. 2015. Bio-desulfurization of biogas using acidic biotrickling filter with dissolved oxygen in step feed recirculation. *Bioresource Technology* 179: 429-435.
- Chávez, C.; Mora, J.; Cabra, A.; Carmona, S.; Revah, S.; Gneco, G. 2004. Biofiltración de Ácido Sulfhídrico (H₂S), Utilizando Bagazo de Caña de Azúcar y Piedra Pómez Como Material de Soporte. *Ingeniería y Competitividad* 5(2): 7–15.
- Fernández, M.; Ramírez, M.; Gómez, J.; Cantero, D. 2014. Biogas Biodesulfurization in an Anoxic Biotrickling Filter Packed with Open-Pore Polyurethane Foam. *Journal of Hazardous Materials* 264: 529–535.
- Jaber, M.; Anet, B.; Amrane, A. 2014. Impact of nutrients supply and pH changes on the elimination of hydrogen sulfide, dimethyl disulfide and ethanethiol by biofiltration. *Chemical Engineering Journal* 258: 420-426.
- Lebrero, R.; Toledo-Cervantes, A.; Muñoz, R.; del Nery, V.; Foresti, E. 2016. Biogas upgrading from vinasse digesters: a comparison between an anoxic biotrickling filter and an algal-bacterial photobioreactor. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology* 91(9): 2488-2495.
- Lestari, A.; Sediawan, W.; Syamsiah, S. 2016. Hydrogen Sulfide Removal from Biogas Using a Salak Fruit Seeds Packed Bed Reactor with Sulfur Oxidizing Bacteria as Biofilm. *Biochemical Pharmacology* 4(2): 2370–2377.
- Mehdinia, S.; Puziah, A.; Taghipour, H. 2013. Removal of Hydrogen Sulfide by Physico-Biological Filter Using Mixed Rice Husk Silica and Dried Activated Sludge. *Clean Soil Air Water* 41(10): 949–954.

- Moreno, A. 2008. Efecto de la carga másica y altura del medio filtrante sobre la remoción de H₂S mediante biofiltración. Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Muñoz, R.; Meier, L.; Diaz, I. 2015. A review on the state-of-the-art of physical/chemical and biological technologies for biogas upgrading. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology* 14(4): 727-759.
- Nery, V.; Foresti, E. 2016. Biogas Upgrading from Vinasse Digesters: A Comparison between an Anoxic Biotrickling Filter and an Algal-Bacterial Photobioreactor. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology* 91(9): 2488-95.
- Omri, I.; Aouidi, F.; Bouallagui, H.; Godon, J.; Hamdi, M. 2013. Performance study of biofilter developed to treat H₂S from wastewater odour. *Saudi Journal of Biological Sciences* 20: 169-176.
- Vikromvarasiri, N.; Champreda, V.; Boonyawanich, S. 2017. Hydrogen sulfide removal from biogas by biotrickling filter inoculated with *Halothiobacillus neapolitanus*. *International Journal of Hydrogen Energy* 42(29):18425-18433.
- Zhou, Q.; Liang, H.; Yang, S. 2015. The Removal of Hydrogen Sulfide from Biogas in a Microaerobic Biotrickling Filter Using Polypropylene Carrier as Packing Material. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 175(8): 3763-3777.

