

Universidad Católica de Santa María

Facultad De Ciencias Farmacéuticas, Bioquímicas Y
Biotecnológicas

Escuela Profesional De Ingeniería Biotecnológica



“PURIFICACIÓN DE METANO POR BIOFILTRACIÓN DE BIOGÁS,
UTILIZANDO COMPOST COMO MATERIA SOPORTE”

Tesis presentada por el Bachiller:

Macedo Benavente, Ever Pavel

para optar el Título Profesional de

Ingeniero Biotecnólogo

Asesor:

Dr. Roque Rodriguez, Francisco Javier

Arequipa- Perú

2019

UNIVERSIDAD CATOLICA SANTA MARIA
Facultad de Ciencias Farmacéuticas, Bioquímicas
y Biotecnológicas
Programa Profesional de Ingeniería Biotecnológica

Expediente N°. 14029232

N° Trámite en Fac. 216-2014

Fecha Recep. Fac. 10-07-2014

FORMATO UNICO PARA TRAMITACIÓN DE TÍTULO PROFESIONAL

DE: **MACEDO BENAVENTE, Ever Pavel**

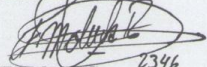
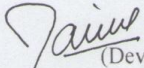
PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE **INGENIERO BIOTECNOLOGO**

"PURIFICACION DE METANO A PARTIR DE BIOGAS PRODUCTO DE DIGESTION ANAEROBIA POR BIOFILTRACION CON EL USO DE COMPOST COMO MATERIAL SOPORTE"

DICTAMINADORES: 1) *Mgter. Fredy Molina Rodríguez* 2) *Ing. Jaime Barreda del Carpio*

DICTAMEN DE PLAN: Señor Decano de la Facultad de Ciencias Farmacéuticas, Bioquímicas y Biotecnológicas, en atención a su designación, el Jurado Dictaminador del Plan de Tesis informa que, hechas las observaciones y subsanadas las correcciones, sugerimos que el título debe cambiar a: **"PURIFICACION DE METANO POR BIOFILTRACION DE BIOGAS, UTILIZANDO COMPOST COMO MATERIA SOPORTE"**, después de lo cual consideramos se encuentra APTO para continuar con el trámite de acuerdo al Reglamento de Grados y Títulos de la Facultad.

Atentamente

FIRMAS:  2346  (Devolver antes de 8 días hábiles) FECHA

ASESOR: *Mgter. Francisco Roque Rodríguez*

DICTAMEN ASESORÍA: Señor Decano de la Facultad de Ciencias Farmacéuticas, Bioquímicas y Biotecnológicas, en atención a su designación como asesor del trabajo de investigación presentado por la recurrente, tengo a bien informar que se ha verificado el cumplimiento de los objetivos y redacción del informe con los resultados, discusión y conclusiones correspondientes por lo cual considero que se encuentra APTO para continuar con los trámites estipulados en el Reglamento de Grados y Títulos de la Facultad.

Atentamente

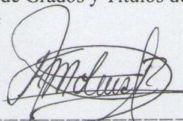
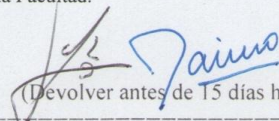
FIRMA  FECHA *13/05/2019*

DICTAMINADORES BORRADOR DE TESIS:

- 1) *Ing. Cifrido Zaravia Sanchez*
- 2) *Dr. Fredy Molina Rodríguez*
- 3) *Mgter. Jaime Barreda del Carpio*

DICTAMEN FINAL: Señor Decano de la Facultad de Ciencias Farmacéuticas, Bioquímicas y Biotecnológicas, atendiendo a su designación como Dictaminadores del presente Borrador de Tesis y luego de hechas las observaciones y correcciones pertinentes, cumpliendo con las exigencias mínimas establecidas para un trabajo de investigación de Tesis profesional, es que consideramos APTO para continuar con los trámites estipulados en el Reglamento de Grados y Títulos de la Facultad.

Atentamente

FIRMA   (Devolver antes de 15 días hábiles) FECHA

JURADOS: PRESIDENTE *DR. FREDY MOLINA RODRIGUEZ*
VOCAL *ING. CIFRIDO ZARAVIA SANCHEZ*
SECRETARIO *MAG. JAIME BARREDA DEL CARPIO*

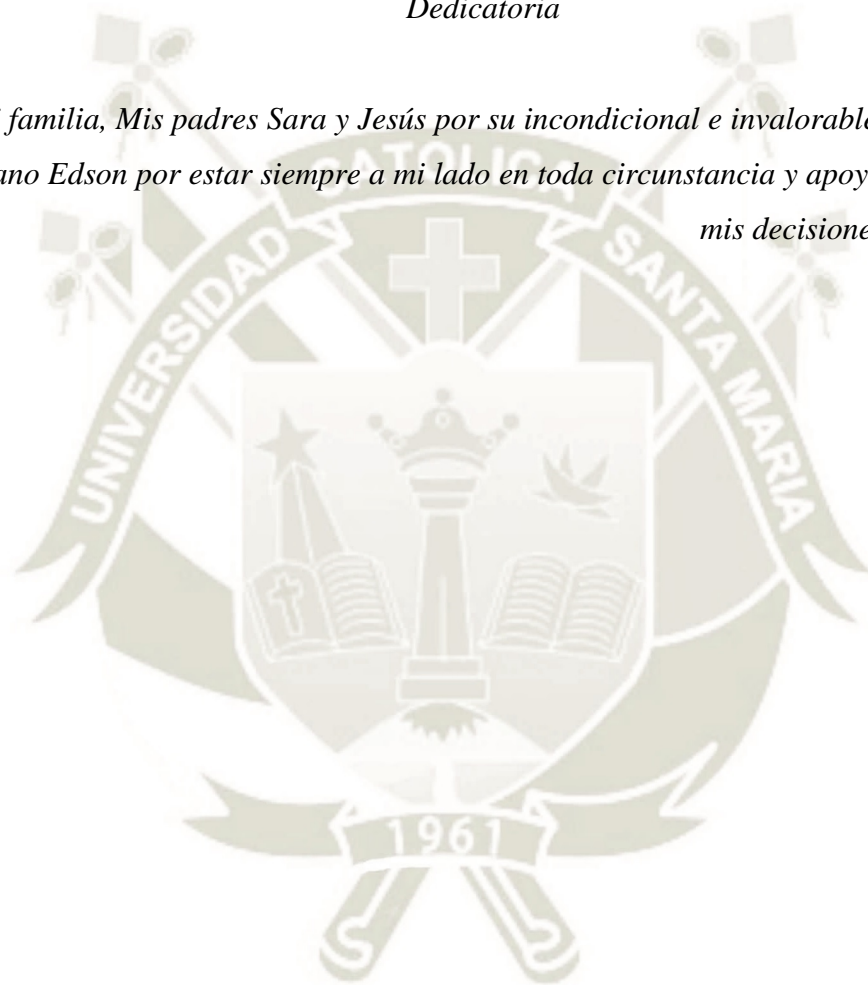
FECHA *13/6/19* HORA *19.00* LOCAL *C-402*

FIRMA DEL DECANO

FECHA

Dedicatoria

A mi familia, Mis padres Sara y Jesús por su incondicional e invaluable apoyo y a mi hermano Edson por estar siempre a mi lado en toda circunstancia y apoyarme en todas mis decisiones y aventuras.



Agradecimiento

A mi asesor Dr. Francisco Javier Roque Rodríguez por el apoyo y guía

Al equipo de IngBioProductores y la red E-equipu por dejarme formar parte de ellos

Ingeniera Pamela Manrique por su apoyo siempre que lo requerí

Ingeniero Oscar Medina por su amistad y apoyo siempre que fue necesario en este proyecto.

Al vicerrectorado de Investigación dirigido por el Doctor Gonzalo Dávila y siendo parte del proyecto “Comparación de la eficiencia entre un filtro de carbón activado modificado y un biofiltro de compost en la captación de H₂S de biogás para un biodigestor HPTC de dos etapas” con resolución 21940 y a la Ingeniera Pamela Tupayachi por gestionar el proyecto del cual soy parte.

Y finalmente a mi familia que siempre estuvo en las buenas y malas y que me llevo a poder realizarme y cumplir mis objetivos

INDICE

INDICE DE TABLAS	VII
INDICE DE FIGURAS	VIII
ABREVIATURAS	IX
INTRODUCCIÓN	XI
RESUMEN	XIII
ABSTRACT	XV
HIPÓTESIS	XVII
OBJETIVOS	XVII
Objetivo General	XVII
Objetivos Específicos	XVII
VARIABLES	XVIII
Variables Independientes	XVIII
Variables dependientes	XVIII
CAPITULO I	I
MARCO TEÓRICO	I
1.1 Biogás	1
1.1.1 Sulfuro de Hidrógeno	3
1.2 Purificación de Biogás	4
1.2.1 Metodos Físicoquímicos	4
1.2.2 Métodos Biológicos	7
1.3 Biofiltros	10
1.3.1 Material de Soporte	11
1.3.2 Población microbiana	12
1.3.3 Condiciones Ambientales	13
1.3.4 Tiempo de retención	15
1.3.5 Tipos de Biofiltros	16
1.4 El compost, material de soporte	19

1.4.1	Microorganismos en el proceso de compostaje	24
1.5	Bacterias azufre oxidantes y ciclo del azufre	26
<i>CAPITULO II</i>		31
<i>MATERIALES Y MÉTODOS</i>		31
2.1	Lugar de Investigación	31
2.2	Materiales	31
2.3	Métodos.....	32
2.3.1	Elaboración de Compost	32
2.3.2	Caracterización de compost	33
2.3.3	Aislamiento de microorganismos	35
2.3.4	Diseño de filtro escala de laboratorio.....	35
2.3.5	Evaluación de filtros a escala de laboratorio	36
2.3.6	Escalamiento de Filtro	38
2.3.7	Evaluación de filtro piloto	39
<i>CAPITULO III</i>		40
<i>RESULTADOS Y DISCUSIONES</i>		40
3.1	Elaboración y caracterización de compost	40
3.2	Aislamiento de microorganismos	43
3.3	Diseño y ensamblaje de filtros escala de laboratorio.....	45
3.4	Evaluación de filtros a escala de laboratorio	49
3.5	Escalamiento de filtro a escala piloto.....	62
3.6	Evaluación del bifiltro piloto.....	64
<i>CONCLUSIONES</i>		69
<i>RECOMENDACIONES</i>		71
<i>REFERENCIAS BIBIOGRÁFICAS</i>		72
<i>ANEXOS</i>		80

INDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1 Componentes del Biogás (5)</i>	<i>1</i>
<i>Tabla 2 Valores de relación C/N de algunos materiales compostables (33)</i>	<i>23</i>
<i>Tabla 3 Algunas Bacterias Sulfoxidantes estudiadas agrupadas según el pH (51)</i>	<i>30</i>
<i>Tabla 4 Diseño experimental de evaluación de filtros a escala de laboratorio</i>	<i>37</i>
<i>Tabla 5 Caracterización del compost elaborado</i>	<i>42</i>
<i>Tabla 6 Resultados obtenidos en filtros a escala de laboratorio</i>	<i>52</i>
<i>Tabla 7 Análisis de varianza para % de remoción de Sulfuro de Hidrógeno (H₂S)</i>	<i>54</i>
<i>Tabla 8 Promedio para el % de remoción de Sulfuro de Hidrógeno (H₂S) según el tipo de compost</i>	<i>57</i>
<i>Tabla 9 Comparaciones múltiples para % de remoción según el tipo de compost mediante el método de LSD Fisher</i>	<i>59</i>
<i>Tabla 10 Análisis de varianza para % de remoción de Dióxido de Carbono (CO₂)</i>	<i>61</i>
<i>Tabla 11 Promedio para el % de remoción de Dióxido de Carbono (CO₂) según el tipo de compost</i>	<i>61</i>
<i>Tabla 12 Comparaciones múltiples para % de remoción según el tipo de compost mediante el método de LSD Fisher</i>	<i>62</i>
<i>Tabla 13 Pruebas a escala piloto de remoción de Sulfuro de Hidrógeno (H₂S)</i>	<i>66</i>
<i>Tabla 14 Pruebas a escala piloto de remoción de Dióxido de carbono (CO₂)</i>	<i>67</i>
<i>Tabla 15 Porcentaje Metano (CH₄) luego de los filtrados</i>	<i>67</i>

INDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1 Ciclo biológico del Azufre (13)</i>	8
<i>Figura 2 Biofiltro de lecho escurrido o biofiltro de escurrimiento (32)</i>	17
<i>Figura 3 Biofiltro de lecho fijo con sistema de humidificación (32)</i>	18
<i>Figura 4 Ciclo Biológico del azufre según Lomans et al., 2002 (47)</i>	26
<i>Figura 5 Compost inmaduro (Izquierda), compost Maduro (derecha)</i>	41
<i>Figura 6 Aislamiento de microorganismos en medio mineral</i>	44
<i>Figura 7 vista al microscopio de los microorganismos cultivados a partir de compost.</i>	45
<i>Figura 8 Diseño de filtros escala de laboratorio diseño 2D vista isométrica y diseño 3D</i>	46
<i>Figura 9 Filtro ensamblado para la medición de biogás</i>	48
<i>Figura 10 Curva de crecimiento microbiano</i>	48
<i>Figura 11 Diagrama de Pareto para el % de remoción de Sulfuro de Hidrógeno (H₂S)</i>	53
<i>Figura 12 Grafica de medias para % de reducción de Sulfuro de Hidrógeno (H₂S) según el tipo de compost.</i>	57
<i>Figura 13 % de reducción de Sulfuro de Hidrógeno (H₂S) según el flujo</i>	58
<i>Figura 14 Diagrama de Pareto para % de remoción de Dióxido de Carbono (CO₂)</i>	60
<i>Figura 15 Grafica de medias para % de remoción de Dióxido de Carbono (CO₂)</i>	60
<i>Figura 16 Diseño piloto de biofiltro para la eliminación de H₂S (sulfuro de hidrogeno)</i>	63
<i>Figura 17 Filtro escala de laboratorio en acero inoxidable.</i>	64

ABREVIATURAS

°C: Grados Centígrados

%CO: Porcentaje de carbono orgánico

%MO: Porcentaje de materia orgánica

C/N: Relación de carbono nitrógeno

Cm: Centímetros

CH₄: Metano

CO: Monóxido de Carbono

CO₂: Dióxido de Carbono

CSTR: Continuously Stirred Tank Reactor (reactor continuo de tanque agitado)

D: Diámetro

d: densidad

H: Altura

h: Hora

H/D: Relación de altura diámetro

H₂S: Sulfuro de Hidrógeno

Kg/m³: Kilogramo por metro cúbico

Kcal/m³: Kilocalorías por metro cúbico

l/min: Litro por minuto

m: metro

mo/ml: microorganismos por mililitro

mm: milímetro

m³/h: metro cúbico por hora

NCh: Normativa Chilena

NTC: Norma Técnica Colombiana

nm: Nanómetro

NPK: Nitrógeno, Fosforo y potasio

O₂: Oxígeno

ppm: partes por millón

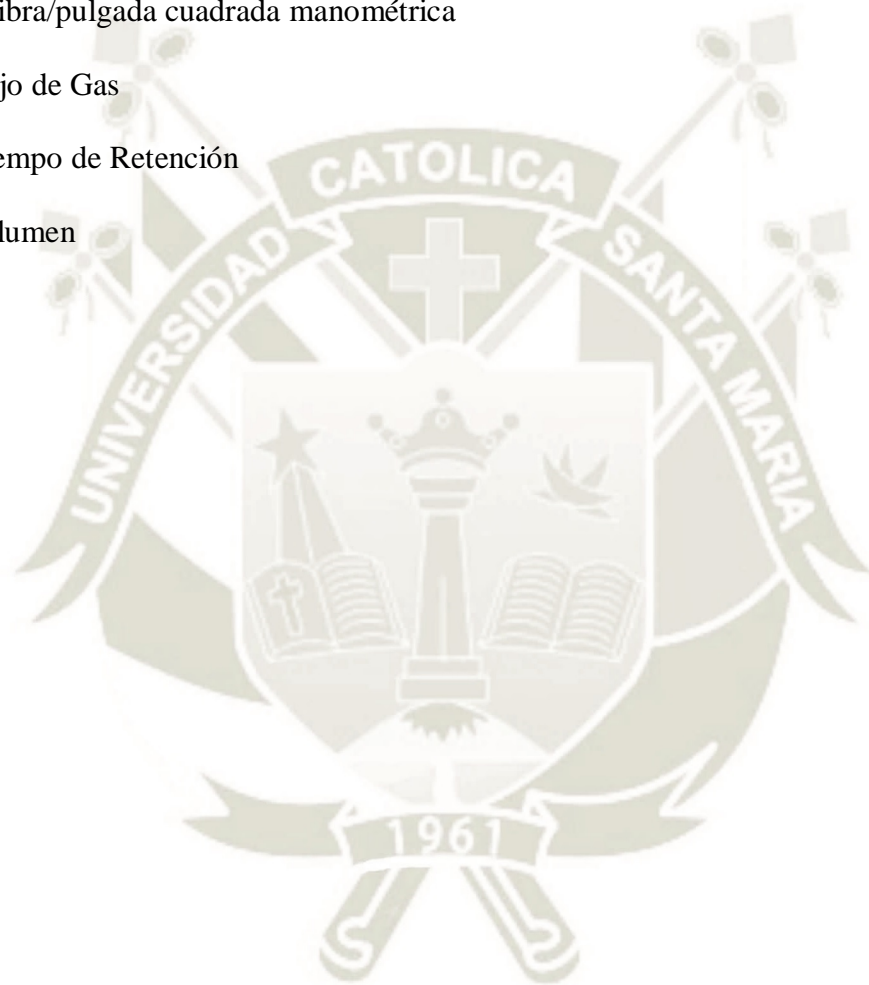
PSA: pressure swing adsorption

Psig: libra/pulgada cuadrada manométrica

Q: Flujo de Gas

Tr: Tiempo de Retención

V: Volumen



INTRODUCCIÓN

El biogás es un combustible alternativo que puede ser utilizado en diferentes procesos energéticos ya sea motores de cogeneración, calderas, turbinas, por lo que puede ser transformado en calor o electricidad y de esta manera ser aprovechado y utilizado como un biocarburante, y siendo debidamente tratado y purificado poder ser utilizado en una red de gas metano (biometano).

En la actualidad el problema ambiental obliga a la sociedad a buscar combustibles alternativos con el fin de disminuir la contaminación ambiental y con ello tenemos una serie de políticas ambientales instauradas en diversas partes del mundo incentivadas por diversos organismos con el fin de cambiar los combustibles tradicionales por combustibles más amigables con el medio ambiente.

Dentro de estos combustibles el biogás representa una alternativa por su forma de obtención a partir de la digestión anaeróbica de diferentes residuos orgánicos y a los productos obtenidos en este proceso, como son el biogás (fuente energética) y el bioabono (Biosol en sólido y biol líquido) que tienen un alto potencial fertilizante (1). Sin embargo, el biogás es una mezcla de diferentes gases como metano, dióxido de carbono, monóxido de carbono, oxígeno y sulfuro de hidrogeno principalmente, siendo el metano por su poder energético el más importante.

El biogás producido no se puede utilizar directamente como una fuente energética debido a su contenido de sulfuro de hidrogeno (H_2S) que a pesar de ser producido en bajo porcentaje es un gas dañino para la salud y altamente corrosivo lo que restaría vida útil a los diferentes equipos en los que se le tenga que utilizar, y el CO_2 que resta poder calorífico a la mezcla gaseosa. Disminuyendo su porcentaje en la mezcla aumentamos la calidad de biogás.

Las diferentes técnicas de purificación de biogás las podemos clasificar en técnicas fisicoquímicas y técnicas biológicas, siendo las más utilizadas las fisicoquímicas sin embargo requieren de un mayor costo de mantenimiento y pueden generar residuos químicos, en el caso de las técnicas biológicas son más amigables con el medio ambiente y requieren un menor costo de mantenimiento y utilización, así como una gran eficacia reportada en diferentes estudios.

Entre las principales técnicas biotecnológicas utilizadas tenemos los biolavadores, biofiltros de lecho escurrido y biofiltros de lecho fijo (2), todos constan de diferentes diseños y parámetros de funcionamiento, pero se basan principalmente en la adaptación de microorganismos en esta mezcla gaseosa.

Los microorganismos utilizados para este tipo de tecnología requieren en su metabolismo el uso de azufre como fuente energética pudiendo de esta manera realizar un proceso de oxidación de compuestos sulfurados (3), como es el caso del sulfuro de hidrogeno y logrando su eliminación de la mezcla gaseosa del biogás.

Los biofiltros son sistemas que pueden constar de un lecho fijo sin necesidad de mucha manipulación o lechos escurridos en los que tenemos que considerar un flujo de recirculación para su óptimo funcionamiento, en ambos casos la decisión debe pasar por las necesidades en el momento de su elección. Los tiempos de residencia varían entre 15 a 60 segundos para tener un buen rendimiento y pueda ser efectivo (4). Ambos son los sistemas biológicos más utilizados en procesos de purificación. Otro elemento importante para el buen funcionamiento de los biofiltros es el material de soporte elegido debido a que este albergará y permitirá el crecimiento de los microorganismos por lo que este debe ser lo suficientemente poroso para una proliferación y fijación adecuada.

RESUMEN

En el presente trabajo evaluamos el funcionamiento de un biofiltro en la eliminación de H_2S y CO_2 de biogás, utilizando el compost como material de soporte y fuente de microorganismos.

Los filtros se diseñaron en base a los tiempos de retención (20 y 40 segundos), y las variantes de compost fueron 3: Compost autoclavado, compost comercial y compost bioaumentado. Para bioaumentar el compost se utilizó un medio de cultivo específico para microorganismos sulfooxidantes. Utilizamos el mismo compost como fuente de microorganismos.

Los filtros utilizados se construyeron en PVC, la evaluación se realizó en la planta piloto de biogás de la Universidad Católica de Santa María en Majes. Los resultados nos indicaron una reducción del 56.15% de H_2S en los filtros con compost esterilizado, comercial una reducción del 76.98% y bioaumentados del 78.70%, estadísticamente tuvimos una diferencia significativa entre el compost esterilizado con el normal y autoclavado más no entre estos 2 últimos. Tampoco hubo diferencia significativa en la interacción del tiempo de retención en la eliminación de H_2S del biogás.

En el Caso del CO_2 la disminución en los 3 sistemas se encontró en los promedios de: Estéril 20.5667%, comercial 19.0167% y bioaumentado en 25.6%, con estos resultados estadísticamente se determinó que no hay una diferencia significativa entre los 3 sistemas.

Estos resultados nos declinaron por la utilización de compost comercial. El diseño se hizo en una escala 20:1 para un tiempo de retención de 40 segundos.

El biofiltro escalado a nivel piloto obtuvo resultados que superaron el 99% de efectividad siendo solo la última medición inferior a este promedio con 98.9% de remoción, caso contrario representó la eliminación de dióxido de carbono pues su porcentaje de remoción estuvo por debajo del 5% excepto la primera que estuvo en 11.76%, siendo la última medición de 0.79%.

Palabras Clave: Biogás, Biofiltro, Sulfuro de hidrógeno, dióxido de carbono, compost



ABSTRACT

In the present work we evaluate the functioning of a biofilter in the elimination of H₂S and CO₂ from biogas, using compost as a support material and source of microorganisms.

The filters were designed based on the retention times (20 and 40 seconds), and the compost variants were 3: autoclaved compost, commercial compost and bioaugmented compost. A specific culture medium for sulfoxidant microorganisms was used to bio-increase the compost. We use the same compost as a source of microorganisms.

The filters used were built in PVC, the evaluation was carried out in the biogas pilot plant of the Catholic University of Santa María in Majes. The results indicated a reduction of 56.15% of H₂S in the filters with sterilized compost, a commercial reduction of 76.98% and bioavailable of 78.70%, statistically we had a significant difference between the sterilized compost with the normal and autoclaved but not between these last 2. There was also no significant difference in the interaction of the retention time in the removal of H₂S from the biogas.

In the case of CO₂ the decrease in the 3 systems was found in the averages of: Sterile 20.5667%, commercial 19.0167% and bioaugmented in 25.6%, with these results statistically it was determined that there is no significant difference between the 3 systems.

These results declined us due to the use of commercial compost. The design was made on a 20: 1 scale for a retention time of 40 seconds.

The biofilter scaled at pilot level obtained results that exceeded 99% of effectiveness being only the last measurement lower than this average with 98.9% removal, otherwise

it represented the elimination of carbon dioxide because its percentage of removal was below 5% except the first one that was in 11.76%, being the last measurement of 0.79%.

Keywords: Biogas, Biofilter, filtering, Hydrogen sulfide, carbon dioxide, compos



HIPÓTESIS

Dado que el biogás producido por la biodigestión anaerobia es una mezcla de gases que contiene además de metano otros gases; es posible la purificación del metano eliminando el sulfuro de hidrógeno y el dióxido de carbono utilizando un sistema de biofiltración que usa el compost como material de soporte.

OBJETIVOS

Objetivo General

Purificar el metano a partir de biogás producto de la digestión anaerobia por biofiltración con el uso de compost como material de soporte.

Objetivos Específicos

- Obtener Compost a partir de residuos orgánicos para su uso como soporte en el proceso de filtración.
- Caracterizar fisicoquímicamente el compost usado como material de soporte.
- Aislar un consorcio microbiano a partir del compost para bioaumentar el soporte y compararlo con el compost maduro.
- Diseñar y Ensamblar un biofiltro para la purificación de metano a escala de laboratorio.
- Evaluar el compost esterilizado, el compost maduro y el compost bioaumentado en el proceso de filtración de biogás.
- Escalar y ensamblar el biofiltro a una escala piloto a partir del diseño a escala de laboratorio.

VARIABLES

VARIABLES INDEPENDIENTES

- Compost (Indicador - Tipo de compost: Inerte, Normal, Bioaumentado)
- Flujo de Biogás (Indicador: l/min)

VARIABLES DEPENDIENTES

- Sulfuro de Hidrógeno (Indicador: ppm)
- Dióxido de carbono (Indicador: porcentaje %)



CAPITULO I

MARCO TEÓRICO

1.1 Biogás

La digestión biológica anaerobia de residuos orgánicos en un proceso compuesto de 4 etapas: Hidrolisis, etapa acidogénica, etapa acetogénica y etapa metanogénica (1); que dan como resultado el bioabono (Biosol y Biol) y el biogás.

El biogás producto de este proceso biológico es una mezcla de compuestos gaseosos constituido principalmente por:

Tabla 1 Componentes del Biogás (5)

Componentes	Cantidad
Metano (CH₄)	55-75 %
Dióxido de Carbono	30- 45 %
Nitrógeno	0-15 %
Oxígeno	0-3 %
Agua	1-5 %
Hidrocarburos	0-200 mg m ⁻³
Sulfuro de Hidrogeno	0-10000 ppm
Siloxanos	0-41 mg Si m ⁻³
Amonio	0-100 ppm

Donde el metano es el componente principal de esta mezcla, teniendo con una densidad de 0.7kg/m³ y una capacidad calorífica elevada de 5750kcal/m³, la composición del biogás depende fundamentalmente de los tipos de sustrato utilizados para la biodigestión, sin embargo al poseer un poder calorífico tan elevado lo hace una alternativa importante para su aprovechamiento energético, ya sea en motores de cogeneración, calderas,

turbinas, pudiendo por lo tanto participar en la generación de electricidad y calor, siendo también utilizados como un tipo de biocombustible (6).

La migración hacia una economía sostenible y el desarrollo de energías limpias alrededor del mundo obligan a la búsqueda de combustibles con una menor huella de carbono y una menor emisión de gases del efecto invernadero, por lo que las energías renovables cobran especial importancia en este proceso, la estrategia Europa 2020 tiene entre sus principales objetivos el incremento del uso de energías renovables al 20%, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en 20% y aumentar la eficiencia energética en 20%. Cuando hablamos de energías renovables nos referimos a la energía eólica, fotovoltaica y principalmente a las bioenergías. América Latina y el Caribe contaban hacia el 2014 con importante componente de energías renovables superando el promedio mundial de aquella época donde la mayor cantidad reside en la biomasa y las alternativas que esta nos brinda (7).

Las primeras experiencias en América Latina con biodigestores datan de 1970 gracias a OLADE (Organización Latinoamericana de Energía), promoviendo la introducción de algunas plantas de biogás en diferentes países de la zona, y este número se ha ido incrementando progresivamente con el correr de los tiempos, aumentando los países y las plantas, llegando a haber programas especiales de energía con el uso de biogás como es el caso de México y Ecuador, y aumentando el uso de plantas domésticas con el objetivo de tratar la gran cantidad de residuos orgánicos que se generan por las industrias de la zona.

Sin embargo el uso del biogás para su introducción en diferentes actividades energéticas ya sea en su combustión, en la introducción en motores eléctricos o turbinas, no puede ser de manera directa pues este mismo presenta gases a parte del metano (CH_4) que son considerados contaminantes. Como ya se sabe el biogás es una mezcla comprendida de diferentes gases (Tabla 1) y esto se debe principalmente a la materia prima utilizada en el biodigestor, consideramos como principales contaminantes al CO_2 (dióxido de carbono) que es un gas recalcitrante que reduce la densidad del biogás y disminuye su valor calorífico y al H_2S (sulfuro de hidrógeno) que es un gas altamente corrosivo y tóxico para la salud humana, con la eliminación de ambos podemos llegar a un porcentaje por encima del 95% donde se estaría hablando de biometano (5).

1.1.1 Sulfuro de Hidrógeno

El sulfuro de hidrogeno (H_2S) es un gas inflamable, incoloro y tóxico, con olor a huevo podrido, aparece de forma natural el gas natural e incluso en el petróleo crudo, se produce de igual manera en la digestión anaeróbica de materia orgánica (8).

Es una gas que posee un mayor peso que el aire lo que produce su acumulación en áreas bajas, su olor se puede distinguir incluso a bajas concentraciones sin embargo una exposición continua a cualquier nivel de concentración puede hacer perder la habilidad para detectar por el olor el gas aun cuando este siga presente, cuando las concentraciones son muy altas esta habilidad se puede perder de manera instantánea (9).

Se conoce como un gas toxico que produce a concentraciones bajas irritación de ojos, nariz, garganta estos efectos pueden tardar en aparecer, a concentraciones moderadas surgen efectos más severos en los ojos y respiración, dolor de cabeza, mareos, náuseas, tos, vómitos. A muy altas concentraciones puede producir un estado de shock, convulsiones, incapacidad para respirar, coma e incluso la muerte y estos efectos pueden ser extremadamente rápidos a grandes ingestas del gas (8).

El sulfuro de hidrogeno anhidro es poco corrosivo de acero al carbón, aluminio y aceros inoxidable, sin embrago el H_2S húmedo es muy corrosivo para algunos materiales como el cobre, latón o acero al carbón, si los aceros están muy tensionados suele producir facturas, produce daños y desgaste a la maquinaria en la cual se introduce.

Se consideran corrosivos para equipos como pilas de combustible, refrigeradores, calentadores y otros dispositivos metálicos, en una concentración mayor a 1000mg/m³ (666ppm) acortan la vida del aceite del motor y llegan a poner en peligro los sistemas de combustión de los mismos.

En el medio ambiente la quema de sulfuro de hidrógeno puede ser el causante de serios daños, una quema de biogás sin la remoción de sulfuro de hidrogeno genera la producción de dióxido de azufre causante de la lluvia ácida (10).

En el caso del Biogás hablamos de una concentración que puede variar entre 0 – 10000ppm, considerado una concentración muy alta para su utilización, por lo que se busca disminuir su concentración a menos 100 ppm para su uso en motores de combustión o su ingreso a motores de generación eléctrica.

1.2 Purificación de Biogás

En el tratamiento de biogás para su purificación se establece 2 principales compuestos a eliminar los cuales son el dióxido de carbono y sulfuro de hidrogeno, sin embargo los procesos de purificación se establecen en un tratamiento primario para la remoción o reducción de algunos contaminantes como agua y algunas partículas a través de procesos físicos simples. Los tratamientos secundarios son diseñados para ser más específicos y proporcionar un mayor nivel de purificación de gas, en este tratamiento incluimos procesos físicos químicos y en la actualidad también procesos biológicos. (11)

1.2.1 Métodos Físicoquímicos

1.2.1.1 Métodos de adsorción

Los métodos de adsorción se basan en la captura de manera selectiva de impurezas o contaminantes con la ayuda de diferentes materiales solidos porosos o granulados, que poseen una gran superficie específica a la que se unen por fuerzas electrostáticas débiles. Esta reacción se puede ver afectada por diversos factores externos como la humedad, temperatura o la selectividad del material, se ha podido observar una mejora en el rendimiento con el aumento de la presión.

Este tipo de sistemas son muy utilizados para remover el agua, dióxido de carbono y sulfuro de hidrogeno en el biogás, el sistema que más se conoce es un sistema PSA (pressure swing adsorption) para lo que se necesita el gas comprimido a 60 – 100 psig antes de ser introducido al sistema de adsorción (12).

Los compuestos más utilizados en la purificación de biogás mediante este método son el carbón activado, la sílicagel o tamices moleculares. En el carbón activado la reacción se

produce en los poros, generando azufre y agua cuando el sulfuro de hidrogeno reacciona con el oxígeno. Tal como se observa en la ecuación. (13)

En este caso podemos hablar de 2 tipos de adsorción una de tipo química cuando el azufre es retenido en la superficie interna del carbón activado y también se da un tipo de retención física cuando el azufre queda retenido en los poros del carbón. En el uso de sílicagel se suele usar con un indicador para mostrar la saturación del soporte. Los tamices moleculares hechos de zeolita también son utilizados para eliminar sulfuro de hidrógeno, tienen poros bien definidos lo que permite una eliminación selectiva de diferentes compuestos. (13)

1.2.1.2 Métodos de absorción

Estos métodos se utilizan debido a la reactividad del sulfuro con la mayoría de los metales, y en varios casos representan costos relativamente bajos. Los sistemas que más se emplean son:

- Absorción con compuestos de hierro: se utilizan limaduras de hierro en columnas, los parámetros de operación requieren un nivel de humedad por lo que se requiere riego de forma discontinua se utiliza otro relleno que favorezca la permanencia de la humedad por lo que se utiliza por ejemplo aserrín, para ayudar la hidrodinámica la humedad optima debe encontrarse entre 30 y 60%. El pH es otro parámetro a controlar en un nivel neutro (7.5 – 8.5) (14).

También y debido a la afinidad del H_2S con algunos compuestos y en este caso con el hierro, se suele utilizar el sulfato férrico para la desulfuración del biogás, esto se da gracias a la ecuación (13).

Esta reacción origina como se ve en la ecuación sulfato ferroso, donde el sulfato férrico es recuperado gracias a *Acidithiobacillus ferroxidans* que oxida el Fe y se separa el azufre elemental (13).

- Absorción con agua: el principio de absorción en este caso se basa en la diferente solubilidad de los gases componentes en el biogás con un líquido depurador, el agua es el absorbente elegido como solución depuradora y en escala industrial es ampliamente utilizado, abarcando el 41% en la industria global del biogás. La solubilidad del CO₂ es 26 veces mayor que la del CH₄ a 25°C por lo que se puede usar en su purificación, el H₂S puede ser removido conjuntamente con el CO₂ pues presenta una solubilidad incluso mayor que la de este, sin embargo se recomienda su separación antes por la corrosividad que el H₂S presenta. (5)
- Absorción con solventes: El uso de solventes como metanol o éteres de dimetilo de polietilenglicol (DMPEG), es utilizado para la remoción de CO₂, H₂S y H₂O pues presentan mayor solubilidad que el CH₄ en este solvente, el proceso de regeneración es el mismo que él se utiliza en el agua. Algunos nombres comerciales de los solventes son Selexol y Genosorb y exhiben una mayor afinidad por el CO₂ y H₂S hasta 5 veces más que por el agua, lo que se traduce en una menor utilización del solvente con bajo flujo de bombeo, disminuyendo los costes de operación (5).
- Otros compuestos orgánicos utilizados en la absorción de los contaminantes del biogás son las aminas, soda caustica y alguno hidrocarburos, siempre la eficiencia de estos sistemas dependerá de la solubilidad, existen procesos que incluyen el uso de sulfuros metálicos de baja solubilidad como el ZnSO₄ que son casi insolubles en agua y que registraron grandes rendimientos en la retención de S (15), otros parámetros de control como la temperatura, presión y el pH poseen gran influencia en el rendimiento de los sistemas de retención. Todos los procesos de absorción por solventes son realizados en torres o columnas donde el solvente es pasado contracorriente del flujo de biogás, es el momento que se realiza la transferencia de masa del H₂S. (13)

1.2.1.3 Métodos de separación por membrana

La separación por membranas se basa principalmente en que algunos componentes del gas atraviesan una membrana delgada mientras que otros quedan retenidos en la misma, la permeabilidad de la membrana está relacionada con la solubilidad química del componente objetivo, hay diferentes tipos de membrana utilizados en este tipo de métodos. La presión a la que suele funcionar se encuentra entre 25 y 40 bares, la eficiencia puede verse mejorada por la implementación de mas módulos, dependiendo de los resultados obtenidos (16).

El uso de membranas por lo general está asociado a la eliminación de CO₂ en la purificación de biogás, sin embargo estudios nuevos nos llevan a su uso también en la remoción de H₂S y de siloxanos, el uso de membranas poliméricas inorgánicas se han ido estudiando así como su rendimiento, se ha comprobado de la misma forma que las membranas no poliméricas como de alúmina, zeolitas o carbono tienen mayor estabilidad tanto química como térmica sin embargo poseen un alto costo, las membranas cerámicas, porosas o densas, son estables químicamente y llegan a soportar altas temperaturas, sin embargo aún presenta serios problemas que impiden su utilización, el gran problema del uso de membranas en la remoción de impurezas en el biogás viene a ser el coste que estas representan, tanto como el coste de adquisición, como los costes de operación y mantenimiento (17).

1.2.2 Métodos Biológicos

Los métodos biológicos o tratamientos biológicos consisten en el tratamiento de gases al hacerlos entrar en contacto con un medio biológicamente activo (13). Para ello se hace uso de microorganismos que tienen la capacidad de oxidar compuestos sulfurados y a las que se denomina bacterias sulfoxodantes, se conocen muchos organismos con la capacidad de consumir el sulfuro de hidrogeno en introducirlo en su metabolismo como fuente energética y transformarlo a azufre elemental (12). Factores que favorecen el correcto funcionamiento van a ser la presencia de oxígeno, humedad, existencia de H₂S gaseoso y líquido residual.

Los procesos basados en el uso de microorganismos basan su funcionamiento en el ciclo biológico del azufre como se muestra en la figura 1 (13).



Figura 1 Ciclo biológico del Azufre (13)

En este ciclo se observan 2 etapas de reducción y una etapa donde se da la oxidación biológica del H_2S . Esta etapa que es la que nos interesa puede darse tanto en condiciones anaeróbicas como aeróbicas.

La gran ventaja que presentan este tipo de sistemas con respecto a los métodos fisicoquímicos es la baja o casi nula producción de contaminantes secundario, menores costos tanto en la inversión como en la operación, un menor consumo energético debido a que pueden funcionar a temperatura ambiente y un gran porcentaje de eficiencia en la remoción de contaminantes. Sin embargo el procedimiento es más lento y hay que estar en constante búsqueda de microorganismos capaces de reducir los tiempos de operación y hacer de este un método competitivo (14).

No solo el uso de bacterias se ha venido probando el sistemas biológicos para la remoción de contaminantes en el biogás también se ha evaluado teniendo buenos resultados en la remoción de CO_2 , el uso de microalgas en un fotoreactor para favorecer la fotosíntesis, utilizando el CO_2 presente en el biogás como fuente de nutrientes, con la especie *Scenedesmus sp.* Incluso se ha logrado que esta produzca metano en un sistema anaerobio utilizando CO_2 en su metabolismo (18).

Los métodos más utilizados para la desulfuración biológica son tanto el uso de bioreactores o fotobioreactores y el uso de biofiltros tanto de lecho escurrido como de lecho fijo.

- *Biolavadores o Bioscrubbers*. Es un proceso conformado de 2 etapas, una primera absorbente y la segunda de oxidación, el proceso consiste en absorción del contaminante en un medio acuoso, donde este absorbe el contaminante hasta el punto de saturación, la segunda etapa consiste en que el líquido absorbedor es llevado a un bioreactor donde la solución acuosa es tratada por microorganismos sueltos o inmovilizados, se suele añadir una solución de nutrientes inorgánicos para favorecer el crecimiento de los mismos. (13)

Uno de los parámetros más importantes considerados para el tratamiento de diferentes contaminantes se basa en el valor de la constante de Henry que determina la solubilidad en un medio acuoso, por lo que algunos autores recomiendan el uso de bioscrubbers si el coeficiente de Henry es inferior a 0.01 (H_{cc} , concentración de gas/concentración de líquido) las ventajas que trae este tipo de tratamiento es que requieren de un espacio menor que otras tecnologías, operación confiable, bajo riesgo de obstrucción, bajo costo operativo y la capacidad para manejar mayores cargas de gases (hasta $3000-4000 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{h}^{-1}$) que los biofiltros. (19)

- *Biofiltros*, son considerados un tipo de bioreactor trifásico pues consta de 3 fases, una gaseosa, una líquida y los bioportadores (soporte), este soporte altamente poroso con capacidad amortiguadora y que a su vez posee nutrientes y la capacidad de retener humedad para favorecer el crecimiento de diversos microorganismos. (20)

Hay 2 tipos de biofiltros utilizados en la remoción de contaminantes gaseosos, los biofiltros de lecho Fijo, cuya característica principal es la ausencia de una fase líquida móvil, por lo que se usan microorganismos fijados en el medio poroso, y biofiltros de lecho escurrido que consiste en un biofiltro empaquetado con un soporte sintético donde se forma una biopelícula y hay una fase líquida móvil que se encarga de garantizar la humedad del soporte como añadir nutrientes para el crecimiento de los microorganismos purificadores.

- *Bioreactores* son sistemas que poseen un medio líquido con nutrientes para el crecimiento bacteriano y un medio gaseoso que favorezca el mismo, se operan

bajo parámetros importantes como el pH, temperatura y agitación del medio. El uso de bioreactores para la purificación biológica de biogás también ha sido evaluado de diferentes formas como el uso de bioreactores CSTR y fotobioreactores, se basan en el principio de utilizar el biogás como fuente de nutrientes para los microorganismos (CO_2), se han probado diferentes microorganismos como microalgas que utilicen el CO_2 como fuente de carbono y bacterias en condiciones anaeróbicas y aeróbicas, sin embargo la utilización de un cultivo aerobio significa la introducción de oxígeno externo al sistema para favorecer el crecimiento lo que nos es un factor de especial cuidado debido a que un incremento de este puede generar inestabilidad con el metano, ya que genera una mezcla que puede ser explosiva. Los bioreactores con bacterias inmovilizadas también son de especial investigación (18) (21).

1.3 Biofiltros

Los biofiltros como se detallaron anteriormente son un sistema biorreaccionante que contiene 3 fases una gaseosa, una líquida y un soporte o bioportador, se describe la biofiltración como una tecnología para el control de un contaminante aéreo por un sistema biológico, para lo cual requiere que los gases residuales circulen a través de un medio poroso biológicamente activo. Los biofiltros tienen su origen en Europa y fueron utilizados para la eliminación de olores. En las últimas 2 décadas los biofiltros han ido evolucionando desde sistemas que solo eliminan olores a sistemas altamente complejos y técnicamente sofisticados para la eliminación de sustancias químicas específicas de alguna fuente industrial (22).

En 1990 las modificaciones de la ley de aire limpio impulsaron las investigaciones para eliminar contaminantes aéreos emitidos por fuentes puntuales, lo que motivó a la investigación en biofiltración. Las ventajas económicas y ambientales que significaron el desarrollo de esta tecnología en el mercado impulsaron su crecimiento en los Estados Unidos y otras naciones europeas (22).

La biofiltración consiste básicamente en una corriente de gas contaminada que pasa a través del lecho filtrante (soporte con microorganismos) donde los contaminantes pasan de la fase gaseosa a la biopelícula que se forma en el soporte donde es metabolizada biológicamente (23). En el control y desarrollo de los biofiltros hay una serie de elementos a considerar, parámetros que regulan y que inciden directamente en el comportamiento y la efectividad de los biofiltros, principalmente en el crecimiento de los microorganismos, a lo largo del desarrollo histórico de los mismo hubo gran incidencia en la investigación de microorganismos específicos para los contaminantes requeridos, materiales de soporte suficientemente porosos y que aporten la cantidad de nutrientes necesarios para el desarrollo microbiano, o los diferentes medios de cultivo capaces de aportar este mismo nivel de nutrientes en soportes inertes, la temperatura adecuada para el desarrollo, el nivel de humedad, el pH en que se encuentra el medio o el tiempo de retención en el filtro va a ser factores limitantes en el desarrollo de poblaciones microbianas que van a determinar la eficiencia de los biofiltros.

1.3.1 Material de Soporte

Un biofiltro consta de un soporte empacado biológicamente activo, por lo que las características que debe poseer tienen que favorecer al desarrollo de la población microbiana, así como tener ciertas propiedades estructurales. Las principales características que debe reunir un material de soporte son las siguientes (4):

- Poseer la capacidad de retención de agua entre en 30 y 60%
- Ausencia de sustancias inhibitoras de crecimiento microbiano
- pH neutro
- Superficie porosa con capacidad reactiva
- Baja compactación para evitar taponamientos que influyan en la operación y por ende en los costos

Como material de soporte existen los de tipo orgánico como el compost, cortezas de árbol, turba y suelos, pero también es utilizado los soportes de tipo sintético que poseen las características antes mencionadas como carbón activado, perlita, vermiculita u otros, en este tipo de soporte requiere de la adición de soluciones con nutrientes que cubran los requerimientos básicos para la sobrevivencia microbiana (24).

Cada soporte posee unas características en especial que permiten su selección, los soportes orgánicos más utilizados son el compost y la turba. El compost posee una gran diversidad como densidad de microorganismos, una favorable retención de agua, pH neutro y contenido de nutrientes favorable para la proliferación microbiana, sin embargo posee una mayor caída de presión que la turba que es un medio utilizado desde 1980 pero presenta hidrofobicidad lo que hace un poco difícil el control de humedad, no posee naturalmente un alto contenido de microorganismos por lo que requiere inoculación, en comparación con el compost tiene mucho menos nutrientes por lo que requiera la suplementación de estos a través de sistemas de goteo o lenta esparción para mantener el contenido necesario, era el medio más utilizado debido a la baja caída de presión que posee, sin embargo en los últimos tiempos ha sido reemplazado por el compost debido a un mejor rendimiento a largo plazo y un mejor control de la humedad (24).

En el uso de materiales de soporte sintéticos, estos no poseen nutrientes, ni microorganismos de manera natural por lo que tienen que ser suministrados según las necesidades, presentan un fácil control de humedad, y tienen la porosidad necesaria para favorecer el crecimiento, hay una gran variedad de compuestos que se pueden utilizar siendo los más comunes el carbón activado, vermiculita, silica entre otros (24).

El soporte debe tener la porosidad adecuada para permitir el crecimiento, retención de humedad y formación de la biopelícula por lo que es ideal que el porcentaje de porosidad sea mayor al 40%. (13)

1.3.2 Población microbiana

El funcionamiento de los biofiltros depende principalmente de la capacidad de los microorganismos de eliminar o metabolizar un compuesto determinado de una mezcla de gases, para lo cual la biomasa presente y el microambiente en el que se encuentra deben tener las condiciones adecuadas para cumplir el objetivo (4). Se utilizan microorganismos específicos o consorcios microbianos, en el caso de la eliminación de H_2S se utilizan tanto microorganismo quimioautótrofos como fotoautótrofos, aunque en este caso la fuente de luz es un factor limitante en el uso de este modelo (25).

Los quimioautótrofos son independientes de las necesidades de luz, por lo que su crecimiento va a depender de una fuente de carbono que en muchos casos puede ser el CO_2 teniendo un cultivo de condiciones anaerobias, y las fuentes de energía en el caso de la eliminación de H_2S , va a ser el azufre (25).

Los consorcios microbianos son muy utilizados en los biofiltros al igual que lodos activados, aunque muchas veces presentan preocupación por su comportamiento, en su mayoría se utilizan cepas específicas aisladas para un determinado compuesto (26).

La biodegradación es la parte más importante del proceso y está relacionada al aumento de biomasa y las actividades enzimáticas de los microorganismos que participan, muchos de los controles con respecto a la afinidad por un compuesto determinado se dan a través del control de la biomasa, se han realizado varios estudios para determinar la actividad biológica en los biofiltros para agua potable sin embargo se han desarrollado muy pocos para determinar la actividad dentro de biofiltros para gases. (26)

Los géneros identificados que comúnmente son utilizados en sistemas de biofiltración son en bacterias: Pseudomonas, Rhodococcus, Hyphomicrobium, Mycobacterium, Flavobacterium, Nocardia, Thiobacillus, entre otros. También se usan hongos mucorales tal como Mortirella, Rhizopus y deuteromicetos como el Penicillum, Aspergillus, Cladosporium, Fusarium Trichoderma Alternaria, y otros (4).

1.3.3 Condiciones Ambientales

Los factores ambientales que van a influenciar de manera directa en el crecimiento de los microorganismos y por consiguiente en el óptimo funcionamiento del sistema biofiltrantes, que deben ser considerados son:

- Temperatura
- pH
- Humedad
- Nutrientes

El efecto de la temperatura en el crecimiento y funcionamiento de un biofiltro es importante para el diseño y operación, en el funcionamiento cuando la temperatura es menor de la óptima, el crecimiento se ve estancado y conforme esta temperatura aumenta las tasas de reacción biológica acompañan esta medida, por encima de la temperatura óptima puede generarse la desnaturalización de las proteínas enzimáticas y por lo tanto las tasas disminuyen (27). Los sistemas biofiltrantes por lo general funcionan a temperaturas entre 20 y 30°C básicamente en condiciones ambientales para microorganismos mesófilos, aunque también se han registrado biofiltros que funcionan a temperaturas extremas para lo que se requiere de microorganismos termófilos (altas temperaturas) o psicrófilos (bajas temperaturas) (4).

El efecto del pH es importante debido a que tiene influencia directa en el crecimiento microbiano, muchos de los microorganismos utilizados en el uso de biofiltros crece en el rango de 7.0 – 8.0 es decir a pH neutro por ello el uso de soluciones amortiguadoras, hay sistemas que funcionan con pH extremos por lo que el añadir compuestos para regularlo es importante en el funcionamiento, en el caso de sistemas para la eliminación de H₂S dependiendo de los microorganismos utilizados podemos tener del género *Thiobacillus* que actúan en pH ácido alrededor de 2, aunque algunas especies de este género trabajan en pH neutro, pero también existen otros géneros de bacterias que actúan a pH neutro por lo que el sistema tendrá que ser regulado a este. En la eliminación de H₂S el pH suele servir de indicador pues un descenso en el mismo podría ser indicador de la producción de ácido sulfúrico gracias a la oxidación biológica de sulfuro de hidrógeno (28).

La humedad es el parámetro de operación que debe ser más relevante para el funcionamiento de un filtro, pero también es el más susceptible a cambios (29). Una humedad muy baja evita la formación de biopelículas que permita el crecimiento microbiano, una alta cantidad de humedad reduce la transferencia de masa de sustancias hidrofóbicas, obstruye el espacio poroso disponible lo que evita la formación de biopelícula disponible para la transferencia de contaminantes lo que hace que haya un aumento en la caída de presión y posibles obstrucciones en el sistema (29). El nivel de humedad en los biofiltros se encuentra entre el 30 y 70% para un óptimo funcionamiento, y es un parámetro que debe estar en constante control (4). En muchos casos se realiza una pre humidificación de los gases para mantener la humedad del soporte en el nivel requerido, los sistemas de control puede ser manuales tomando muestras en distintas partes del

soporte y se determina por gravimetría y controles de tipo automático para lo cual se usan sensores que realizan la medición (29).

Los nutrientes son necesarios para el crecimiento de microorganismos y su metabolismo por lo que dependiendo del soporte utilizado se introducen en el sistema o son parte del soporte. La adición de nutrientes es un aspecto que se debate debido a que el suministro continuo de nutrientes puede generar un taponamiento apresurado del soporte, sin embargo, el uso de suministro intermitentes puede ser la solución de este problema. En un biofiltro de lecho fijo en que no es necesaria la introducción de fuentes externas se utilizan soportes que poseen las sustancias necesarias para la sobrevivencia de los microorganismos, sin embargo en biofiltros de lecho escurrido se introduce constantemente ya sea por goteo o aspersion la cantidad de nutrientes necesaria para que los microorganismos puedan subsistir y asimilar el contaminante deseado, en el caso de microorganismos para la desulfuración se utilizan ambos tipos de biofiltros tomando en cuenta que la fuente de energía es el sulfuro de hidrógeno, el medio mineral elegido para alimentar el sistema consta de requerimientos mínimos nutricionales para lograr el objetivo.

Otros parámetros considerados para el funcionamiento son la caída de presión, el contenido de oxígeno que va a depender del tipo de microorganismos utilizados y el tiempo de retención en el sistema.

1.3.4 Tiempo de retención

El tiempo de residencia del gas en un biofiltro es el tiempo que el gas tiene para entrar en contacto con el material biológico hasta su salida, por lo que es el tiempo disponible para que ocurran los procesos de adsorción – oxidación. El tiempo de retención o residencia varía según el contaminante y la capacidad de los organismos para retenerla o esta quede fijada en la biopelícula (30).

El tiempo de retención debe ser lo suficientemente largo para que ocurra la difusión adecuada y se produzca la biodegradación, si la velocidad es demasiado alta se crea el problema que pueda eliminar el agua en el filtro y disminuir la humedad del soporte. En la literatura se describen tiempos de retención basados en el volumen total, y varían entre

los 15 y 150 segundos según algunos estudios, el tiempo de retención para la mayoría de gases contaminantes se encuentran por lo general entre 20 y 60 segundos (31).

El tiempo de residencia se define como el valor del volumen dividido por el flujo de gas entrante y se calcula con la ecuación:

Donde:

Tr: Tiempo de residencia

V: Volumen del Biofiltro

Q: Flujo de Biogás

Cuando se determina el valor real se multiplica la ecuación antes mencionada por la porosidad del soporte.

1.3.5 Tipos de Biofiltros

1.3.5.1 Biofiltros de lecho escurrido

Los biofiltros de lecho escurrido constan de un soporte sintético empacado donde se forma la película microbiana, la corriente de gas ingresa al biorreactor atravesando el lecho al mismo tiempo por la parte superior se añade una solución encargada de aportar los nutrientes necesarios para el crecimiento de los microorganismos, a su vez esta corriente recirculante se encarga de regular el pH, la humedad y eliminar las sustancias producidas por la acción microbiana. La absorción de los gases y la degradación de los contaminantes se dan en el biofiltro a diferencia de los biolavadores (32).

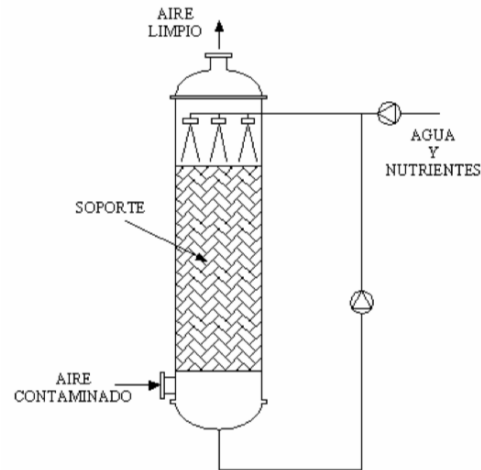


Figura 2 Biofiltro de lecho escurrido o biofiltro de escurrimiento (32)

Los materiales de soporte comúnmente utilizados son polímeros, cerámicas, zeolita, carbón activado o una mezcla de diferentes materiales. Este tipo de filtros no se usan mucho a nivel industrial debido a su complejidad en el control, se suele reciclar el líquido abastecido, sin embargo el número de reciclajes posibles es bastante limitado. Otro valor a tener en cuenta es la utilización de bombas o sopladores que hay que considerar para tener una operación económicamente efectiva. Casi en su totalidad la disminución de los contaminantes se da en la biopelícula microbiana, pero también en cierta escala se da en la fase líquida reciclada debido a la adsorción del contaminante en una solución (14).

1.3.5.2 Biofiltros de lecho fijo

Los biofiltros de lecho fijo poseen como principal característica la falta de una fase líquida móvil, por lo que significa que es una tecnología en la que se usan microorganismos fijados en un medio poroso.

Los microorganismos van a crecer en una capa denominada biopelícula, que se adhiere a la superficie del medio. Para esto el lecho fijo debe estar humedecido, el contaminante es transferido del gas a la biopelícula húmeda donde es metabolizado y transformado. Estos soportes normalmente contienen los suficientes nutrientes inorgánicos para sostener a la población microbiana, en algunas circunstancias el aumento controlado de nutrientes y agua puede tener un buen resultado y ejercer un efecto estimulante (14).

Los soportes orgánicos más utilizados son los diferentes tipos de compost, desechos de madera, turba, bagazo de caña, cascara de cacahuate, entre otros. También han sido evaluados numerosas veces soportes inertes como materiales cerámicos, a los que se les tuvo que añadir los nutrientes necesarios para la sobrevivencia de los microorganismos (14).

Los biofiltros se construyen de una altura no mayor de 1.2m para evitar problemas como la compactación. Comúnmente se usan humidificadores antes del paso por el biofiltro para mantener la humedad dentro del soporte (13).

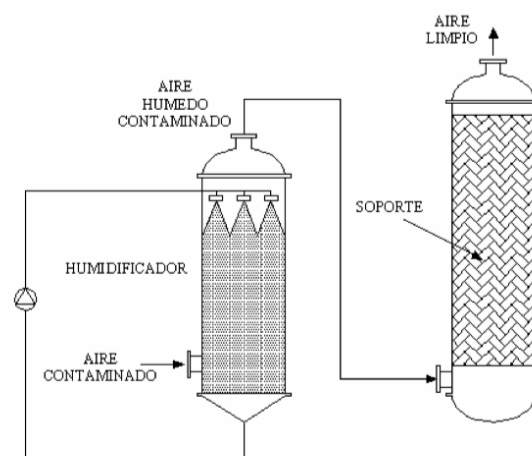


Figura 3 Biofiltro de lecho fijo con sistema de humidificación (32)

Son utilizados por lo general para contaminantes con baja solubilidad en agua como el sulfuro de hidrógeno, tiene poco control interno de los procesos biológicos y requiere irrigación directa pero interrumpida, la adición de esta forma de agua, nutrientes y soluciones amortiguadoras, mantienen controlada la humedad, por lo que se mantiene a su menor capacidad, funcionando como estimulante para el crecimiento de microorganismos (13).

La mayor ventaja que posee este tipo de biofiltros es la facilidad para ponerlos en marcha y su capacidad para soportar flujos intermitentes de contaminantes o gases a purificar,

son favorables en plantas con flujos no continuos, esto debido a la capacidad del soporte para proveer los nutrientes necesarios para la sobrevivencia del material biológico.

1.4 El compost, material de soporte

La generación de diferentes residuos orgánicos en la distintas actividades humanas y que se origina producto del ciclo vital y como consecuencia de las funciones fisiológicas de mantenimiento y perpetuación o son producto de la explotación del hombre por los recursos bióticos, son muchas veces desaprovechados y eliminados, cuando el potencial de reutilización es importante, su utilización en procesos como compostaje o generación de biogás para introducirse en el ciclo productivo de las actividades humanas como fuente energética en el caso del biogás o como fertilizante en el caso del compost pueden ser una fuente económica importante en lugares que generen gran cantidad de esos desechos (33).

Las principales fuentes de residuos orgánicos son:

- Actividades agropecuarias
- Actividad agroindustrial
- Industria láctea
- Industria frigorífica
- Industria cerealera
- Industria aceitera y granos oleaginosos
- Industria de la pesca
- Industria forestal
- Residuos sólidos urbanos

El tratamiento de los residuos orgánicos va a depender principalmente de un diagnóstico objetivo de la problemática ambiental que tenga un sector determinado, estas alternativas deben ser adecuadas para las características zonales, por lo que tienen que ser viables económicamente y sustentables ecológicamente. Las principales alternativas manejadas para lograr la reutilización de estos residuos han sido (33):

- Como fuente de alimento animal
- Como fuente energética

- Como fuente de abonos (33)

El compost es producto de un proceso biológico aerobio de óxido-reducción de materia orgánica (Biodigestión), realizada por una sucesión dinámica de microorganismos a partir de cuya actividad se empieza a generar calor elevando la temperatura por encima de los 50°C durante varios días de manera consecutiva, esta elevación de temperatura se va a encargar de eliminar los patógenos y origina un producto estable e inocuo al que denominamos compost, utilizada para mejorar el suelo agrícola (34).

Los microorganismos utilizan la materia orgánica como fuente de nutrientes para su desarrollo, lo que genera la descomposición (mineralización) de esta materia hasta moléculas orgánicas e inorgánicas, más sencillas, en el proceso de humificación se originan estas nuevas macromoléculas a partir de moléculas más sencillas que se forman en el proceso de descomposición, principalmente se produce CO₂, H₂O y compuestos húmicos (35).

El proceso de compostaje incluye una serie de etapas según la actividad biológica de los microorganismos que actúan.

Fase mesófila se caracteriza por la disponibilidad de materia orgánica y de compuestos fácilmente metabolizables. En esta etapa las condiciones aeróbicas y el aporte de materia orgánica favorecen el crecimiento del material biológico, dándose en un rango de temperatura entre 20-30°C. Los azúcares, proteínas, lípidos y almidón conforman estos compuestos fácilmente degradables, predomina una comunidad de microorganismos aeróbicos (36).

Fase termófila en esta etapa se pueden alcanzar altas temperaturas lo normal esta entre 40 y 60°C aunque se han registrado casos en que la temperatura puede llegar a 80°C (36). La micro flora mesófila es sustituida por una micro flora termófila debido a la acción de bacilos y actinomicetos termófilos, en esta etapa se eliminan todos los patógenos, hongos esporas, semillas y elementos biológicos indeseables. Si se tiene una adecuada compactación y ventilación, suelen notarse vapores de agua, lo que juega un rol importante en el control de larvas e insectos. Se incrementa la cantidad de CO₂ que será letal para las larvas, por lo que el proceso se vuelve anaerobio (33).

Fase de maduración, acabada la fase termófila viene una segunda etapa mesófila o de enfriamiento que se denominará de maduración, la temperatura desciende hasta los 25°C habiendo una recolonización de los microorganismos mesófilos, se realizan volteos periódicos para disminuir la temperatura. En esta etapa van a haber procesos de humificación de la materia orgánica. El consumo de compuestos de fácil degradación y el agotamiento de polímeros sencillos en las primeras etapas hace que las fuentes de energía estén limitadas. Las fuentes de nutrientes en esta etapa serán compuestos de difícil degradación como celulosa o lignina. Al finalizar esta etapa tendremos un compost maduro sin olores y apto para su uso o almacenamiento (36).

Las propiedades tanto físicas como químicas que tendrá el compost van a depender de varios factores entre los principales se encuentran: los residuos orgánicos utilizados, la duración de la etapa de descomposición y las condiciones utilizadas durante el proceso (37). Donde las variables principales van a ser la oxigenación, Temperatura, Humedad, Relación Carbono/nitrógeno, pH, materia orgánica (38).

Oxigenación el compostaje es un proceso aeróbico, donde se produce la oxidación biológica, es decir es necesaria la presencia de oxígeno dado que los microorganismos lo utilizan como aceptor de electrones terminales para su respiración. La función de los procedimientos de aireación ya sea el volteo o la adición de oxígeno por algún método permite que no se convierta en un factor limitante. Es necesario que el valor de oxígeno circulante no decaiga del 18% (38). Estudios recomiendan el uso de sistemas de soplado para el proceso de compostaje para evitar su decaimiento sin embargo esto genera aumento en los costos de producción. La caída de oxígeno puede ser diagnosticada al aparecer excesivos olores nauseabundos fruto de respiraciones anaerobias (33).

Temperatura. En todo el proceso de digestión la masa de los materiales sometidos a compostaje sufren cambios durante las diferentes etapas debido a la interacción de los microorganismos. La temperatura rápidamente y en pocos días se eleva por encima de los 45°C debido al metabolismo exotérmico lo que genera el aumento de la temperatura. El proceso se realiza entre temperaturas de 35 a 55°C, pero el proceso lleva a una elevación por encima de los 60°C para la eliminación de patógenos y semillas (39). El control de la temperatura es importante pues no se debe mantener las altas temperaturas por periodos

muy largos, la fase termofílica inicial puede ser útil para controlar el crecimiento y proliferación de patógenos, sin embargo después de esta etapa se deben reducir las temperaturas a niveles que permitan el desarrollo de eumicetos y actinomicetos que son descomponedores de cadenas largas de celulosa o lignina. El control de temperatura se permite gracias al volteo de pila o a la aireación que favorece el enfriamiento (38).

Humedad, el agua se produce durante el proceso de compostaje debido al metabolismo de los microorganismos y se evapora debido a la acción de la aireación y el efecto de la temperatura. El agua es producto de la respiración aeróbica, mientras que la evaporación es producto de la temperatura (40). En el proceso el contenido de agua varía durante todo el tiempo de compostaje. Los valores bajos indican la deshidratación de la pila lo que detiene el proceso, grandes cantidades originan la obstrucción de los poros y por lo tanto interfieren en la aireación del sistema. Muchas veces al realizar el clasificado y elaboración de la pila inicial de compostaje tenemos un nivel de humedad muy bajo, en este caso se puede mezclar con lodos o aumentar agua hasta lograr entre un 60 a 70% de humedad este rango caerá hasta en un 30% durante todo el proceso (38). Siempre se realizan riegos para mantener estos niveles en rangos que permitan un adecuado compostaje.

Relación Carbono/Nitrógeno el rango de C/N es un importante indicador en un sistema de digestión aeróbica, en la mayoría de estudios es recomendado una relación en el rango de 20 a 30 C/N, siendo una relación de 25/1 el óptimo para el crecimiento de bacterias o microorganismos encargados del compostaje, una relación fuera del rango adecuado puede generar una alta liberación de nitrógeno amoniacal total y/o una acumulación de ácidos grasos volátiles (41), estos compuestos son posibles inhibidores del proceso de biodigestión. Un rango más alto de 35 C/N genera que los microorganismos deban pasar por muchos ciclos para poder oxidar el exceso de carbono lo que deriva en un aumento del tiempo en el proceso. Lo más importante es realizar la corrección de estos valores antes del periodo de compostaje (38). Durante el proceso de compostaje la relación C/N varía según la etapa del proceso por lo que su relación inicial está recomendada, algunas pruebas se realizaron con tasas de hasta 40 C/N obteniendo buenos resultados hay que tener en cuenta que pueden haber fuentes de carbono lentas, o impurezas que pueden demorar o no biodegradarse, por lo que el cálculo de la relación se debe basar en el carbono biodegradable (42).

Tabla 2 Valores de relación C/N de algunos materiales compostables (33)

	%C	%N	C/N
Aserrines	40	0.1	400
Podas, tallos, maíz	45	0.3	150
Paja de caña	40	0.5	80
Hojas de árboles	40	1	40
Estiércol de equino	15	0.5	30
Estiércol ovino	16	0.8	20
Heno	40	2	20
Estiércol bovino	7	0.5	15
Estiércol suino	8	0,7	12
Estiércol de gallina	15	1.5	10
Harina de sangre	35	15	2

pH, La materia a compostar puede tener diferentes rangos de pH se ha visto que con altos valores de pH también pueden ser compostados, sin embargo se ha establecido que los valores óptimos se encuentran en el rango de 5.5 a 8, este rango se debe principalmente a la preferencia de los microorganismos compostadores encargados del proceso, las bacterias por lo general prefieren un pH más cercano al neutro mientras los hongos en un ambiente ligeramente ácido (38). El pH dentro del proceso de compostaje varía según la etapa hubieron estudios en los que se compostó con un rango ligeramente ácido, este pH aumento con el pasar de los días para finalmente regularse entre 7 y 9 (40). La variación de pH en el inicio del compostaje tiende a acidificarse debido a la formación de ácidos orgánicos. En la fase termófila, debido a la formación de amoníaco el pH tiende a subir y

alcalinizarse, para finalmente estabilizarse en un rango neutro. El pH determina el crecimiento microbiano y cada uno de estos tiene un pH óptimo (43).

Materia Orgánica, para lograr un compostaje en el menor tiempo posible a una escala industrial o de ser necesario el tamaño de las partículas a compostar o que serán biodegradadas por los microorganismos deben ser sometidos a una reducción de tamaño (38). El propósito principal de esto es aumentar el área superficial de la materia, mientras el tamaño de partícula sea menor el área superficial aumentará. La velocidad de oxidación biológica es directamente proporcional a la cantidad de superficie que está expuesta a un agente reactivo. La práctica ha demostrado que la reducción de este tamaño de partícula tiene un límite pues puede producir efectos en la aireación del material al reducir los canales de circulación de aire. Materiales de gran tamaño crean canales de aireación que producen la reducción de temperatura de la pila y generan una desaceleración en el proceso, partículas con un tamaño muy pequeño poseen gran cantidad de superficie porosa que produce retención de agua y aumento de la humedad lo que facilita la compactación evitando la formación de canales de aireación generándose un sistema en estado anaerobio (38) (43).

1.4.1 Microorganismos en el proceso de compostaje

Durante todo el proceso de compostaje se lleva a cabo una gran cantidad y compleja sucesión de procesos metabólicos y con ello poblaciones microbianas con capacidades para degradar materia orgánica de estructura compleja (44). La descripción de todos los microorganismos participantes es complicada debido a la cantidad que participan en el proceso, cada etapa se caracteriza por la participación de algunos tipos según su capacidad de crecer a diferentes valores de pH y temperatura (44). Una amplia diversidad de microorganismos conforman consorcios y poblaciones mixtas durante el proceso, la mayor cantidad son bacterias pero también hay presentes actinomicetos y hongos filamentosos (45).

Las bacterias representan entre el 80 y 90% de los microorganismos involucrados en el proceso de compostaje, según la temperatura las bacterias van trabajando de manera óptima y según la etapa del proceso delimitada por la también generación de CO₂, las bacterias crecen en las condiciones favorables y mueren cuando las condiciones no son

las más favorables. En la primera etapa del compostaje o etapa mesófila la temperatura puede llegar hasta los 40°C, alrededor de la primera etapa que se han encontrado bacterias como *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Thiobacillus* y *Enterobacter*, o bacterias celulolíticas y también hongos (45). El calor que se genera durante esta etapa va a dar lugar a la siguiente etapa antes descrita como termófila, donde actúan bacterias capaces de soportar temperaturas de hasta 75°C, la actividad de estas bacterias no dura mucho de 3 a 5 días por lo que remover el sistema para proveer oxígeno ayuda a la actividad de las mismas, los microorganismos mesófilos son parcialmente eliminados algunas especies como el género *bacillus* sobreviven a las temperaturas altas, hongos termotolerantes también soportan las altas temperaturas (46) (45). Los Actinomicetos son generalmente más tolerantes que los hongos y su número aumenta activamente, en esta etapa bacterias del género *Thermus*, *Bacillus* y *Heterotrophic* actúan en el proceso, hongos como el *Mucor*, *Aspergillus*, *Torula termophilus* y otras especies también están presentes (45) (44).

Finalmente en la fase de enfriamiento, de maduración o mesófila 2, los microorganismos termófilos desaparecen, aumenta la aparición de actinomicetos mesófilos y de hongos filamentosos con la capacidad de degradar polímeros complejos, la presencia de bacterias representa el 80% del recuento total con una mínima proporción de bacterias esporuladas, los microorganismos en esta etapa están relacionados con actividades proteolíticas, amonificantes, aminolíticas y celulolíticas, también se han encontrado bacterias fijadoras de nitrógeno, desnitrificadoras y consumidoras de azufre (44).

El compost bien fermentado produce la esterilización de sí mismo eliminando microorganismos patógenos gracias a las actividades metabólicas de ellos mismos, producción de fermentos, aumentos de temperatura y competencia por nutrientes permite que solo permanezcan al final microorganismos importantes en este proceso, la fase final de maduración y bioestabilización dura varios días con microorganismos que ayudan en la reducción de contaminantes y malos olores, que logran un producto apto para su utilización como fertilizante (45).

1.5 Bacterias azufre oxidantes y ciclo del azufre

El azufre en la naturaleza existe en 9 diferentes estados de oxidación desde 6 hasta -2, sin embargo de todos estos solo 3 se encuentra de manera abundante, estos son -2 en forma de un anión hidrosulfuro (HS^-), en forma elemental (S) y en forma de sulfato (SO_4^-) (32).

El azufre va cambiando en la naturaleza producto de las transformaciones a las que se ve sometido por procesos químicos, geológicos y biológicos (47). Los procesos biológicos generan un ciclo de transformación del azufre como se ve en la figura 4 (47).

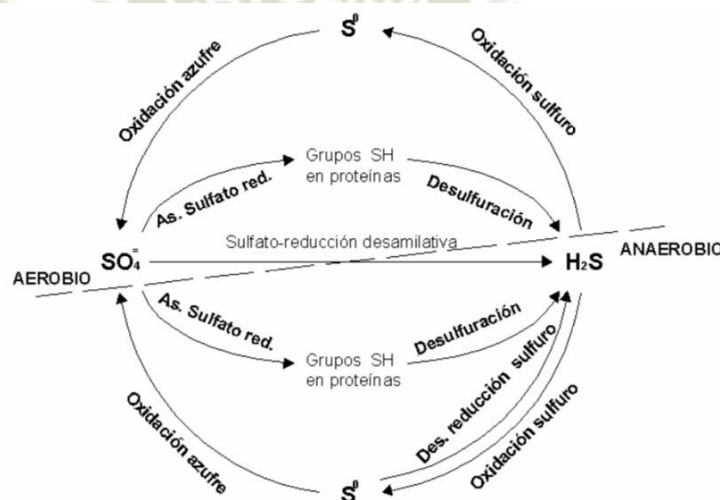


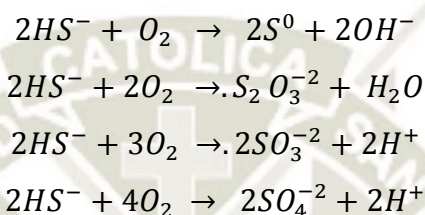
Figura 4 Ciclo Biológico del azufre según Lomans et al., 2002 (47)

Esta transformación del azufre por microorganismos es conocido como *sulfuretum* (31), este es un sistema el cual está representado por comunidades de bacterias sulfato reductoras y de igual manera bacterias sulfato oxidantes envueltas en un ciclo biológico de azufre, este ciclo es una combinación de una etapa pequeña de transformación entre el azufre elemental y el sulfuro, y una etapa larga la cual comprende entre sulfatos y sulfuros (48).

La oxidación del Sulfuro de Hidrógeno a sulfatos o a azufre elemental se realiza por aerobiosis en presencia de bacterias quimioautótrofas incoloras del azufre o en anaerobiosis generalmente por baterías fotoautótrofas, estas oxidaciones dan lugar a iones hidrógeno que producen la acidificación del medio (33).

Las bacterias fotoautótrofas llevan el sulfuro a azufre elemental (S^0), mientras las bacterias quimioautótrofas en presencia del oxígeno convierten el sulfuro de hidrógeno en SO_4^{2-} (49).

La oxidación química del sulfuro es compleja, esto se debe a los diferentes intermediarios y productos que se van a ir generando durante pase la reacción, los principales compuestos identificados como estos son: el azufre elemental, tiosulfato, sulfito y el sulfato. Estos compuestos son generados de acuerdo a las siguientes ecuaciones (50):



Este proceso es realizado por microorganismos y su importancia e interés por realizar el tratamiento mediante procesos biológicos como alternativa a procesos ya sean físicos o químicos se debe a: los seres vivos necesitan azufre para su metabolismo celular, el 1% del peso que poseen las bacterias es azufre; en la industria química existe la demanda por azufre en estado elemental para la producción de ácido sulfúrico; y debido a las emisiones que poseen azufre se origina uno de los principales problemas ambientales como es la lluvia ácida (51).

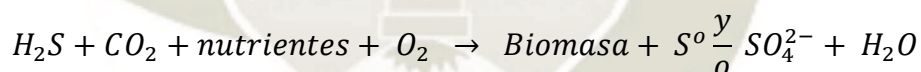
Existe una gran variedad de bacterias con la capacidad de oxidar el sulfuro de hidrógeno y que pueden ser utilizadas para procesos de desulfuración. Encontramos bacterias que crecen en condiciones tanto alcalinas, neutras como ácidas, y de la misma manera con rangos de temperatura variados, géneros como *Acidianus*, *Acidithiobacillus*, *Aquaspirillum*, *Aquifex*, *Bacillus*, *Beggiota*, *Methylobacterium*, *Paracoccus*, *Pseudomonas*, *Starkeya*, *Sulfolobus*, *Thermitiobacillus*, *Thiobacillus* y *Xanthobacter*. Bacterias anaerobias oxidadoras de azufre comúnmente neutrófilas y mesófilas como *Allochromatium*, *Chlorobium*, *Thodopseudomonas*, *Thodovulum* y *thiocapsa* (14).

Quimioatótrofas: Este tipo de bacterias no necesitan la presencia de luz y utilizan la oxidación de compuestos reducidos de azufre para generar energía para su crecimiento, entre este tipo de bacterias encontramos diferentes tipos habiendo heterótrofas

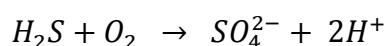
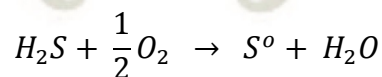
dependientes de carbono orgánico para su crecimiento o facultativas, algunas de estas utilizan el carbono como agente limitante obteniendo energía de la oxidación de compuestos reducidos de azufre. En su mayoría de casos la biodegradación ocurre con la presencia de O₂ como aceptor de electrones o condiciones anaerobias con aceptadores de electrones alternativos (49). Entre los quimiotróficos el subgrupo más utilizado para la desulfuración son los litotróficos capaces de crecimiento autótrofo y tienen tasas de oxidación de sulfuros considerables, requerimientos nutricionales muy elementales y alta afinidad por el sulfuro y el oxígeno lo que les permite crecer en biorreactores con oxígeno limitado (52).

Los mixotrofos, son microorganismos que presentan un metabolismo facultativo que les permite la utilización de una fuente de carbono orgánica o inorgánica y la utilización de compuestos reducidos de azufre para conseguir la energía necesaria para su crecimiento (14).

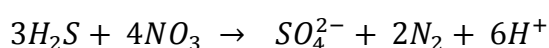
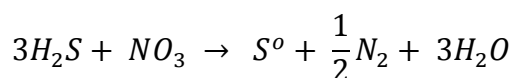
Hay diferentes microorganismos que tienen la capacidad de realizar la desulfuración y su metabolismo funciona de manera diferente según sus necesidades, para un sistema de desulfuración aerobia o con oxígeno limitante la reacción será la siguiente (49):



Se han propuesto reacciones simplificadas tanto para rutas metabólicas con la presencia y ausencia de oxígeno (31) (53):

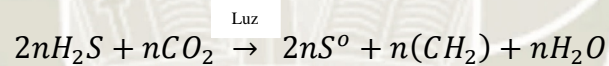


En anaerobiosis

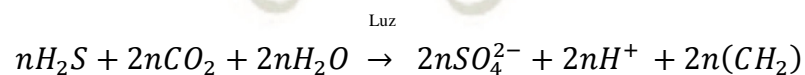


La mayor cantidad de pruebas para la desulfuración se realizaron con bacterias del género *Thiobacillus*, que presenta diferentes especies entre las *thiooxidans*, *ferrooxidans* y *denitrificans* que en este último caso requieren de una fuente de nitrógeno, cepas de *clostridium* y *bacillus* se evaluaron observándose que facilitaban la fijación de CO₂, la oxidación de sulfuros y reducción de nitrato (14). Otras bacterias evaluadas y puestas a prueba fueron la *pseudomona*, *Citrobacter* y *Enterobacter*, donde se observó una reducción en compuestos fenólicos y sulfuro de hidrógeno.

Fotoautótroficas: este tipo de bacterias requieren la presencia de luz o fotoperiodos para tener un óptimo crecimiento, para la desulfuración de efluentes con sulfuro de hidrógeno se ha encontrado un tipo de bacteria verde sulfurosa como *Chlorobium limícola*, encargada de remover el H₂S en presencia de luz, CO₂ Y nutrientes inorgánicos, bajo condiciones estrictamente inorgánicas, llegando hasta la formación de sulfato o solo a la formación de azufre. Estas células no son móviles y depositan de manera extracelular el azufre elemental por lo que los hace adecuados para recuperar azufre en diferentes efluentes (14) (49).



Sin embargo, la cantidad de luz va influir en la cantidad de sulfuro metabolizado una sobrecarga de sulfuro produce una acumulación del mismo, pero una disminución de este con un aumento de la luz lo que origina es la formación de sulfatos como se muestra en la ecuación (49):



La *C. limícola* presenta una absorción de luz entre 350 y 850nm con un pico a 760, estudios y varios autores describen que el crecimiento se da en estanques poco profundos y ricos en materia orgánica, las bacterias crecen cerca a la superficie del agua sin acercarse a la superficie para no tener contacto con el oxígeno, pudiendo desarrollarse en condiciones de anaerobiosis con la presencia de luz (49).

Tabla 3 Algunas Bacterias Sulfoxidantes estudiadas agrupadas según el pH (51)

Género y especie	pH de Crecimiento
Bacterias Neutrófilas	
<i>Thiobacillus thioparus</i>	6 a 8
<i>Thiobacillus denitrificans</i>	6 a 8
<i>Thiobacillus neapolitanus</i>	6 a 8
Bacterias Acidófilas	
<i>Thiobacillus thiooxidans</i>	2 a 5
<i>Thiobacillus ferrooxidans</i>	1.5 a 4
<i>Thiobacillus novellus</i>	6 a 8
<i>Thiobacillus intermedius</i>	3 a 7
<i>Thiobacillus concretivorus</i>	ND
<i>Beggiatoa</i>	6 a 8
<i>Thiothrix</i>	6 a 8
<i>Thermothix</i>	6.5 a 7.5
<i>Thiovolum</i>	6 a 8
<i>Acidianus</i>	1 a 5
<i>Sulfolobus</i>	1 a 4
Bacterias Alcalófilas	
<i>Bacillus alcalophilus</i>	8 a 11
<i>Bacillus firmus</i>	7 a 11.4
<i>Bacillus strain YN-2000</i>	7.5 a 10.2
<i>Bacillus. halodurans C-125</i>	7 a 10.5
<i>Thioalcalimicrobium aerophilum</i> gen nov., sp	7.5 a 10.6
<i>Thioalcalimicrobium sibericum</i> sp, nov	7.5 a 10.6
<i>Thioalcalovibrio nitratis</i> sp, nov.	9 a 11
<i>Thioalcalivibrio denitrificans</i> sp. nov	9 a 11
<i>Thioalkalivibrio versutus</i> s.p. gen. nov.	9 a 11
<i>Thioalkalivibrio nitratos</i> s.p. nov	9 a 11
<i>Thioalkalivibrio thiocyanoxidans</i> sp. nov	9 a 11

CAPITULO II

MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Lugar de Investigación

La investigación se realizó en los laboratorios de la universidad católica de Santa María ubicados en el pabellón H y en la planta piloto de producción de biogás perteneciente a la universidad en la sede de El Pedregal - Majes

2.2 Materiales

Material de vidrio

- Matraces de 100 y 250ml
- Vasos de precipitado de 100 y 250ml
- Probeta de 100ml
- Pipetas de 5 y 10ml
- Propipeta
- Laminas porta objetos
- Laminas cubreobjetos
- Frascos de vidrio de 100ml
- Tubos de ensayo de 10ml

Equipos de laboratorio

- Autoclave
- Espectrofotómetro "Shimadzu UV-160A"
- Potenciómetro "Jenway 3510"
- Medidor de gases "Biogas5000"
- Agitador
- Balanza analítica "Ohaus"

- Estufa “Selecta”

Material biológico

- Compost

Otros materiales

- Tubos de PVC de 1.5’
- Niples de metal ¼’
- Uniones de metal ¼’
- Reducción de metal de ¾’ a ¼’
- Manguera de ¾’
- Fluómetro de gases 10 l/min
- Filtro acero INOX

Reactivos

- NPK 15-15-15
- Tiosulfato de sodio
- Carbonato de calcio

2.3 Métodos

2.3.1 Elaboración de Compost

El proceso de compostaje se realizó con material orgánico proveniente de los desechos obtenidos en restaurant – menú de la ciudad de Arequipa, estos restos consistieron de cascara de papa, cascara de zanahoria y restos de lechuga fueron triturados y reducidos a un promedio de 20mm de tamaño de partícula para facilitar la biodegradación, para lograr el óptimo equilibrio de C/N y colocar la debida carga microbiana se utilizó estiércol vacuno con restos de paja, césped podado y compost maduro, El método de compostaje utilizado se denomina el método de la pila, para este método se requiere la mezcla de los residuos en una pila que tiene las dimensiones de 1m² por 60cm de altura, y su

composición en la relación siguiente: desechos orgánicos 25kg, estiércol vacuno con restos de paja: 5kg, restos de poda de césped: 5kg, compost maduro 5kg. Generando un total de 40kg, estos se dispusieron en pila, se irrigó generando la humidificación de toda esta mezcla y se tapó para mantener la pila bajo protección de algunos agentes externos y mantener la temperatura dentro de la pila para empezar el proceso de biodegradación.

El compost fue controlado revisando la humedad con la prueba del puño la cual se basa en que la humedad adecuada debe solo generar humedad en la mano sin escurrimientos al apretar una porción de compost como lo indican diversos manuales de compostaje (54). El volteo del compost se realizó cada 2 o 3 días para favorecer la aireación y dependiendo del grado de humedad de la pila, se irrigó cada que se necesitó no necesariamente cada 2 o 3 días del volteo sino cuando era necesario. El proceso de compostaje se realizó en un periodo de 4 meses que comprende todas las etapas de maduración de compost.

2.3.2 Caracterización de compost

◆ pH

Para la determinación de pH se utiliza una dilución 1:5, por lo cual se pesó 10g de compost colocados en un beaker y se añadió 50ml de agua destilada y se agito por un periodo de 15 minutos para luego dejar reposar por un periodo de 15 minutos, posteriormente se midió el pH con un potenciómetro debidamente calibrado.

◆ Humedad

Para la determinación de humedad se pesó 10g. De compost y se colocó en la estufa a 70°C por 48h, luego se pesó nuevamente. Para la determinación del porcentaje de humedad se utilizó la siguiente formula:

$$\% \text{ de humedad} = \frac{\text{Masa muestra húmeda} - \text{masa muestra seca}}{\text{Masa muestra húmeda}} \times 100$$

◆ Ceniza

Para la determinación del porcentaje de cenizas se pesó 2g. de compost, se colocó en un crisol el cual fue pesado antes de colocar la muestra, posteriormente se colocó en una mufla a 550°C por un periodo de tiempo de 2hr. Luego se retiró y pesó el crisol, con el uso del crisol pesado anteriormente sin muestra se pudo determinar el nuevo peso de la muestra ya calcinada. La prueba se realizó por triplicado. Se utilizaron las siguientes fórmulas para la determinación de %cenizas, %de materia orgánica y % de Carbono orgánico:

$$\%Cenizas = \frac{\text{Peso muestra Calcinada}}{\text{Peso de la muestra sin calcinar}} \times 100$$

$$\%Materia horganica = 100 - \% cenizas$$

$$\%Carbono Organico = \frac{\% Materica organica}{1.724}$$

Dónde: el 1.724 es el factor Van Benmelen

◆ Densidad

Se determinó la densidad aparente y densidad real del compost elaborado para lo cual se utilizó el método de desplazamiento de líquido (55), el mismo que consiste en colocar 10gr. de compost en una probeta y agregar lentamente inclinando la probeta 70 ml medidos en otra probeta, se leyó el nuevo volumen de agua y se apuntó el resultado para calcular la densidad aparente, la densidad real se tomó luego de dejar reposar la mezcla esperando que dejara de burbujear, el nuevo volumen se utilizó para calcular la densidad real.

$$d = m/v$$

◆ **Determinación de tamaño de partículas**

Para la determinación de los tamaños de partículas se utilizaron mallas de tamizado de diferente tamaño, de 1, 4 y 8mm. Se pesó 25g. de compost y se procedió a tamizar para luego pesar la muestra obtenida.

2.3.3 Aislamiento de microorganismos

Para el cultivo de los microorganismos sulfooxidantes se buscó un medio de cultivo específico para la propagación de estos por lo que se basó en el medio utilizado por Mora(56). Se utilizó 10g de compost fresco y se colocó en 50ml de agua destilada, se agitó constantemente por un periodo de 15 minutos y se dejó reposar por 15 minutos adicionales para generar la sedimentación de compuestos más pesados del compost, se extrajo 10ml de sobrenadante que se colocaron en el medio de cultivo.

El medio mineral utilizado compuesto de NPK triple 15, 10g/l; CaCO_3 , 1g/l; $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, 5g/l (56). Se controló que el pH se encontrara en valor de 7 (neutro). El tiempo de incubación fue de 72 horas a temperatura ambiente (20°C) y por 4 días posteriores a este tiempo se visualizó al microscopio el crecimiento microbiano.

2.3.4 Diseño de filtro escala de laboratorio

Los filtros fueron diseñados en base a los tiempos de retención elementales para el buen funcionamiento de un biofiltro y estimados anteriormente para evaluarlos, estos están determinados por factores limitantes siendo este el caso en que el flujo de biogás disponible es un factor a tomar en cuenta, la evaluación se llevó a cabo fijando un tiempo de retención máximo y un mínimo tomando en cuenta lo antes mencionado. Los tiempos de retención evaluados fueron de 20 y 40 segundos, determinados por los flujos de 1 y 0.5 l/min (0.06 y $0.03\text{m}^3/\text{h}$) y basándonos en la fórmula de tiempo de retención. Los diseños de los filtros se realizaron tanto en 2D como en 3D con el uso del programa de diseño FUSION3D de autodesk.

La fórmula de tiempo de retención utilizada es la siguiente:

$$Tr = \frac{V}{Q}$$

Donde:

Tr= Tiempo de retención

V= volumen

Q= Flujo de Biogás

El volumen del filtro determinado será de 0.33l.

2.3.5 Evaluación de filtros a escala de laboratorio

Para evaluar el funcionamiento en escala de laboratorio se construyeron 6 filtros debido al diseño experimental propuesto, el mismo que consistió de un diseño factorial multinivel 3X2, realizándose las mediciones de manera aleatoria y por triplicado, los parámetros dispuestos para la evaluación fueron: 3 variantes del compost (autoclavado, normal y bioaumentado) y se evaluó 2 flujos diferentes (1l/min, 0.5l/min).

Cada soporte (compost) fue pesado y almacenado de manera adecuada para su utilización, para lo cual se pesó en cada caso 150gr de compost. Colocados en bolsas de polipropileno debidamente rotulados, en el caso de las inertes estas fueron autoclavadas 121°C por 15min como dispone el método y luego almacenadas, las que contuvieron compost en estado natural solo se pesaron y almacenaron, en el caso de las bioaumentadas se inocularon con 20ml de medio de cultivo liquido distribuidos en el soporte para obtener una concentración de 10^6 mco/ml el conteo de células se hizo con el uso de la cámara de Neubauer, esto se realizó 24 horas antes para permitir que haya proliferación en el soporte.

Tabla 4 Diseño experimental de evaluación de filtros a escala de laboratorio

VARIABLES CODIFICADAS			VARIABLES REALES		
BLOQUE	COMPOST	FLUJO	COMPOST	FLUJO (m ³ /h)	FLUJO (L/Min)
1	-1	1	Autoclavado	0.06	1
1	0	-1	Normal	0.03	0.5
1	-1	-1	Autoclavado	0.03	0.5
1	1	1	Aumentado	0.06	1
1	1	-1	Aumentado	0.03	0.5
1	0	1	Normal	0.06	1
2	0	1	Normal	0.06	1
2	1	-1	Aumentado	0.03	0.5
2	0	-1	Normal	0.03	0.5
2	-1	1	Autoclavado	0.06	1
2	-1	-1	Autoclavado	0.03	0.5
2	1	1	Aumentado	0.06	1
3	1	-1	Aumentado	0.03	0.5
3	0	-1	Normal	0.03	0.5
3	1	1	Aumentado	0.06	1
3	-1	1	Autoclavado	0.06	1
3	0	1	Normal	0.06	1
3	-1	-1	Autoclavado	0.03	0.5

Cada medición se realizó según la tabla propuesta respetando la aleatorización, siempre realizando la circulación del biogás por un tiempo de 5 a 10 minutos antes de las respectivas mediciones para realizar una purga del sistema evitando de esta manera mediciones con la presencia de aire antes contenido en los filtros que pudiesen alterar los resultados.

2.3.6 Escalamiento de Filtro

Para el escalamiento piloto se tomaron en cuenta algunos parámetros en el dimensionado de alto y diámetro interior, basándose en los valores: flujo de biogás, tiempo de retención y la relación H/D,

$$\frac{H}{D} = 7.63$$

El valor de H/D se determinó a partir de las dimensiones utilizadas por los filtros a escala de laboratorio donde:

H= altura

D= diámetro

$$Tr = \frac{V}{Q}$$

Donde:

Tr= Tiempo de retención

V= volumen

Q= Flujo de Biogás

Con el valor del tiempo de retención que es el mismo que tenemos que tener en los filtros de escala de laboratorio como de escala piloto, podemos determinar el nuevo volumen necesario según el flujo de biogás que podamos disponer, en este caso el flujo es el que determinara hasta que punto podemos escalar el filtro debido a que es un factor limitante que depende de la producción de la planta.

Con un valor de volumen determinado por el flujo podemos determinar tanto el valor del diámetro con la altura utilizando la ecuación antes propuesta de H/D y la formula de volumen para un cilindro:

$$V=H.A$$

Donde:

H=Altura

A= Área de la base circular.

De la misma manera que con los filtros a escala de laboratorio el diseño se realizó tanto en 2D como en 3D con el uso del programa FUSION360 de autodesk. Los materiales de construcción también se toman en cuenta en este punto seleccionándose acero INOX para su construcción, con el uso de conectores de PVC para uniones, Niples y llaves.

2.3.7 Evaluación de filtro piloto

La evaluación del filtro piloto se realizó con el soporte elegido entre los 3 evaluados, así como un flujo de los 2 evaluados. La instalación se realizó de la misma forma que los de escala de laboratorio con la entrada en la parte superior del filtro y las salida por la parte inferior, la carga del soporte se realiza 24 horas antes de la evaluación en el sistema, en la parte superior como inferior se utilizaron 2 llaves de paso una para el ingreso al filtro y la otra que permita la salida antes de entrar al filtro por cuestiones de seguridad y como punto de muestreo para la medición del biogás, por estos mismos puntos de muestreo se pudo hacer la medición del flujo de entrada utilizando un medidor de flujo para determinar que sea el estipulado y se dejó filtrar para la primera medición se dejó filtrando durante un periodo de 5 a 10 minutos para realizar la purga del sistema que eliminase la presencia del aire contenido en el filtro se realizó 5 mediciones en diferentes tiempos que permitieran la evaluación del filtro, para lo que se filtró 500l de biogás.

CAPITULO III

RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1 Elaboración y caracterización de compost

El compost fue obtenido por el método de pila para lo que los residuos orgánicos recolectados que se producen en los restaurantes – menú de la ciudad de Arequipa fueron sometidos al proceso de digestión aerobia, estos residuos que incluyeron tanto cascara de papa, zanahoria y restos de lechuga fueron mezclados con restos de poda y estiércol bovino con paja para darle la carga de microorganismos necesaria, las cantidades utilizadas de cada uno de los residuos son complementarios entre sí para poder obtener la relación de C:N necesaria para una adecuada descomposición. Estos valores terminan siendo determinantes pues un desbalance en esta relación suele causar disminución de la capacidad biodegradable de los microorganismos debido a que un aumento en el valor del carbono disminuye la tasa de crecimiento y en caso contrario en un exceso de nitrógeno este puede solubilizarse causando una pérdida del mismo por amoníaco gaseoso (39). La mezcla obtenida se puede visualizar en la figura 5, el método abarca el proceso de volteado cada 2 o 3 días y humedecido según su necesidad tuvo un tiempo de maduración de 4 meses para estar apto para su uso, los indicadores de maduración nos muestran que tiene una textura adecuada color pardusco y sin rastros de los componentes principales, sin excesiva humedad y algo granuloso como se ve en la figura 5 (lado derecho). El compost maduro obtenido se pudo ver algunas granulidades producto de la humedad y estiércol así como residuos que se aglutinaron formando granos más pequeños pero que se encontraban dentro los límites requeridos como veremos más adelante.

Todas estas características utilizadas luego de los 4 meses de compostaje fueron relacionadas con características señaladas como indicadores de maduración en algunos manuales de compostaje que permiten realizar compostaje casero (54). Pero se tomó como confirmación los valores obtenidos por la caracterización fisicoquímica y que esta se encuentre dentro de los valores que son considerados como óptimos por las diferentes normativas.



Figura 5 Compost inmaduro (Izquierda), compost Maduro (derecha)

El compost luego de los 4 meses de maduración y con las características consideradas óptimas fue llevado al laboratorio para una caracterización elemental fisicoquímica a fin de comprobar que sus propiedades estén de acuerdo con valores aceptados por diferentes normativas y conocer las propiedades que puede aportar como un soporte para la biofiltración pues las características que deben tener deben favorecer el crecimiento de microorganismos y fomentar la degradación de los contaminantes requeridos.

En el laboratorio se pudo utilizar los diferentes equipos requeridos y todas las pruebas se realizaron por triplicado para comprobar su validez. Se sacaron los promedios que luego expresamos en la tabla 5 para un mejor entendimiento y estandarización del compost producido que utilizaremos en las demás pruebas.

Tabla 5 Caracterización del compost elaborado

pH	7.39
% Cenizas	61.3322
% MO	38.6678
% CO	22.4291
Humedad (%)	31.7969
Densidad Aparente (g/cm³)	0.7512
Densidad Real (g/cm³)	1.3696
Tamaño de partícula (g)	
>8mm	7.7503
4mm < 8mm	9.1344
1mm < 4mm	6.8082
<1mm	7.2598

La caracterización realizada del compost maduro producido nos reflejan los siguientes valores representados en la tabla 2 y que corroboran los indicadores de maduración necesarios para su utilización en el biofiltro son los siguientes: un pH equivalente a 7.39 por lo que podemos decir que se encuentra en la neutralidad, los valores de ceniza obtenidos por triplicado nos indican en promedio un valor de 61.3322% %, con un porcentaje importante de materia orgánica equivalente a 38.6678% y el carbono orgánico en 22.4291%. Tenemos los valores de densidad tanto aparente como real en 0.7512g/cm³ y 1.3696g/cm³ respectivamente, un valor de humedad no muy elevado con un valor del 31,7969 que permite la proliferación de microorganismos de manera adecuada. Todos estos valores dentro de los estándares calidad reportados por Shyamala y Belagali (57), por la norma técnica colombiana (NTC 5167) (58) y la norma chilena oficial NCh2880 (59).

Shyamala y Belagali (57) en su investigación nos muestra un valor óptimo recomendado por estándares de pH entre los valores de 6.9 y 8.3 siendo la norma chilena contemplando valores entre los 5.0 y 7.5, por lo que el valor de 7.39 que obtenemos se encuentra dentro de estos valores. En la normativa chilena NCh2880 (59) el compost está clasificado en compost de clase A, Clase B y compost inmaduro por lo que algunos de los valores nos

indicaran en cuál de estos tipos podemos ubicar el compost obtenido, el porcentaje de humedad tanto para el tipo A y B debe ubicarse por arriba del 30%, habiendo obtenido nosotros el 31.7969% lo que lo ubica en el rango óptimo, la norma también considera los valores de materia orgánica para determinar de compost y el grado de maduración tomando en cuenta un valor superior al 25% para compost de tipo B y un valor por encima de 45% para compost de tipo A, el valor obtenido en las pruebas analíticas nos indica un valor de materia orgánica del 38.6678% ubicando el compost como de tipo B, los valores de densidad se encuentran en valores promedio como lo indica Zicari (60) en un rango de los 0.7g/cm^3 , aunque en algunos casos como la norma técnica colombiana indiquen valores entre 0.5 y 0.7g/cm^3 , en cambio la norma técnica chilena no es muy específica en este valor por lo que el valor promedio de 0.7512g/cm^3 lo consideraremos alto pero utilizable pues compost con características similares como Zicari fue utilizado en procesos de biofiltración. El tamaño de partícula también es considerado en la etapa de caracterización para considerarlo un compost viable en su utilización para ello la norma chilena lo establece en partículas de menor tamaño que 15mm, nuestra evaluación aunque no se evaluó con un tamiz de 15mm si se pudo observar que solo 7.7503g estuvieron por encima de los 8mm lo que es un indicativo de que no hubieron muchas partículas de gran tamaño que pudiesen superar a los límites establecidos.

3.2 Aislamiento de microorganismos

El proceso de aislamiento de microorganismos sulfo-oxidantes se realizó en un medio mineral enriquecido con tiosulfato de sodio el mismo que favorece el crecimiento de este tipo de bacterias utilizando el azufre en su metabolismo como fuente de energía como describe Freyre (51) existen otro de medios de cultivo especiales para este tipo de bacterias sin embargo muchos de estos medios se centran en el cultivo del genero *Thibacillus* donde muchas bacterias de esta especie crecen en condiciones extremofílicas como *Ferroxidans* que describe crecimiento luego de más de 10 días de incubación, el medio escogido en este caso es un medio adaptado para la proliferación de microorganismos sulfoxidantes extraídos de lodos activados superficiales con características aeróbicas (56), los cultivos se mantuvieron por un periodo de 48 horas como referencia Ramírez (47) para el cultivo de microorganismos en el tratamiento de efluentes gaseosos de H_2S , aunque hay estudios que indican que hay bacterias con tiempos de crecimiento más prolongados que pueden variar entre 1 o 2 semanas y en

condiciones extremas de pH se optó por este medio para garantizar la facilidad de cultivo y control en el crecimiento de los microorganismos. El estudio de Mora (56) mostro buenos resultados con la utilización de este medio para microorganismos de lodos activados por lo que su utilización para microorganismos en el compost podría ser una alternativa favorable. Se realizaron los cultivos en frascos de 100ml como se muestra en la figura 6 a temperatura ambiente (20°C) pues esta es la misma a la que tiene que operar el biofiltro en condiciones ambientales, de la misma forma el pH neutro del medio debe ayudar al crecimiento de este tipo de bacterias. Aunque referencien que se puede producir ácido sulfúrico en debido a la oxidación biológica del azufre y este disminuya el pH del medio y pueda generar la inhibición de algunos microorganismos. La monitorización del pH en algunos casos se realiza con un indicador colorimétrico que permita visualizar el cambio de pH, en el caso de este medio utilizado no se mostró un descenso en el pH lo cual puede significar que al haber igual crecimiento de microorganismos que el azufre del tiosulfato es pasando por un compuesto intermedio que podría ser el tetrionato de sodio.

Introducido en el medio el tiosulfato de sodio al 5% como fuente energética en los frascos donde se cultivaron las bacterias se colocó 10ml de inóculo a partir de una suspensión de compost en agua destilada y estéril.



Figura 6 Aislamiento de microorganismos en medio mineral

Pasadas las 24 horas se observó una muestra al microscopio para visualizar el crecimiento microbiano, el consorcio encontrado dentro de la muestra tomada evidencio la presencia de diversos tipos de bacterias principalmente del genero *bacillus sp.* El consorcio también

fue sometido a una prueba de gram para una identificación parcial del tipo de bacterias encontradas en el medio de crecimiento para sulfoxidantes, encontrando tanto del tipo gram positivas y negativas, tal como se observa en la figura 7.

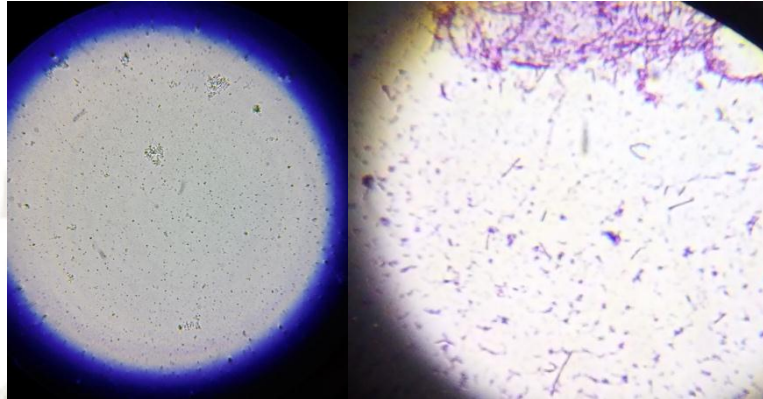


Figura 7 Vista al microscopio de los microorganismos cultivados a partir de compost.

Los consorcios son muy utilizados debido a la acción colaborativa que tienen los microorganismos en su crecimiento, Mora (56) indica que el aislamiento de los consorcios para la eliminación de sulfuro de hidrogeno los realiza a partir de lodos activados con características aerobias por lo que el medio se puede adaptar a la proliferación de compost que igualmente es un proceso aerobio.

3.3 Diseño y ensamblaje de filtros escala de laboratorio

Al seleccionar el tipo de biofiltro a operar, en este caso un biofiltro de lecho fijo debido a la capacidad del mismo de poder funcionar a flujos intermitentes pues en algunas ocasiones no se puede garantizar el flujo continuo y estable de biogás en planta y se necesita tener las características de control menos complejas para su correcta operación.

Se regulo los parámetros a tomar en cuenta para el diseño de los filtros a escala de laboratorio, tal como se especifican en los métodos se basó principalmente en el tiempo de residencia dentro el filtro debido a que el mismo determina el tiempo disponible por el gas para entrar en contacto con el soporte y por lo tanto con los microorganismos y se den los procesos de adsorción u oxidación que se estén buscando como lo indica Cabezas (30), para determinar este tiempo tenemos 2 variables a considerar como el flujo de biogás disponible por la planta y el volumen del biofiltro, con 2 de estos valores podemos determinar el tercero, en este caso al fijar los tiempos de residencia a evaluar entre 20 y

40 segundos pues el objetivo es de evaluar el mínimo recomendado y compararlo en funcionamiento con un tiempo más regular y probablemente que favorezca una continuidad en una planta en caso de tener que operar de esta manera, a pesar de eso se decidió utilizar el mayor tiempo de retención con el flujo máximo pues a pesar de no encontrar una diferencia significativa entre los flujos evaluados si hubo una ligera superioridad en los valores obtenidos cuando el flujo fue menor y por consiguiente que el tiempo de residencia fuera mayor.

Al determinar que el flujo necesario para evaluar ambos tiempos era de 0.5 y 1.0 l/min o su equivalente 0.03 y 0.06 m³/h respectivamente, esto tomando en cuenta el flujo normal en planta ya pensando en un escalamiento hasta de 10l/min, podemos lograr el dimensionado de los mismos que fue de 29cm de altura interior por un diámetro interior de 3.8cm (1.5 pulgadas) lo que nos arroja un volumen de 328.89cm³ y una relación H/D de 7.6315 en la figura 8 se muestra el diseño de los filtros. Estas dimensiones al igual que otras tomadas en cuenta tanto para el diseño a escala de laboratorio como para el escalado también se basaron en la disponibilidad comercial de algunos implementos, en este caso la disponibilidad de diversos tubos de PVC que pudiesen funcionar para ensamblar los filtros, el tamaño de 1.5 pulgadas o 3.8cm de diámetro interno favorecía estas características, ya con el valor de este diámetro se pudo determinar la altura y por lo tanto las dimensiones exactas para el ensamblado.

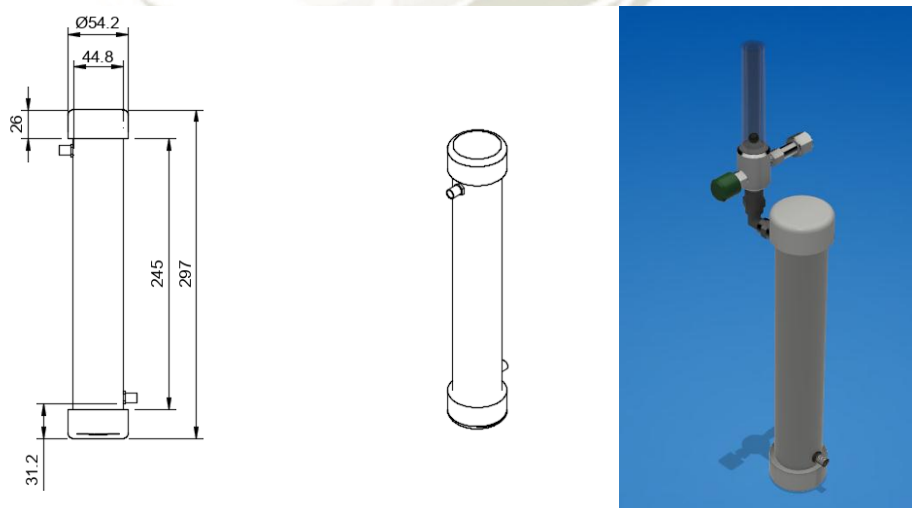


Figura 8 Diseño de filtros escala de laboratorio diseño 2D vista isométrica y diseño 3D

El diseño tanto en 2D como en 3D se realizó con el programa Fusion 360 de Autodesk que permitió el dimensionado exacto y con los materiales deseados. En la figura 8 se muestran las medidas exteriores del filtro pues se toma en cuenta en este dimensionamiento también el grosor de los materiales de construcción. Se eligió para los materiales de construcción PVC, al ser comercial y sencillo adquirir con las dimensiones requeridas, las tapas tanto superior como inferior fueron de igual manera de PVC y adaptadas para que se puedan colocar los puntos de entrada y salida, por lo que se requirió cortar para disminuir su tamaño y que se ajuste con el diseño realizado de igual manera estas tapas incrementan el tamaño del filtro pues hay un espacio que generan entre el tubo y la tapa que también se deben considerar en el momento de la construcción., tanto para la entrada como la salida se utilizó un diámetro 0.635cm (1/4 de pulgada) con conexiones rosca de acero INOX utilizadas para equipos que trabajan con aire comprimido u otros gases comprimidos, tanto para el acople del flujómetro como las espigas para canalizar el trayecto de biogás con mangueras orientadas a su medición, la cual se realizó de una cámara de almacenamiento que consta de una bolsa de 1 litro de capacidad la misma que se encuentra contenida en un frasco tal como se muestra en la figura 9, para la entrada se tuvo que colocar una reducción de 2.54cm(1 pulgada) a 0.635cm(1/4 de pulgada) para la entrada del filtro. Y en la cámara de almacenamiento se adaptó con una espiga y en la entrada de la cámara con conexiones (tubo "T", tapas y niples) para poder realizar las mediciones de forma correcta.

El flujómetro utilizado al no ser comercial un rotámetro de bajo caudal a un precio accesible se optó por utilizar un flujómetro básico para oxígeno para niños que tenga un máximo de flujo de 10l/min. Sin embargo el mínimo solo se puede establecer en 0.5l/min que es suficiente para la evaluación adecuada con los tiempos de retención estipulados.



Figura 9 Filtro ensamblado para la medición de biogás

Los filtros se ensamblaron con anterioridad pero se cargaron el día de la medición debido a que solo contábamos con 6 filtros para la evaluación de 18 tratamientos, en el caso de los filtros en los que se bioaumentó la cantidad de microorganismos sulfoxidantes se inocularon 24 horas antes esto se determinó luego de realizar una curva de crecimiento microbiano y observando como se ve en la figura 10 una fase exponencial al pasar 24 horas de incubación, esta curva de crecimiento se realizó en 104 horas a temperatura ambiente como lo refiere Ramirez²⁷ y tal como se muestra en la gráfica.

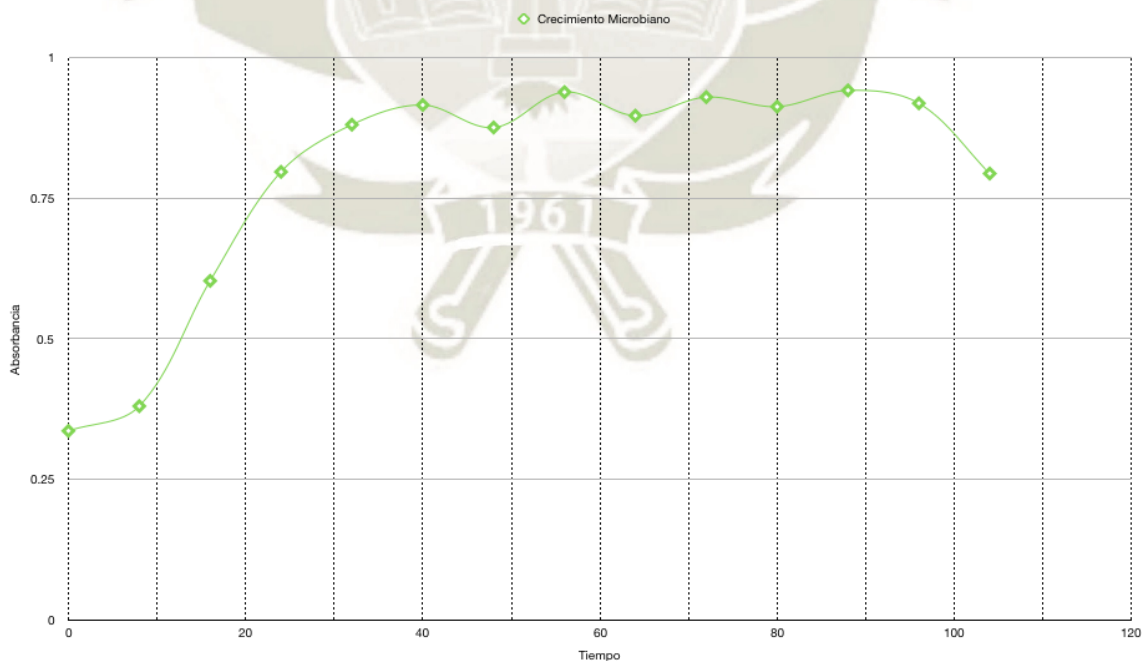


Figura 10 Curva de crecimiento microbiano

Como se puede observar en la figura 10 tenemos el comportamiento en el crecimiento de los microorganismos visualizando una fase de crecimiento exponencial luego de las 10 horas de cultivo antes podemos decir que tenemos una fase de latencia, para a continuación de la fase exponencial entrar en una fase estacionaria alrededor de las 40 horas de incubación y una fase de muerte pasadas las 90 horas de cultivo sin embargo esto no podemos asegurar con totalidad pues solo se monitorizó hasta un poco más pasadas las 100 horas de crecimiento sin embargo ya notando una tendencia al descenso.

Mora (56) en su investigación refiere el crecimiento de sus microorganismos por un periodo de 5 días de incubación por lo que podríamos estar aun en una fase de latencia alrededor de las 120 horas de cultivo, evaluar por una mayor cantidad de días el crecimiento de los microorganismos nos podría indicar mejor su ciclo de vida sin embargo para las pruebas que nos competen esta información es más complementaria.

La cantidad inoculada fue de 20ml por muestra que permite obtener una concentración de 2×10^6 mo/ml para un volumen de 200ml de soporte útil, el conteo de microorganismos se realizó luego de 24 horas de cultivo, utilizando la cámara de Neubauer se contó los microorganismos, obteniendo una concentración de 2.1×10^7 mo/ml en el cultivo general.

De ahí que se determinó el uso de los 20ml para el inóculo, el mismo que se realizó de la misma manera 24 horas antes de su evaluación esto debido a que las primeras horas como se ve en la figura 10 es de latencia o considerada como etapa de adaptación al nuevo medio de crecimiento, para luego puedan los microorganismos entrar en la etapa exponencial y poder evaluar una población estable en su crecimiento con la capacidad de utilizar los compuestos requeridos para su metabolismo y obtener la reducción de sulfuro de hidrógeno necesaria.

3.4 Evaluación de filtros a escala de laboratorio

Para la evaluación de remoción de H_2S y CO_2 de biogás se realizó un diseño factorial multinivel 3×2 evaluando dos factores de interés: tipo de compost y el flujo de biogás (m^3/h).

La matriz experimental desarrollada (Tabla 6) contempló los niveles previamente señalados para cada una de las variables, permitiendo identificar posibles factores e interacciones significativas para el sistema.

La tabla 6 nos muestra la matriz evaluada así como los bloques tomados en cuenta para la evaluación de los diferentes tratamientos cada uno compuesto de 6 evaluaciones en las diferentes configuraciones requeridas. Ello nos permitió la evaluación de todas las variaciones posibles y por triplicado para la obtención de una validez estadística que pudiese comprobar los resultados obtenidos.

Tal como se observa en la tabla vemos en el primer bloque 3 resultados con una disminución de sulfuro de hidrógeno considerable del 95.6% para un compost normal y un flujo de 0.03 m³/h, 93.1% para un compost bioaumentado y un flujo de 0.06 m³/h y 90.4% para un compost normal y un flujo de 0.06m³/h, los demás valores obtenidos estuvieron por debajo del 75% de eficacia que evidencio el otro compost bioaumentado con un flujo de 0.06m³/h, para la remoción de sulfuro de hidrogeno, en este caso observamos que 2 de los 3 valores más altos obtenidos en este bloque corresponden al compost en estado normal, solo siendo 1 correspondiente a un compost bioaumentado pero aun así sin ser superior al valor máximo obtenido los valores mínimos fueron los de compost autoclavado y estéril aunque igual se vio disminución de H₂S. En el caso del dióxido de carbono no vemos una diferencia significativa entre los diferentes tratamientos ni observamos valores muy altos, variando los mismos entre 16.3% el mínimo y 23.3% el máximo porcentaje de remoción entre todos los tratamientos. Los valores obtenidos por los filtros que contaban con el soporte esterilizado por autoclavado tuvieron valores bajos e inferiores a los obtenidos por los soportes con actividad microbiológica.

Para el segundo bloque evaluado obtuvimos 3 valores sobresalientes de los demás siendo el más alto de 95.85% para compost aumentado y flujo 0.06 m³/h, de 93% para compost aumentado y con flujo de 0.03 m³/h y de 80.6% para compost normal y un flujo de 0.03 m³/h, en este segundo bloque los más altos rendimientos se pudieron observar en los filtros en los que se bioaumentó con microorganismos sin embargo el mejor rendimiento del filtro con compost normal se obtuvo al igual que en bloque anterior con un flujo de 0.03 m³/h que aumenta el tiempo de retención dentro del filtro, el otro filtro con compost normal obtuvo un porcentaje de remoción del 80.6% con un flujo de 0.06m³/h, en el caso

del dióxido de carbono tenemos una mayor variación entre los valores más alto y más bajo, siendo el mínimo de 14% de remoción y el máximo de 39.5% de remoción este último valor se encontró en el filtro bioaumentado con un flujo de 0.06 m³/h que nos puede indicar un consumo de CO₂ por un aumento de biomasa. El indicador que el flujo menor obtuviese resultados superiores se puede deber a un aumento en el tiempo de retención que es considerada la variable más importante en sistemas de biofiltración. En este caso el mayor rendimiento se pudo ver que fue con los biofiltros con compost bioaumentado cuyo aumento de rendimiento puede estar ligado al aumento de microorganismos específicos.

En el tercer bloque los valores que se obtuvieron fueron resultados muy parejos entre sí, no hubo grandes rendimientos ni niveles de remoción altos, siendo el más alto de 70.9% con un compost bioaumentado y un flujo de 0.03 m³/h, donde tenemos un mayor rendimiento con un tiempo de retención más alto, el siguiente valor que encontramos es de 63.5% con un compost normal y un flujo de 0.03 m³/h, los demás valores obtenidos son muy similares entre sí, siendo los valores más bajos en los que se utilizaron un compost autoclavado. En el caso de los valores obtenidos en la remoción de dióxido de carbono al igual que los bloques anteriores fue similar entre sí solo con un valor muy diferencial con un porcentaje bastante bajo del 7.0% para un compost bioaumentado, los demás valores similares entre si entre 23.3% y 27.9% no son diferenciales como para ser conclusivos al respecto. En ambos casos de mayor rendimiento para el sulfuro de hidrogeno se pudo ver que fueron en los que el flujo fue menor por lo que el tiempo de retención fue mayor teniendo mayor contacto con el soporte y por lo tanto con los microorganismos que progresan en el mismo.

Todos estos valores obtenidos fueron procesados estadísticamente como podremos ver a continuación en las tablas y gráficos que tenemos más adelante. En todos los casos evaluados el porcentaje de sulfuro de hidrógeno se ubicó en los 2000ppm considerándolo un porcentaje muy elevado de contaminante, es posible mencionar que a pesar de la adaptación de los microorganismos a fuentes azufradas para su desarrollo, una cantidad excesiva de este compuesto puede de la misma manera generar una inhibición en el crecimiento de los microorganismos, afectando el desarrollo de estos y por lo tanto mermando el funcionamiento del filtro.

Tabla 6 Resultados obtenidos en filtros a escala de laboratorio

BLOQUE	VARIABLES CODIFICADAS		VARIABLES REALES		Valor Inicial (ppm)	Valor Final (ppm)	Reducción de H ₂ S %	Valor Inicial (%)	Valor final (%)	Reducción de CO ₂ %
	COMPOST	FLUJO	COMPOST	FLUJO (m ³ /h)						
1	-1	1	Autoclavado	0.06	2000	736	63.2	43	33	23.3
1	0	-1	Normal	0.03	2000	88	95.6	43	35	18.6
1	-1	-1	Autoclavado	0.03	2000	876	56.2	43	36	16.3
1	1	1	Aumentado	0.06	2000	138	93.1	43	33	23.3
1	1	-1	Aumentado	0.03	2000	736	63.2	43	33	23.3
1	0	1	Normal	0.06	2000	192	90.4	43	35	18.6
2	0	1	Normal	0.06	2000	500	75	43	37	14.0
2	1	-1	Aumentado	0.03	2000	140	93	43	29	32.6
2	0	-1	Normal	0.03	2000	388	80.6	43	37	14.0
2	-1	1	Autoclavado	0.06	2000	844	57.8	43	35	18.6
2	-1	-1	Autoclavado	0.03	2000	980	51	43	35	18.6
2	1	1	Aumentado	0.06	2000	83	95.85	43	26	39.5
3	1	-1	Aumentado	0.03	2000	582	70.9	43	31	27.9
3	0	-1	Normal	0.03	2000	730	63.5	43	33	23.3
3	1	1	Aumentado	0.06	2000	876	56.2	43	40	7.0
3	-1	1	Autoclavado	0.06	2000	882	55.9	43	33	23.3
3	0	1	Normal	0.06	2000	864	56.8	43	32	25.6
3	-1	-1	Autoclavado	0.03	2000	964	51.8	43	33	23.3

Estos valores obtenidos en la tabla 6 nos indican valores altos de remoción tanto en los filtros con compost normal como bioaumentando mostrando una clara baja respuestas en todas las filtraciones realizadas con el compost autoclavado, sin embargo para conocer su validez y su diferenciación se comprobaron mediante pruebas estadísticas que sean capaces de diferenciarlos con el objetivo de encontrar el mejor sistema posible para un escalamiento a nivel piloto.

En la Figura 11 se muestra el diagrama de Pareto en el cual se puede observar que el factor compost es el más importante en la remoción de H₂S teniendo un efecto positivo, no siendo así el flujo de entrada de biogás hacia el filtro. Este diagrama nos muestra las variables que influyen más en el comportamiento del filtro en las diferentes pruebas mostrando como señalamos anteriormente una diferencia significativa entre el factor compost y el factor de flujos o la interacción entre estos factores. Estos resultados luego se comprobaron estadísticamente para evaluar su significancia.

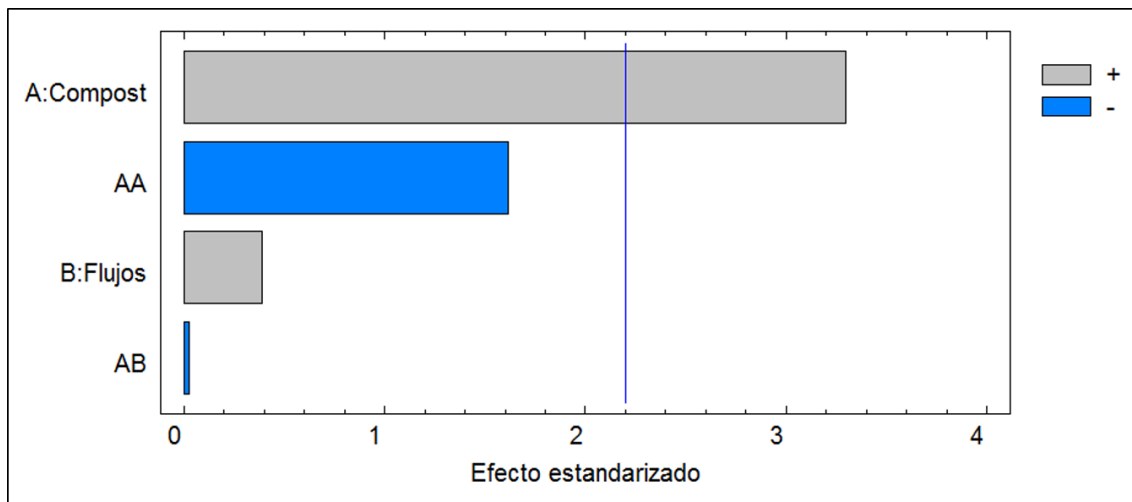


Figura 11 Diagrama de Pareto para el % de remoción de Sulfuro de Hidrógeno (H_2S)

Para verificar se realizó el Análisis de varianza (Tabla 7), y se ve que la variable compost tiene un valor-p 0.0071 (Valor-p<0.05) por lo tanto es estadísticamente significativo en la remoción de H_2S , esto puede asociarse tanto a la presencia de microorganismos en el compostaje producto del mismo proceso de biodegradación que sufre, el mismo que genera distintos tipos de bacterias en sus diferentes etapas de maduración como lo indican en una guía de microbiología de la universidad de Granada (45), así como de la capacidad adsorptiva del compost como soporte inorgánico debido a su porosidad que favorece a la retención de algunas partículas y en este caso del sulfuro de hidrógeno el compost es un material bastante poroso y se puede observar esto al notar los valores de densidad aparente y relativa obtenidos en el proceso de caracterización, como se sabe la porosidad permite la retención de muchos compuestos en estos poros sin embargo al no ser un soporte específico como el carbón activado puede retener cualquier sustancia. La respuesta puede estar relacionada incluso a una acción de ambos factores tanto de absorción como de adsorción que favorezca a la disminución del H_2S en el biogás, en cualquiera de los casos propuestos hay remoción por lo que podemos decir que tiene un comportamiento positivo para lo que buscamos, el compost autoclavado fue utilizado como un grupo de control a fin de comprobar la acción de los microorganismos en el funcionamiento del filtro y que la disminución de los contaminantes no se deba solo a una capacidad adsorbente del soporte para poder concluir con mayor certeza. En el caso de las siguientes variables consideradas podemos decir que tenemos una baja influencia en la variación de los flujos

al tener un valor $-p$ de 0.7070 lo que nos indica que la interacción entre ambos no es significativa ya que el tiempo de residencia en ambos casos tanto en 20 y 40 segundos se encuentra dentro de lo recomendado la variación aunque en la tabla se pudo observar alguna diferencia entre las pruebas, estadísticamente esta no es diferencial por lo que filtrar a con un flujo de $0.06\text{m}^3/\text{h}$ equivalente a un tiempo de residencia de 20 segundos no va a ser significativo en un proceso de filtración con respecto a filtrar con un flujo equivalente a $0.03\text{m}^3/\text{h}$ que nos arroja un valor de tiempo de residencia de 40 segundos, así mismo otro valor que podemos observar es que no existe interacciones entre el tipo de compost y el flujo empleado, teniendo un valor de 0.9829. Lo que nos dice que ninguna combinación en específico nos va a generar un beneficio en el porcentaje de remoción de sulfuro de hidrógeno.

Con estos resultados analizados estadísticamente ya se puede observar que factores podemos tomar en cuenta para el escalamiento del piloto, siendo el principal el tipo de compost a escoger y que sea más beneficioso para obtener el mayor porcentaje de remoción de sulfuro de hidrógeno. Descartando ya desde este momento la variación de los tiempos de retención para el escalado.

Tabla 7 Análisis de varianza para % de remoción de Sulfuro de Hidrógeno (H_2S)

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A:Compost	1525.51	1	1525.51	10.86	0.0071
B:Flujos	20.9089	1	20.9089	0.15	0.7070
AA	365.447	1	365.447	2.60	0.1351
AB	0.0675	1	0.0675	0.00	0.9829
Error total	1545.59	11	140.508		
Total (corr.)	4637.56	17			

En la Figura 12, se encuentran los promedios para el % de remoción de H_2S según el tipo de compost siendo la variable más importante como vimos anteriormente con el análisis estadístico, pudiendo observar que para el compost autoclavado el % promedio fue de 56,15, para compost normal de 76.98 y para compost con carga microbiana aumentada de 78% (Tabla 8) este fenómeno que notamos que aunque en el compost autoclavado tiene un porcentaje importante de remoción este mismo se ve incrementado en los

soportes que tienen material biológico, por lo que debe ser producto de la acción microbiana pues es probable que la remoción del 56.15% por el compost estéril se deba a la capacidad adsorbente del soporte producto de la porosidad del mismo, el % adicional generado tanto en el compost con toda su carga microbiológica como con un aumento de la misma con bacterias aisladas en un medio adaptativo para la proliferación de bacterias sulfoxidantes se deba a un proceso ya sea de absorción o transformación metabólica de estos mismos en presencia de H_2S tal como lo indica Jensen y Webb (61) en su descripción de procesos sulfoxidantes por organismos microbiológicos, pues existen una gran cantidad de bacterias que pueden realizar esta función tanto quimiotrofas como fotoautótrofas, como describe Soreanu et al (49), y en diferentes condiciones de pH y temperatura. Al observar los datos podemos observar que la diferencia entre los porcentajes de los soportes bioaumentados con los soportes normales aunque en los datos en la tabla pudimos notar mejor comportamiento de uno en un bloque y mejor comportamiento del otro en el otro bloque y al observar los promedios notamos un mejor comportamiento en los que tuvieron un aumento en su población microbiana, estadísticamente nos indica que no hay una diferencia significativa entre estos valores.

El funcionamiento de los consorcios microbianos está asociado a la capacidad que tienen diferentes poblaciones microbianas a convivir en un mismo ecosistema entablando una relación de colaboración entre sí para sobrevivir, en este caso tenemos un consorcio que convive en el compost de manera natural y el cual tuvo una efectividad alta en la remoción del sulfuro de hidrógeno en el filtro, nuestro objetivo era lograr un incremento de este porcentaje de remoción aumentando la carga microbiana en el ecosistema con microorganismos con una mayor especificidad para el contaminante a eliminar, sin embargo en los resultados obtenidos a partir de los 3 bloques evaluados tenemos un comportamiento similar que difieren numéricamente pero estadísticamente no es una diferencia significativa que genere un mayor beneficio en la implementación de uno por encima del otro, este resultado contrario a lo esperado se puede deber a diversos factores por analizar, entre los que podemos evaluar podría ser la generación de competencia con respecto a otras bacterias que evite un mayor crecimiento, o la falta de adaptación de estas nuevas bacterias aisladas en un medio específico y que al ser colocadas en un soporte con diferentes características orgánicas hayan demorado su crecimiento y su adaptabilidad en el mismo soporte disminuyendo su capacidad para absorber o metabolizar los compuestos requeridos.

Los procesos metabólicos producidos por las bacterias sulfooxidantes descritos por Arias et al (62) para oxidación de compuestos reducidos de azufre nos pueden explicar el incremento en el porcentaje de reducción en los soportes que sí tuvieron bacterias a diferencia del soporte esterilizado eso contrastado con la variedad de microorganismos que crecen en el compost y que se pudo realizar un asilamiento en un medio específico para su crecimiento pueden confirmar que la variación se deba a estos y no a otro factor externo.

El porcentaje de remoción de H_2S respecto al flujo de entrada y por consiguiente al tiempo de retención en los filtros no tuvo mucha variación con valores que van desde 69.53% hasta 71.57% observándose una pendiente mínima de 1.02 (Figura 13) por lo que podemos ver que a pesar de tener poca pendiente el factor es importante pero la variación de flujo no significativa (valor-p =0.7070) según se observa en la tabla 7 podemos ver que si hay una diferencia entre ambos flujos evaluados pero no será relevante, como se mencionó anteriormente el flujo determina el tiempo de retención y por consiguiente el tiempo en que estará en contacto el contaminante con el soporte sin embargo estos valores establecidos para la evaluación están ligados al funcionamiento en planta donde se requiera la continuidad necesaria para el proceso por ello la evaluación se basó en el tiempo mínimo recomendado por algunos estudios como cabezas (30) y un tiempo regular que pueda favorecer un flujo mayor a partir de la planta de biogás, en este caso la planta piloto de biogás de la Universidad Católica de Santa María tiene en promedio un flujo de salida de 10l/min siendo variable debido a que el flujo puede variar según la operación de la misma planta. Con este valor máximo para un posible escalamiento se pudo establecer como tiempo de residencia continuo el de 40segundos para el filtro a escala de laboratorio y con un flujo de 1l/min o su equivalente en unidades internacionales de $0.06m^3/h$. Con los resultados en esta prueba estadística la variación de flujos no va a ser un factor determinante ni significativo en la remoción de H_2S y por lo tanto para el escalamiento del filtro a un nivel piloto no va influir en su operación más si en su diseño pues se deberá seleccionar uno para el escalamiento adecuado a nivel de piloto.

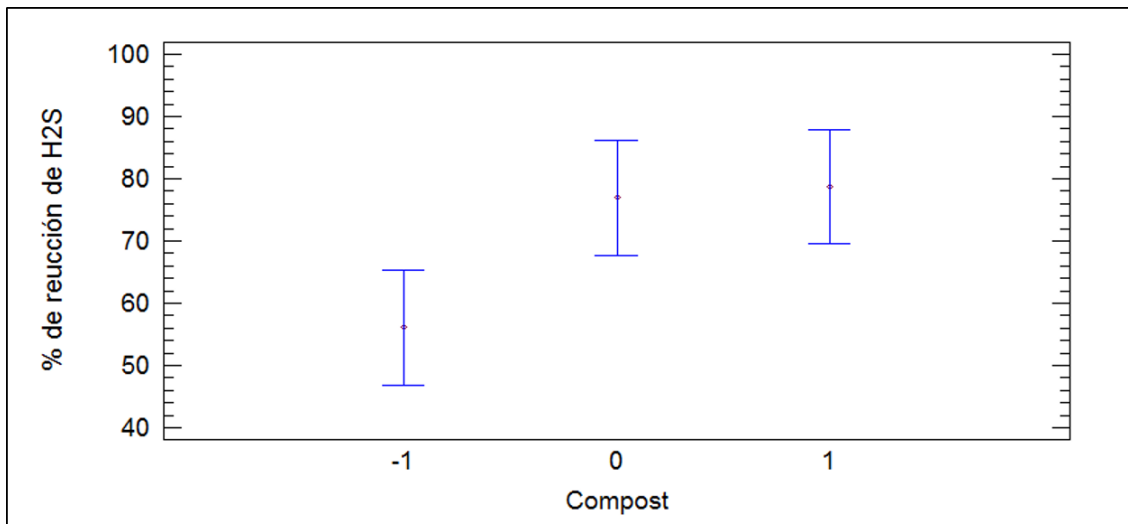


Figura 12 Grafica de medias para % de reducción de Sulfuro de Hidrógeno (H₂S) según el tipo de compost.

La tabla 8 nos muestra el promedio para la remoción de sulfuro de hidrogeno basándonos en el tipo de compost utilizado donde observamos los porcentajes antes mencionados, en total se evaluaron 6 muestras con los diferentes flujos por tipo de compost obteniendo tanto un límite superior como inferior en promedio. Estos resultados nos muestran una clara diferencia con el compost autoclavado con los otros 2 tipos de compost haciendo referencia a lo antes mencionado de la actividad microbiana como único factor diferencial entre estos.

Tabla 8 Promedio para el % de remoción de Sulfuro de Hidrógeno (H₂S) según el tipo de compost

<i>Nivel compost</i>	<i>Recuento</i>	<i>Promedio</i>	<i>Error Estándar</i>	<i>Límite Inferior</i>	<i>Límite Superior</i>
Autoclavado	6	56.15	5.98845	43.1023	69.1977
Normal	6	76.98	5.98845	63.9356	90.0311
Aumentado	6	78.70	5.98845	65.6523	91.7477

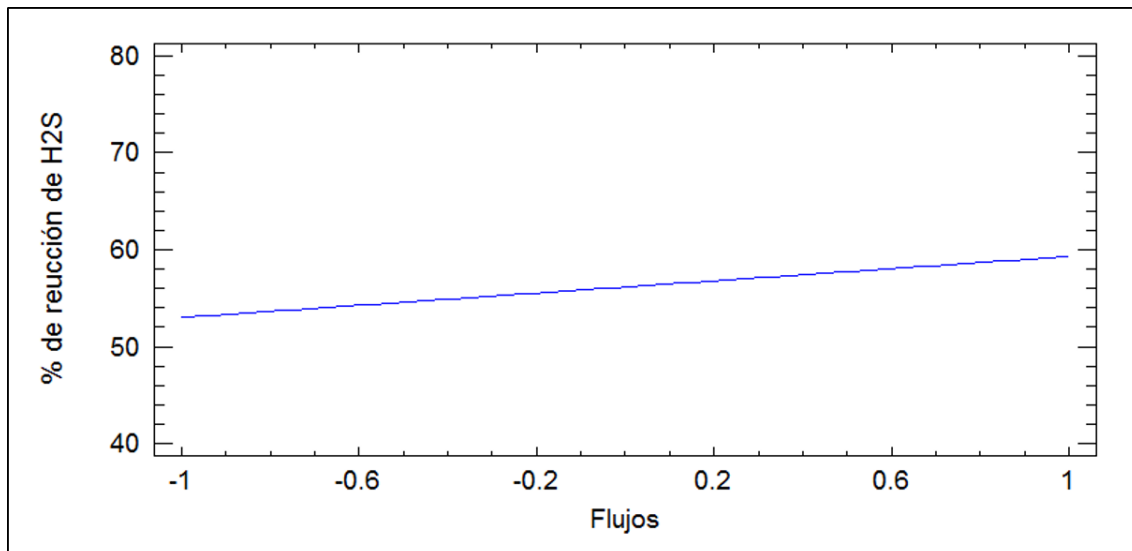


Figura 13 % de reducción de Sulfuro de Hidrógeno (H_2S) según el flujo

A pesar de observar el comportamiento del % de remoción en la figura 12 y reportar los promedios para cada tipo de compost, fue necesario confirmar la diferencia o no entre ellos en la eficiencia de la remoción, por ello se realizó la prueba de múltiples rangos de LSD Fisher (Tabla 9) para complementar los datos obtenidos e indicó que los filtros compuestos por compost normal y bioaumentado son estadísticamente similares clasificándolos como grupo B, siendo estos a su vez distintos y superiores al compost autoclavado el cual fue clasificado como A. Esto puede deberse como se mencionó anteriormente a la acción de los microorganismos, sin embargo al no existir diferencias significativas entre el compost normal y el bioaumentado el uso de cualquiera de los 2 soportes para el escalamiento a nivel piloto es adecuado, el factor que nos inclina a tomar la decisión se va a basar básicamente en la logística, facilidad de implementación y control de los filtros en planta, es por ello que se propone la construcción de filtros de compost normales puesto que estos generan un menor costo de implementación, debido a que la generación de carga microbiana contempla el uso de un medio de cultivo que requiere la adquisición de los nutrientes necesarios, esterilización de material y del medio por autoclavado, controles de temperatura y agitación para el proceso de cultivo, entre otros gastos que significa un aumento en la logística para una respuesta que no es diferencial al uso de compost con su carga microbiana natural.

Tabla 9 Comparaciones múltiples para % de remoción según el tipo de compost mediante el método de LSD Fisher

<i>Nivel compost</i>	<i>Promedio</i>	<i>Grupos</i>
Autoclavado	56.15	A
Normal	76.98	B
Aumentado	78.70	B

En el caso del control de CO₂, para determinar su eliminación en los biofiltros se notó un comportamiento similar en todos los ensayos evaluados, el diagrama de Pareto para ver las relaciones entre estos nos muestra que no hay una diferencia significativa entre las muestras (Figura 14) ni entre los tipos de compost ni en los diferentes flujos evaluados, mientras que la gráfica de promedios en los 3 diferentes tipos de compost evaluados no arrojan diferencias para determinar una mayor eficiencia entre ellos a simple vista se pudo observar que el compost bioaumentado tuvo un claro mayor rendimiento numéricamente hablando y el peor rendimiento se notó en el compost normal sin embargo la estadística nos arroja que no existe una diferencia significativa para seleccionar uno por encima del otro en un escalamiento a nivel piloto.

El mayor rendimiento quizás se pueda relacionar con la actividad microbiana sin embargo en la forma de cultivo y el medio especializado para su aislamiento se contemplaba más un crecimiento aerobio que un crecimiento anaerobio (56), el medio puede presentar un crecimiento de bacterias con carácter facultativo que podría justificar el consumo de CO₂, sin embargo el valor de remoción de dióxido de carbono en el compost sin carga microbiana tuvo un mayor rendimiento que el compost normal lo cual nos lleva a creer que esta disminución puede estar más relacionada con la capacidad adsorbente del soporte o la solubilidad del mismo en agua. En la tabla 6 que observamos todos los resultados obtenidos no se puede visualizar una gran diferencia pues los valores en los diferentes bloques son similares entre sí, solo tenemos un valor muy bajo de remoción en 7% y un valor alto en 39% por lo demás son valores con una mínima diferencia entre todos.

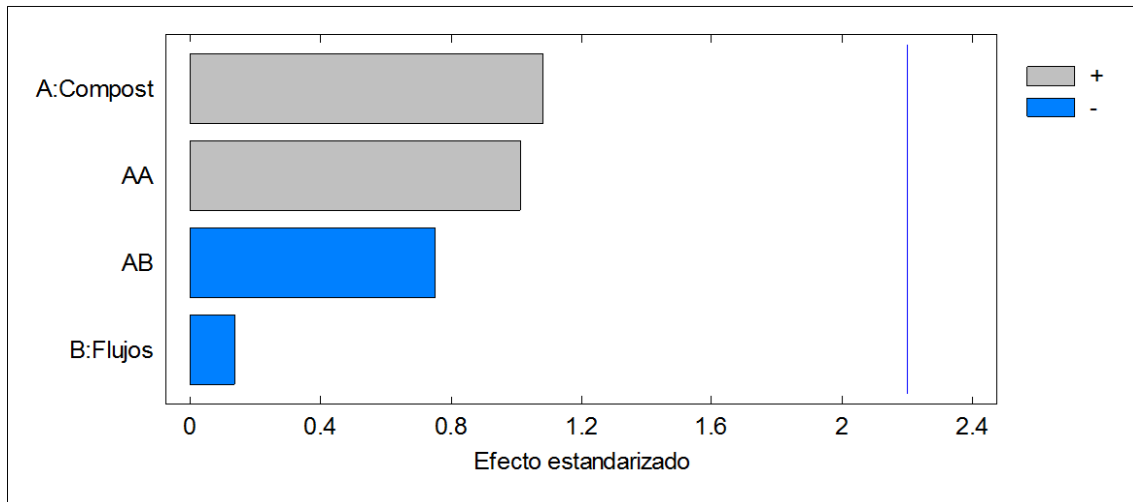


Figura 14 Diagrama de Pareto para % de remoción de Dióxido de Carbono (CO_2)

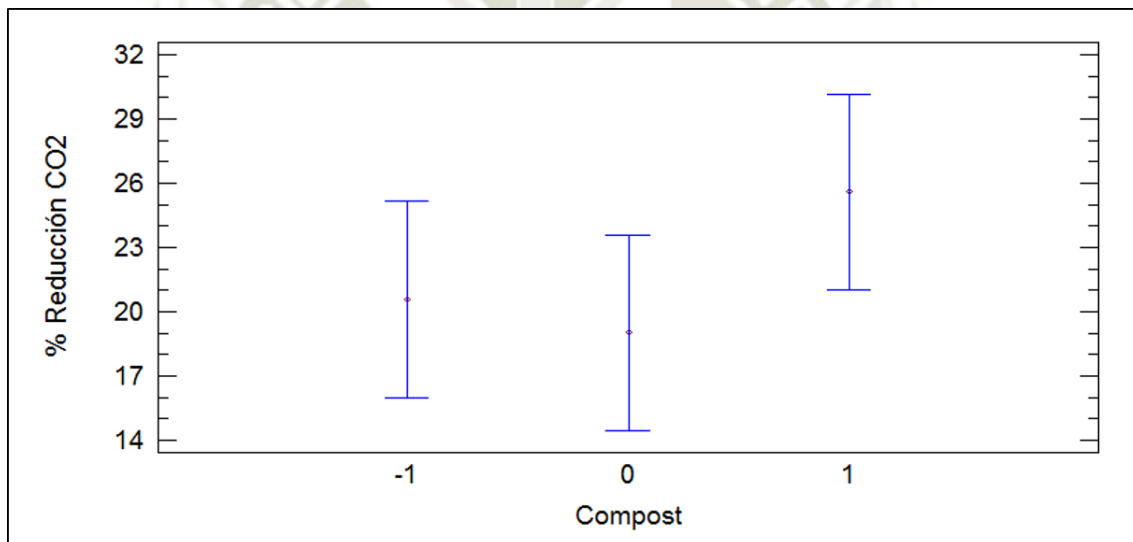


Figura 15 Grafica de medias para % de remoción de Dióxido de Carbono (CO_2)

Al realizar el análisis estadístico con un análisis de varianza se pudo observar que el valor de “-P” es de 0.3027, lo que nos indica estadísticamente que no hay una diferencia significativa entre los tipos de compost evaluados, el valor en el caso de los flujos de $p=0.8829$, tampoco demuestra una diferencia significativa al evaluar los diferentes flujos (Tabla 10) pues para que consideremos esta diferencia como significativa el valor de p debe ser menor a 0.05, sin embargo tenemos una disminución del valor de CO_2 en las diferentes pruebas las cuales al no diferenciarse puede deberse como se mencionó antes a la capacidad adsorptiva del material de soporte.

Tabla 10 Análisis de varianza para % de remoción de Dióxido de Carbono (CO₂)

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Compost	142.154	2	71.0772	1.30	0.3027
Flujos	1.22722	1	1.22722	0.02	0.8829
Residuo	763.534	14	54.5382		
Total	906.916	17			

(corregido)

Según el tipo de compost se realizó un análisis estadístico que pueda relacionarlo en la selección de la misma manera que se hizo con el sulfuro de hidrógeno, en esta prueba que de la misma forma se analizó las 6 muestras para cada tipo de compost se puede ver como antes se referenció los porcentajes promedio de remoción el valor para el compost autoclavado está en 20.5667%, para el compost normal de 19.0167% y para compost bioaumentado un porcentaje de 25.6% como vemos la diferencia es mínima, los límites tanto inferior como superior arrojados en el análisis son similares entre sí a su vez siendo el de mayor rendimiento el de compost bioaumentado.

Tabla 11 Promedio para el % de remoción de Dióxido de Carbono (CO₂) según el tipo de compost

Nivel compost	Recuento	Promedio	Error Estándar	Límite Inferior	Límite Superior
Autoclavado	6	20.5667	3.01491	14.1003	27.033
Normal	6	19.0167	3.01491	12.5503	25.483
Bioaumentado	6	25.6	3.01491	19.1336	32.0664

La comparación mediante el método de LSD Fisher que utilizamos anteriormente para corroborar los resultados con el sulfuro de hidrógeno de la misma manera fue aplicado en la remoción de dióxido de carbono, lo que resultó con un análisis arrojando a los 3 niveles como grupo A, es decir sin una diferencia significativa.

Tabla 12 Comparaciones múltiples para % de remoción según el tipo de compost mediante el método de LSD Fisher

<i>Nivel compost</i>	<i>Promedio</i>	<i>Grupos</i>
Autoclavado	19.01	A
Normal	20.57	A
Aumentado	25.6	A

3.5 Escalamiento de filtro a escala piloto

Con los resultados obtenidos a escala de laboratorio se procedió a realizar el escalado del filtro para un nivel piloto, los datos que se tomaron en cuenta para el escalamiento fueron principalmente el H/D, tiempo de retención o residencia y flujo de biogás disponible, debido a que el flujo de biogás era un factor limitante debido a que tenemos una limitada producción de biogás en la planta por lo que se midió el flujo máximo promedio generado por la planta piloto de biogás de la Universidad Católica de Santa María en El Pedregal – Majes, este se estableció en $0.6\text{m}^3/\text{h}$ (10 l/min) como flujo máximo disponible para la realización del filtrado por lo que se considera para el cálculo como tiempo de residencia en 40 segundos para determinar los demás valores.

El valor de H/D en los filtros a escala de laboratorio es igual a 7.63 por lo que este mismo valor se debe utilizar para el escalamiento del biofiltro piloto, con un flujo de biogás de 10 l/min y un tiempo de retención que se debe mantener constante ya que lo establecimos en 40 segundos. Determinamos un volumen de 6577.88cm^3 (6,58L), con el valor de H/D determinamos nuestra nueva altura y diámetro como se ven en los cálculos en el anexo II, la nueva altura será de 78.72 cm y el diámetro de 10cm, con las medidas establecidas se procedió a diseñar el filtro en 2D y luego en 3D para su construcción como se observa en la figura 16.

En el diseño de diferentes equipos se consideran muchos factores en el momento de su diseño entre materiales, forma, capacidad, resistencia y otros. El biofiltro al escalarlo se deben respetar las dimensiones al realizar la escala teniendo en cuenta tanto el tamaño inicial como de los soportes en el interior con el fin de esperar la misma respuesta que en

el laboratorio. Donde también se respetan los espacios huecos, pero muchas veces algunos de estos parámetros tienen que ser variados para optimizar el funcionamiento del mismo.

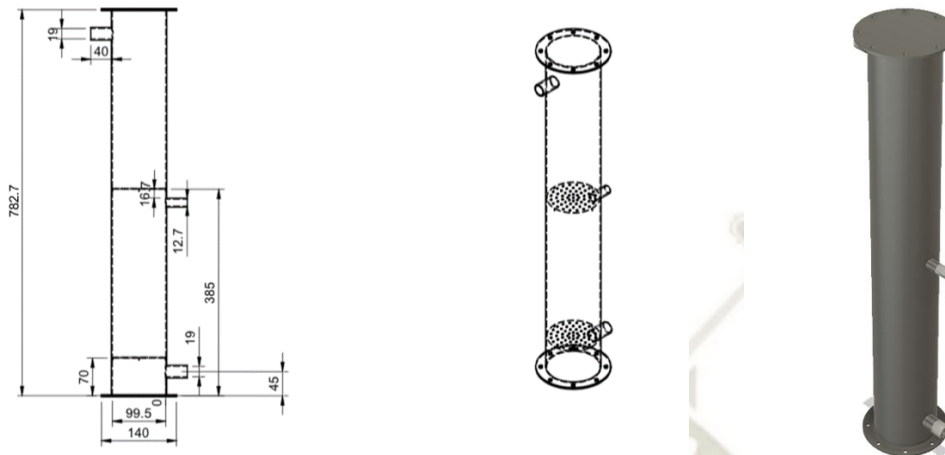


Figura 16 Diseño piloto de biofiltro para la eliminación de H_2S (sulfuro de hidrógeno)

El filtro se construyó en acero inoxidable según las medidas especificadas como se ve en la figura 17, en este caso las dimensiones de escalado también dependieron de algunos elementos comerciales que permitan un escalado adecuado y no genere un sobrecosto innecesario cuando puede ser manejado de una mejor manera, por lo cual el biofiltro fue construido a partir de tubo de acero inox con DN 100, que es un tubo comercial en INOX y no necesita realizar el laminado para darle forma que generaría un sobrecosto. También se consideró la colocación de llaves en la entrada y salida estas conectadas por uniones universales que permiten el desensamblaje de una manera más sencilla, las llaves de entrada y salida fueron complementadas con llaves de emergencia que permiten la toma de muestra y también brinda la posibilidad de realizar un puente en el sistema en caso de taponamientos.

Tanto en la entrada como salida se utilizaron espigas para la unión con la manguera unidos con una abrazadera para evitar fugas de biogás. El Biofiltro se decidió que estuviese dividido en 2 empaques, esto debido a la tendencia a la compactación que tiene el compost, aunque bibliografía referencia como Marin (13) que la compactación es un problema en empaques superiores a 1,2m se pudo observar que el compost al tener partículas muy pequeñas tiene una mayor tendencia que otros soportes comúnmente utilizados como turba o piedra pómez, tomando en cuenta esta variable se dividió en 2

empaques para evitar este problema, ambos empaques se colocaron sobre una rejilla que permita el paso de biogás sin que se unan ambos empaques, esta rejilla tiene como tamaño de poro inferior a 1mm para el paso del biogás sin que caigan muchas partículas del empaque superior al inferior.

Las tapas en acero inox se colocaron según las bridas colocadas para su fijación 8 pernos de $\frac{1}{4}$ de pulgada utilizados para el cerrado y se colocó una empaquetadura para garantizar el cerrado hermético del biofiltro. Que el filtro no sea hermético representa un peligro ambiental debido a la exposición al ambiente de biogás con contenido de sulfuro de hidrógeno y a su vez nos daría una lectura equivocada pues podría haber un aumento de oxígeno que diluya la mezcla sin tomar en cuenta lo que significa una mezcla de metano con oxígeno.

Finalmente se consideró colocar una salida entre los 2 empaques, este tiene como función principal ser un punto de emergencia en caso de taponamiento o saturación del empaque inferior al mismo que se le colocó solo una tapa pues no se tienen previsto su uso recurrente.



Figura 17 Filtro escala de laboratorio en acero inoxidable.

3.6 Evaluación del bifiltro piloto

La evaluación del sistema a escala piloto se realizó en la planta de biogás experimental ubicada en el fundo de Majes – El Pedregal, de la Universidad Católica de Santa María

donde Los resultados obtenidos por las pruebas realizadas con un flujo de 10l/min como se estipuló en el diseño fueron los siguientes expresados en la tabla 13 estos resultados reflejan una eficiencia de encima del 98% en las 5 pruebas realizadas siendo la 3ra prueba la de mejor rendimiento teniendo un porcentaje de remoción del 99.5% lo cual es una eficiencia bastante alta como Mora lo indica (56), El filtro fue evaluado con la filtración de 500lt de Biogás los cuales fueron realizados en diferentes días es decir con la utilización de un flujo intermitente, el biofiltro de lecho fijo entre sus características es un filtro utilizado en plantas con flujo intermitente (13) lo que lo hace ideal en este caso, en estas pruebas donde se observó un comportamiento similar en todas las pruebas. Los índices de remoción tienen un valor alto llegando a reducir hasta 10ppm en algunos casos siendo el valor mayor de 22ppm de sulfuro de hidrógeno en la salida, estos porcentajes de remoción fueron referenciados por algunos autores como Mora (13) y Fonseca (51) en sus investigaciones.

Sin embargo en relación con los filtros a escala de laboratorio tenemos un mayor incremento en el porcentaje de remoción en comparado con ellos, y en una diferencia importante dado que el mayor porcentaje de remoción obtenido en los filtros a escala de laboratorio fue del 95.6% también encontrado en un filtro con compost normal. En este caso el rendimiento fue superior en todas las evaluaciones realizadas con un mínimo descenso en la última medición, realizar más mediciones nos daría una idea si hay una tendencia a reducirse este porcentaje lo que equivaldría a un punto de saturación del soporte. Como sabemos el funcionamiento del biofiltro está relacionado con la capacidad de oxidar los compuestos azufrados esto se da gracias a los microorganismos capaces de introducir el azufre en su metabolismo, y esto está relacionado con la solubilidad de un contaminante en agua (13), se referencia que la capacidad de los microorganismos para eliminar un contaminante pasa por el paso de un contaminante gaseoso solubilizado en agua que permite su utilización en el metabolismo microbiano, la constante de Henry es un valor que se utiliza para determinar la solubilidad en medio acuoso y permite su selección entre un biolavador u otro tipo de sistema biorreaccionante (19).

Esta propiedad del sulfuro de hidrogeno para solubilizarse en un medio acuoso puede ser un factor que determine en un escalamiento un mayor contacto con el soporte húmedo y que se genere la solubilización en el medio, por otro lado puede ser producto de la

adaptación de las bacterias a un medio con sulfuro de hidrogeno en su ambiente, lo que favorezca a su aprovechamiento y por lo tanto el alto porcentaje de remoción.

Varias investigaciones como la de Mora (46), Marin (13) o Gadre (21) ya referencian altos rendimientos en biofiltración por diferentes bacterias, Zicari (60) utiliza un tipo de compost de vaca para la remoción de sulfuro de hidrógeno con resultados óptimos.

Tabla 13 Pruebas a escala piloto de remoción de Sulfuro de Hidrógeno (H₂S)

Nº de prueba	Entrada (ppm)	Salida (ppm)	% De Remoción
1	2694	19	99.29
2	2371	16	99.33
3	1988	10	99.50
4	2021	17	99.16
5	2040	22	98.92

En el caso del CO₂ se tubo los resultados expresados en la Tabla 14, en los cuales se pudo observar una disminución de la cantidad de CO₂ donde el porcentaje varía desde 11.76% en la primera medición hasta 0.79% en la última realizada este no es un porcentaje elevado de eliminación de CO₂ y presenta una tendencia a disminuir conforme el paso de las mediciones. Tal como se observó en los filtrados a escala de laboratorio la disminución de CO₂ no era diferencial entre los sistemas evaluados (Inerte, natural o bioaumentado) lo cual podría significar que su disminución está ligada a un fenómeno de adsorción del soporte como tal, en este caso al observar la disminución del porcentaje de adsorción con respecto a los filtrados que precedían cada prueba, esto puede deberse a una saturación del soporte que evite la adsorción del CO₂, prácticamente eliminamos el factor microbiológico como respuesta a esta disminución y lo atribuimos netamente a la capacidad adsortiva del soporte orgánico, el soporte puede saturarse y disminuir la eficacia del mismo con respecto a este contaminante, aunque no afecte el sulfuro de hidrogeno también monitorizado.

Tabla 14 Pruebas a escala piloto de remoción de Dióxido de carbono (CO₂)

Nº de prueba	Entrada %	Salida %	% de remoción
1	39.1	34.5	11.76
2	38.1	37	2.89
3	38.6	37.2	3.63
4	37.9	37.6	1.06
5	37.8	37.5	0.79

En el caso de los sistemas piloto también se consideró en su funcionamiento la cantidad de metano que se obtenía luego del proceso de filtrado a fin de considerar que tan alto podría ser la adsorción del mismo por el soporte utilizado, en este caso no se notó una disminución sustancial y en algunos casos se observó el incremento del mismo en algunos puntos porcentuales sin ser de mayor importancia para el funcionamiento e implementación de este sistema, en la tabla 15 podemos observar estos resultados notando que tanto en la primera, segunda y cuarta medición tuvimos un incremento del mismo pero el valor fue mínimo sin sobrepasar el 3% siendo el valor máximo de 2.3% de incremento de 56.6% a 58.9%, y en la tercera y quinta se notó una disminución en un porcentaje muy mínimo, la disminución la podemos atribuir a la adsorción al no ser un soporte con alta especificidad para la adsorción, mientras que el aumento en el porcentaje es posible atribuírselo a la disminución de otros compuestos no monitorizados que también fueron retenidos en mayor escala que el metano presente.

El proyecto se basó en la idea de purificar el metano y llevarlo a biometano sin embargo en los valores relacionados al CO₂ la disminución no fue elevada, la mayoría de investigaciones en biofiltración están relacionadas con la eliminación del sulfuro de hidrógeno por ser de carácter corrosivo y contaminante ambiental, como tóxico para la salud, sin embargo el dióxido de carbono tiene importancia en su eliminación pues disminuye la capacidad calorífica del biogás al estar mezclado con el metano.

Tabla 15 Porcentaje Metano (CH₄) luego de los filtrados

Nº de prueba	Entrada %	Salida %	% de variación
1	56.6	58.9	4.06
2	56	57	1.79
3	56.7	54.8	-3.35
4	55.3	55.6	0.54
5	56.4	56.1	-0.53

El aumento del porcentaje de metano nos da una idea de que los biofiltros no solo eliminan las 2 variables tomadas en cuenta en este estudio, el valor del metano no se vio afectado en una escala mayúscula, más bien en algunos casos fue favorable aumentado su porcentaje como mencionamos, pero hay que tomar en cuenta que hay otros gases involucrados y que forman parte del biogás ya que este es una mezcla de gases.

Muchos de los procesos de biofiltración evaluados por diversos autores como Syed (49) indican los valores de sulfuro de hidrogeno filtrados normalmente están entre 100 -450 ppm aunque también referencia pruebas con 2000ppm con otro tipo de soportes filtrados, en casos de baja concentración de contaminante se pudo evaluar algún tipo de compost obteniendo resultados de remoción entre 90 – 100% según Syed, sin embargo en pruebas que exceden este valor y bordean los 2000ppm se utilizaron biolavadores sistemas separados de biofiltración en sistemas complementarios. La evaluación de este filtro a escala piloto nos pudo demostrar la capacidad del compost para eliminar el sulfuro de hidrógeno presente en el biogás sin embargo no resulto tan optimo con el CO₂ pero se puede completar con otra tecnologías que permitan la eliminación de dióxido de carbono.

CONCLUSIONES

- ❖ Primera. Se logró el diseño y ensamblado de un biofiltro a escala piloto para la purificación de biogás proveniente de la digestión anaeróbica de residuos orgánicos con la utilización de compost obtenido a partir de residuos orgánicos públicos provenientes de lugares de venta de comida, obteniendo resultados positivos en la eliminación de sulfuro de hidrógeno con valores de remoción por encima del 90% en las pruebas realizadas, para el caso del dióxido de carbono se obtuvo una baja efectividad en la remoción con una tendencia a disminuir su efectividad con el paso de los filtrados asumiéndose producto de la saturación del soporte.
- ❖ Segunda. Se logró la obtención de compost a partir de residuos orgánicos producidos por locales de comida (menús), en un proceso de biodigestión aeróbica por microorganismos, utilizando como fuente del mismo estiércol de ganado vacuno.
- ❖ Tercera. El compost obtenido fue caracterizado para conocer sus propiedades físicas y determinar si su estado es óptimo para ser utilizado como material de soporte, al tener estas características dentro de los parámetros encontrados en normativas internacionales se utilizó para su evaluación como soporte.
- ❖ Cuarta. Dado a que las diferentes etapas del proceso de compostaje llevan la producción de diferentes microorganismos y dentro de ellos hay crecimiento de bacterias con la capacidad de utilizar el azufre como una fuente de energía, el aislamiento de microorganismos con capacidad sulfooxidante que se encuentran en el compost fue posible utilizando un medio específico para su proliferación. El proceso de desulfuración corresponde al comportamiento de diferentes microorganismos por lo que se utilizó un consorcio aislado del mismo compost.
- ❖ Quinta. Se diseñó los filtros a escala de laboratorio basándonos en algunos factores limitantes como el flujo de biogás disponible y los materiales comerciales disponibles para su construcción (tubos de PVC, puertos de entrada, salida y adaptadores para el flujómetro), todos estos elementos nos llevaron a la construcción hermética de cada uno de los filtros.

- ❖ Sexta. La evaluación de los diferentes sistemas nos llevó a determinar que tanto en los filtros con compost normal y bioaumentado no tuvimos una diferencia significativa en la remoción de sulfuro de hidrógeno a diferencia de los filtros esterilizados, lo que nos lleva a la determinación de que esta diferencia está ligada al actuar de los microorganismos presentes en los biofiltros, pero en el caso de la evaluación de los flujos estimados no presentaron esta diferencia por lo que su utilización de manera indistinta no afecta el comportamiento en la eliminación del H_2S , en el caso del CO_2 presentó una disminución de este compuesto en todos los sistemas evaluados, sin embargo no hubieron diferencias significativas entre estos, lo que nos lleva a pensar que la disminución de este no se debe al actuar de los microorganismos sino más bien a la capacidad de adsorción que presenta el soporte elegido. Lo que significa que para el escalamiento a nivel piloto el tipo de soporte utilizado será el de compost en estado natural al no presentar un incremento en términos de logística, implementación y control como si fuera el caso de un soporte bioaumentado.
- ❖ Séptima. Con los resultados obtenidos en las evaluaciones a escala de laboratorio se pudo realizar un escalamiento a nivel piloto para lo cual se utilizó como un factor limitante el flujo de biogás disponible en base al cual y con el uso de la relación H/D se escaló en un factor 20:1, obteniendo un filtro con las dimensiones especificadas en los resultados. Este biofiltro con compost en estado natural fue evaluado de la misma forma que los filtros a escala de laboratorio e incrementando la cantidad de biogás utilizada para su evaluación, lo que llevó a la medición de 5 pruebas, las cuales determinaron un alto poder de remoción de sulfuro de hidrogeno, no siendo igual con la cantidad eliminada de CO_2 , proporcionando un nivel bajo y con una tendencia a disminuir con el pasar de las pruebas.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda para la producción de compost la utilización de aceleradores como microorganismos eficaces que sean capaces de disminuir el tiempo de compostaje para su obtención.
- Buscar otras fuentes de microorganismos con capacidad sulfooxidante para evaluar en el compost como un material de soporte para su crecimiento y conocer su eficacia no solo para el sulfuro de hidrógeno sino también para el dióxido de carbono.
- Evaluar la variación de otros compuestos presentes en el biogás en su paso por el biofiltro con el fin de determinar con mayor exactitud como es el funcionamiento de los microorganismos en el proceso de filtrado, así como una identificación exacta de cada bacteria en el consorcio aislado.
- Evaluar por más tiempo el compost con el fin de determinar el punto de saturación del mismo, tanto a nivel adsorbente como la capacidad de sobrevivencia de las bacterias presentes en el mismo.
- Evaluar el compost luego del proceso de biofiltración para determinar la cantidad de azufre fijado en el mismo ya sea en forma de azufre inorgánico como en alguna de las etapas de su transformación en el proceso de sulfooxidación.
- Buscar la disposición final del compost al acabar vida útil en el proceso de biofiltrado ya sea como un tipo de fertilizante rico en azufre o su eliminación definitiva.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Varnero MT. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). [Online]; 2011. Disponible en: <http://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>.
2. Ortega Viera L, Rodríguez Muñoz S, Fernández Santana E, Bárcenas Pérez L. Principales métodos para la desulfuración del biogás. RIHA. 2015; 36(1). ISSN 1680-0338
3. Rubiano Labrador C. Search of Sulfur oxidizing bacteria for their potential use in the production of high purity biogas. Revista de Investigación Agraria y Ambiental. 2018; 9(2): p. 295-304. DOI: 10.22490/21456453.2185
4. Morales Ibarria M. Estudio sobre la operación y modelado de un biofiltro para la eliminación de vapores de tolueno..
5. Awe, O.W.; Zhao, Y.; Nzihou, A.; , et al. A Review of Biogas Utilisation, Purification and Upgrading Technologies. Waste and Biomass Valorization. 2017; 9(2): p. 267–283. DOI: 10.1007/s12649-016-9826-4
6. España EsdBae. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. [Online].; 2010.. Disponible en: https://www.mapa.gob.es/es/ganaderia/temas/requisitos-y-condicionantes-de-la-produccion-ganadera/DOCBIOGASVersion21-09-2010_tcm30-110139.pdf.
7. Caribe LEdcceALye. Repositorio CEPAL Naciones Unidas. [Online].; 2018.. Disponible en: https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/42228/S1701215A_es.pdf?sequence=4&isAllowed=y.
8. OSHA Occupational Safety and Health Administration. [Online].; 2005.. Disponible en: https://www.osha.gov/OshDoc/data/HurricaneFacts/hydrogen_sulfide_fact.pdf.

9. Hidrogeno Sd. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. [Online].; 2011.. Disponible en: [http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/LEP%20 VALORES%2 0LIMITE/Doc Toxicologica/Ficheros%202011/DLEP%2069%20Sulfuro%20de%20 hidrógeno.pdf](http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/LEP%20VALORES%20OLIMITE/Doc_Toxicologica/Ficheros%202011/DLEP%2069%20Sulfuro%20de%20hidrógeno.pdf).
10. Souza, Jose; Lirio Schaeffer. Biogas and biomethane compression system. Información Tecnológica. 2013; 24(6): p. 03-08. doi: 10.4067/S0718-07642013000600002
11. Betzabet Morero, Enrique Campanella, Eduardo Gropelli. Revisión de las principales tecnologías de purificación de biogás. Ciencia y Tecnología. 2010; 10: p. 187-201.
12. Herminio Llana, Antonia Moris, Lola Gonzales, Elisabet Gonzales. Estudio de viabilidad de sistemas de purificación y aprovechamiento de biogás. PSE Biogás, Desarrollo de sistemas sostenibles de producción y uso de biogás agroindustrial en España.
13. Marin, Lucia Marin. Purificación biológica de biogas..
14. Maria Varnero, Margarita Caru, Karina Galleguillos, Patricio Achondo. Tecnologías disponibles para la purificación de Biogás usado en la generación Eléctrica. Información Tecnológica. 2012; 23(2): p. 31-40. doi: 10.4067/S0718-07642012000200005
15. Nicolas Abatzoglou, Steve Boivin. A review of biogas purification processes. Biofuels, Bioproducts and Biorefining. 2009; 3(1): p. 42-71. <https://doi.org/10.1002/bbb.117>
16. Zhao Q, Leonhardt E, MacConnell C, Frear C, Chen S. Purification technologies for biogas generated by anaerobic digestion. CSANR Research Report. 2010; 1(9): p. 1-24.
17. Subhankar Basu, Asim Khan, Cano-Odena Angels, Chunqing Liu, Ivo Vankelecom. Membrane-based technologies for biogas separations. Chemical Society Reviews. 2009; 39(2): p. 750-768. DOI: 10.1039/b817050a

18. Rameshprabu Ramaraj, Natthawud Dussadee. Biological purification processes for biogas using algae cultures. *International Journal of Sustainable and Green Energy*. 2014; 4(1): p. 20-32. doi: 10.11648/j.ijrse.s.2015040101.14
19. Martinez B. Control of volatile organic compounds from air emissions by anaerobic bioscrubber: process performance and process simulation..
20. J. Su, Y. Chen, Y. Chang. A study of a pilot-scale biogas bio-filter system for utilization on pig farms. *Journal of Agricultural Science*. 2014;(152): p. 217-224. <https://doi.org/10.1017/S0021859612001086>
21. Gadre RV. Removal of Hydrogen Sulfide from biogas by chemoautotrophic fixed-film bioreactor. *Biotechnology and Bioengineering*. 1989; 34(2): p. 410-414.
22. Warren Swanson, Raymon Loehr. *Biofiltration: Fundamentals, design and operations principles and applications*. *Journal of environmental engineering*. 1997; 123(6): p. 538-546.
23. Yonghua Yang, Eric Allen. Biofiltration Control of Hydrogen Sulfide 1. Design and Operational Parameters. *Air and Waste*. 2012; 44(7): p. 863-868. DOI: 10.1080/1073161X.1994.10467287
24. Joseph Devinny, Marc Deshusses, Todd Webster. *Biofiltration for Air Pollution Control*. 1st ed. Press C, editor.: Lewis Publishers; 1999.
25. Nunthaphan Vikromvarasiri, Nipon Pisutpaisal. Hydrogen sulfide removal in biotricking filter system by *Halothiobacillus neapolitanus*. *International Journal of hydrogen energy*. 2016; 41: p. 15682-15687. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.04.180>
26. Hong Xiang, Xiwu Lu, Lihong Yin, Fei Yang, Guangcan Zhu, Wuping Liu. Microbial community characterization, activity analysis and purifying efficiency in a biofilter process. *Journal Environmental Sciences*. 2013; 24(4): p. 677-687. DOI: 10.1016/S1001-0742(12)60089-8

27. Songming Zhu, Shulin Chen. The impact of temperature on nitrification rate in fixed film biofilters. *Agricultural Engineering*. 2002; 26: p. 221-237.
[https://doi.org/10.1016/S0144-8609\(02\)00022-5](https://doi.org/10.1016/S0144-8609(02)00022-5)
28. Hans-Joachim Naegele, Jonas Lindner, Wolfgang Merkle, Andreas Lemmer, Thomas Jungbluth, Claus Bogenrieder. Effects of temperature, pH and O₂ on the removal of hydrogen sulfide from biogas by external biological desulfurization in a full scale fixed-bed trickling bioreactor (FBTB). *Int J Agric and Biol Eng*. 2013; 6(1): p. 69-81. DOI: 10.3965/j.ijabe.20130601.007
29. Chris van Lith, Gero Leson, Richard Michelsen. Evaluating desing options for biofilters. *Journal of the air and waste management association*. 1997; 47(1): p. 37-48. DOI: 10.1080/10473289.1997.10464410
30. Rojas, Ivan Orlando Cabeza. Biofiltración de compuestos orgánicos volátiles utilizando diferentes tipos de lecho basados en mezclas de compost de rsu-poda: monitorización mediante diversas técnicas..
31. Mary Elizabeth Fischer. Biogas purification: H₂S Removal using biofiltration..
32. Muñoz, Martin Ramirez. Estudio y puesta en marcha de un sistema de eliminación de ácido sulfhídrico en una corriente de aire, mediante un biofiltro de escurrimiento con *Thiobacillus thioparus* inmovilizado en espuma de poliuretano..
33. Daniel Sztern, Miguel Pravia. Manual para la elaboración de compost, bases conceptuales y procedimientos. Organización Panamericana de la Salud, Oficina de planeamiento y Presupuesto, Unidad de desarrollo Municipal.
34. Guadalupe Vicencio de la Rosa, Elena Perez, Elizabeth Medina, Adriana Martinez. Producción de composta y vermicomposta a partir de los lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales de un rastro. *Rev. Int. Contam. Ambient*. 2011; 27(3): p. 263-270. ISSN 0188-4999
35. Escobar, Natalia Escobar; Delgado, Mora Jairo; Jola, Nestor Jaime Romero. Identificación de poblaciones microbianas en compost de residuos orgánicos de

- fincas cafeteras de Cundinamarca. Boletín Científico de centro de museos, Museo de Historia Natural. 2012; 16(1): p. 75-88. ISSN 0123-3068
36. Mahon, Tatiana Robledo. Estudio de los procesos biológicos y de la estructura de las comunidades microbianas en el proceso de compostaje de lodos de depuradora de aguas residuales urbanas en sistemas de membrana semipermeable. Tesis Doctoral - Universidad de Granada.
37. Juan Saldarriaga, Jorge Gallego, Julian Lopez, Roberto Aguado, Martin Olazar. Selecting Monitoring Variables in the Manual Composting of Municipal Solid Waste Based on Principal Component Analysis. Waste and Biomass Valorization. 2018. DOI: [10.1007/s12649-018-0208-y](https://doi.org/10.1007/s12649-018-0208-y)
38. M. de Bertoldi, G. Vallini, A. Pera. The Biology of Composting: A review. Waste Management and Research. 1983; 1: p. 157-176. [https://doi.org/10.1016/0734-242X\(83\)90055-1](https://doi.org/10.1016/0734-242X(83)90055-1)
39. Juan Pablo Silva, Piedad Lopez, Pady Valencia. Recuperación de nutrientes en fase sólida a través del compostaje. 2019.
40. Melvin Finstein, Merry L. Morris. Microbiology of Municipal Solid Waste Composting. Advances in Applied Microbiology. [https://doi.org/10.1016/S0065-2164\(08\)70427-1](https://doi.org/10.1016/S0065-2164(08)70427-1)
41. Zhiying Yan, Zilin Song, Dong Li, Yuexiang Yuan, Xiaofeng Liu, Tao Zheng. The effects of initial substrate concentration, C/N ratio, and temperature on solid-state anaerobic digestion from composting rice straw. Bioresource Technology. 2015; 177: p. 266-273. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.11.089>
42. Alejandra Cerda, Adriana Artola, Xavier Font, Raquel Barrena, Teresa Gea, Antoni Sanchez. Composting of food wastes: Status and challenges. Bioresource Technology. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.133>

43. Pilar Roman, Maria Martinez, Alberto Pantoja. Manual de Compostaje del Agricultor. Santiago de Chile: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Oficina Regional para América Latina y el Caribe.
44. Federico Laich. El papel de los microorganismos en el proceso de compostaje. En: Jornada Tecnica: Fertilidad y Calidad del Suelo Tenerife; 2011 p. 7.
45. Universidad de Granada. [Online]. Disponible en: <http://www.ugr.es/~cjl/compost.pdf>.
46. Alejandro Camacho, Laura Martinez, Ricardo Valenzuela, Hugo Ramirez, Maria Valdes. Potential of different microorganisms for solid waste composting. Terra Latinoamericana. 2014; 32(4): p. 291-300. ISSN : 0187-5779
47. Muñoz, Martin Ramirez. Viabilidad de un proceso para la eliminación conjunta de H₂S y NH₃ contenido en efluentes gaseosos. Tesis de Doctorado.
48. Larry Barton. Sulfate-Reducing Bacteria. 2nd ed. Barton L, editor. Albuquerque: Plenum Press; 1995. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511541490>
49. M. Syed, G. Soreanu, P. Falletta, M. Beland. Removal of hydrogen sulfide from gas streams using biological processes - A review. Canadian Biosystems Engineering. 2006; 48(2): p. 1-14. ISSN : 1492-9058
50. Sanchez, Armando Gonzales. Estudio de la oxidación biológica de compuestos reducidos de azufre por un consorcio alcalófilo en un biorreactor. Tesis de Doctorado.
51. Fonseca, Veronica Freyre. Caracterización de bacterias alcalofilas sulfoxidantes. Tesis.
52. Albert Janssen, Piet Lens, Alfons Stams, Caroline Plugge, Dimitri Sorokin, Gerard Muyzer, Henk Dijkman, Erik Van Zessen, Peter Luimes, Cees Buisman. Application of bacteria involved in the biological sulfur cycle for paper mill effluent purification. Science of the Total Environment. 2009; 407: p. 1333-1343. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2008.09.054

53. Elvia Ines Garcia-Peña, Aberto Nakauma-Gonzales, Paola Zarate-Segura. Biogas Production and Cleanup by Biofiltration for a Potential Use as an Alternative Energy Source. En Kumar S, editor. Biogas. Ciudad de Mexico: IPN; 2012. p. 23. DOI: 10.5772/32548
54. Palmero, Rafael Palmero. Elaboración de compost con restos vegetales por el sistema tradicional en pilas o montone. Información Técnica. Cabildo - Tenerife: Servicio tecnico de Agricultura y Desarrollo Rural , Area de Aguas y Agricultura.
55. F. Gordillo, E. Chavez. Evaluación comparativa de la calidad del compost producido a partir de diferentes combinaciones de desechos agroindustriales. Tesis. Guayaquil : Escuela Superior Politecnica del Litoral, Centro de Investigación Científica y tecnológica.
56. Alejandra Mora, Carlos Chavez, Jorge Cabra, Yezid Carmona. Desarrollo de un inóculo microbiano empleando lodos activados para la remoción de ácido sulfhídrico (H₂S) mediante biofiltración. Revista Colombiana de Biotecnología. 2005. ISSN 1909-8758
57. D. C. Shyamala, S. L. Belagali. Studies on variations in physico-chemical and biological characteristics at different maturity stages of municipal solid waste compost. Agris On-line Papers in Economics and Informatics. 2012; 2: p. 2003-2016. DOI: 10.6088/ijes.00202030084
58. ICONOTEC. Productos para la industria agrícola. productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas de suelo. NTC 5167. Bogotá: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.
59. Normalización, División de Normas del Instituto Nacional de. Compost clasificación y requisitos. Norma Técnica. Santiago de Chile: Instituto Nacional de Normalización.
60. Zicari SM. REMOVAL OF HYDROGEN SULFIDE FROM BIOGAS USING COW-MANURE COMPOST. Tesis de master. Cornell University.

61. Anders Jensen, Colin Webb. Treatment of H₂S-containing gases: A review of microbiological alternatives. *Enzyme and Microbial Technology*. 1995; 17(1): p. 2-10. [https://doi.org/10.1016/0141-0229\(94\)00080-B](https://doi.org/10.1016/0141-0229(94)00080-B)

62. Vladimir Arias, Daniel Lovera, Jorge Diego, Juan Gil, Luis Ramirez, Hans Cayo. Biooxidación de tiosulfato como mecanismo indirecto para la lixiviación de minerales mediante cepas nativas acidófilas. *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geologica, Minera, Metalurgica y geografica*. 2016; 18(35): p. 61-67.



ANEXOS

Anexo I

Caracterización

- **Humedad**

$$\% \text{ de humedad} = \frac{\text{Masa muestra humeda} - \text{masa muestra seca}}{\text{Masa muestra humeda}} \times 100$$

$$\% \text{ de humedad} = \frac{10.5490 - 7.0525}{10.5490} \times 100$$

$$\% \text{ de humedad} = 33.1453\%$$

- **Cenizas**

$$\% \text{Cenizas} = \frac{\text{Peso muestra Calcinada}}{\text{Peso de la muestra sin calcinar}} \times 100$$

$$\% \text{Cenizas} = \frac{1.2348}{2.0221} \times 100$$

$$\% \text{Cenizas} = 61.0652$$

$$\% \text{Materia horganica} = 100 - \% \text{ cenizas}$$

$$\% \text{Materia horganica} = 100 - 61.0652$$

$$\% \text{Materia horganica} = 38.9348$$

$$\% \text{Carbono Organico} = \frac{\% \text{Materia organica}}{1.724}$$

$$\% \text{Carbono Organico} = \frac{38.9348}{1.724}$$

$$\% \text{Carbono Organico} = 22.5840$$

- **Densidad**

$$d = m/v$$

$$d = 10.0014/7$$

$$d = 1.4288g/cm^3$$

Anexo II

Dimensionamiento de Filtros a escala de laboratorio

- Volumen (Tr: Tiempo de retención; V:volumen; Q: Flujo)

$$Tr = \frac{V}{Q}$$

$$40s = \frac{V}{8.33cm^3/s}$$

$$V = 328.89cm^3$$

- Altura H (D: Diámetro)

$$V = \frac{\pi D^2}{4} H$$

$$328.89 = \frac{\pi(3.8)^2}{4} H$$

$$H = 29$$

- Relación H/D

$$\frac{H}{D} =$$

$$\frac{29}{3.8} = 7.63$$

Escalamiento

$$Tr = \frac{V}{Q}$$

$$40 = \frac{V}{166.66}$$

$$V = 6567.8821cm^3$$

- **Calculo de H y D**

$$V = \frac{\pi D^2}{4} H$$

$$6577.8821 = \frac{\pi D^2}{4} H$$

$$\frac{H}{D} = 7.63$$

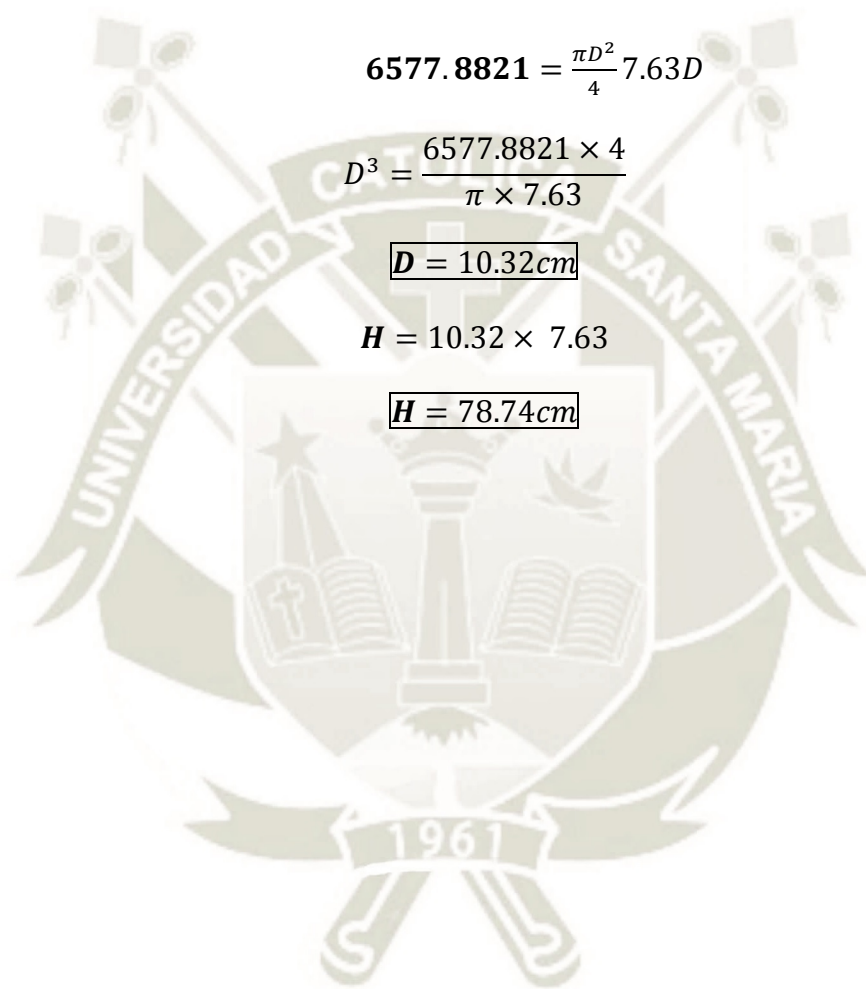
$$6577.8821 = \frac{\pi D^2}{4} 7.63D$$

$$D^3 = \frac{6577.8821 \times 4}{\pi \times 7.63}$$

$$D = 10.32cm$$

$$H = 10.32 \times 7.63$$

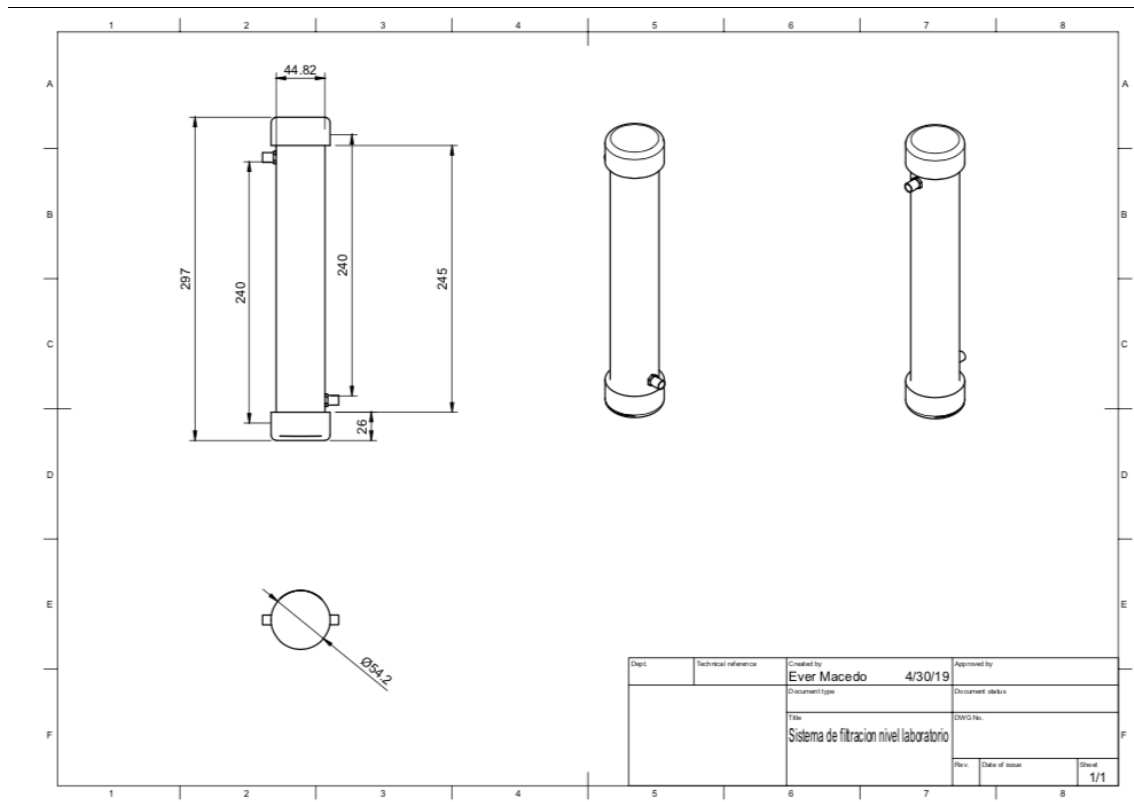
$$H = 78.74cm$$



ANEXO III

Diseño de Filtros

Escala de Laboratorio



- Biofiltro escala piloto

