

Evaluación de medios filtrantes para la reducción del sulfuro de hidrógeno en el mejoramiento de la calidad del biogás

Departamento de Ambiente y Desarrollo

Zamorano, Honduras

Noviembre, 2012

ZAMORANO
DEPARTAMENTO DE AMBIENTE Y DESARROLLO

Evaluación de medios filtrantes para la reducción del sulfuro de hidrógeno en el mejoramiento de la calidad del biogás

Proyecto especial de graduación presentado como requisito parcial para optar
al título de Ingenieros en Desarrollo Socioeconómico y Ambiente en el
Grado Académico de Licenciatura

Presentado por:

Departamento de Ambiente y Desarrollo

Zamorano, Honduras
Noviembre, 2012

Evaluación de medios filtrantes para la reducción del sulfuro de hidrógeno en el mejoramiento de la calidad del biogás

Presentado por:

Ana Gabriela Elizondo Quintero
Eduardo Napoleón Herrera Colindres

Aprobado:

Victoria Cortes, M.Sc.
Asesora principal

Arie Sanders, M.Sc.
Director
Departamento de Ambiente y
Desarrollo

Ingrid Sorto, Ing.
Asesora

Raúl Zelaya, Ph.D.
Decano Académico

RESUMEN

Elizondo Quintero, A.G y E.N. Herrera Colindres. 2012. Evaluación de dos sistemas de filtración para la reducción del sulfuro de hidrógeno en el mejoramiento de la calidad del biogás. Proyecto especial de graduación del programa de Ingeniería en Desarrollo Socioeconómico y Ambiente. Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras. 22 p.

En este estudio se presentó la elaboración y funcionamiento de dos sistemas de filtración para remoción del sulfuro de hidrógeno en el mejoramiento de la calidad del biogás producido en el sistema de biodigestores tubulares ubicados continuo al sistema de lagunas de estabilización de la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano. Para la construcción de los sistemas se utilizó materiales de fácil acceso y bajo costo. El primer sistema fue diseñado con el objetivo de determinar la eficiencia de reducción del sulfuro de hidrógeno utilizando dos materiales filtrantes diferentes. Este constó de cuatro filtros, dos con carbón vegetal y dos con bokashi realizando 51 mediciones en cada uno. Se obtuvo una eficiencia mayor en los filtros de carbón vegetal (97.08 %) en comparación a los filtros de bokashi con una eficiencia de 96.01 %. El segundo sistema se diseñó para determinar la curva de saturación de los medios filtrantes siendo una réplica del primer sistema a menor escala. Se obtuvo como resultado que los filtros de carbón vegetal tienen un potencial de remover 1.24 m³ adicionales de H₂S en comparación a los de bokashi. Se determinó que cada m³ de carbón vegetal removió 5.89 m³ de H₂S, y que cada m³ de bokashi puede remover 4.65 m³ de H₂S. Los resultados muestran que con un mismo volumen de medio filtrante, el carbón vegetal tendrá una vida útil mayor a la vida útil mayor al bokashi será expresada al volumen de biogás que puede tratar o H₂S que puede remover. Sin embargo el bokashi presenta menos impacto ambiental en su ciclo de vida, pudiendo reincorporarlo con facilidad como abono orgánico.

Palabras clave: Biodegradables, bokashi, carbón vegetal, filtros.

CONTENIDO

Portadilla	i
Página de firmas	ii
Resumen	iii
Contenido	iv
Índice de cuadros, figuras y anexos.....	v
1. INTRODUCCIÓN.....	2
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	6
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	10
4. CONCLUSIONES.....	14
5. RECOMENDACIONES.....	15
6. LITERATURA CITADA.....	16
7. ANEXOS.....	19

ÍNDICE DE CUADROS, FIGURAS Y ANEXOS

Cuadros	Página
1. Composición del biogás	3
2. Materiales para filtros uno y dos	7
3. Materiales para Filtros tres y cuatro	7
4. Eficiencia de remoción de sulfuro de hidrógeno del sistema uno	10
Figuras	Página
1. Capacidad de remoción de sulfuro de hidrógeno en el Filtro de Carbón Vegetal.....	11
2. Capacidad de remoción de sulfuro de hidrógeno en el Filtro de Bokashi.....	12
Anexos	Página
3. Construcción sistema uno.....	19
4. Sistema filtración dos.....	20
5. Propiedades físicas de la cáscara de coco.....	20
6. Propiedades químicas cáscara de coco.....	21
7. Propiedades físicas del aserrín.....	21
8. Propiedades químicas del aserrín.....	21
9. Propiedades físicas del carbón vegetal.....	22
10. Propiedades químicas del bokashi.....	22
11. Diagrama de proceso del biogás.....	22

1. INTRODUCCIÓN

De acuerdo con Botero y Preston (1987) el uso de biodigestores resulta una tecnología que se implementó en Centro América. Presenta un diseño sencillo que permite solventar la problemática energética-ambiental, aprovechar los residuos para la generación de energía y así como realizar un adecuado manejo tanto de desechos de humanos como de animales. El biogás es una mezcla gaseosa formada principalmente de metano y dióxido de carbono, pero también contiene trazas de H_2S que se produce por el desdoblamiento de las proteínas presentes en la materia orgánica y por la reducción anaerobia de los sulfatos mediante la acción microbiana (Navarro *et al.* 2007). La eliminación de este compuesto del biogás es relevante, ya que este gas inflamable e incoloro, es altamente tóxico y corrosivo.

El H_2S constituye una gran desventaja, pues dificulta el traslado del gas por tuberías, su almacenamiento en tanques y otras estructuras metálicas, como aquellas que participan en la generación y distribución de electricidad (Pérez *et al.* 2008). El control de las emisiones de H_2S es esencial para proteger la salud humana así como para mitigar su impacto ambiental. Los procesos utilizados para remover el H_2S son un tratamiento físico o una oxidación química. Algunos métodos requieren la adición de químicos mientras que otros requieren un alto consumo de energía (ATSDR 1999).

Tradicionalmente, los filtros para la remoción de H_2S en el biogás se han construido haciendo uso de los medios filtrantes inorgánicos que promueven una reacción química de oxidación. Sin embargo, existen diseños de filtros construidos con materiales biodegradables para la reducción de H_2S tales como el lombricompost y el bagazo de caña entre otros, los cuales han tenido una gran eficiencia. En el presente documento se proponen algunos materiales alternativos para la construcción de los filtros para la remoción del H_2S en el biogás. Se debe utilizar materiales económicos, que se encuentren disponibles en cualquier temporada del año y que sirvan como abono al suelo al integrarlos dentro de un ciclo cerrado de nutrientes. Como característica principal para su selección se tomó el porcentaje de remoción de H_2S . Así mismo se describe una metodología para comprobar la eficiencia de remoción de dichos materiales y la vez evaluar la curva de saturación de estos materiales.

Planteamiento del problema. Las concentraciones de los distintos gases en el biogás dependerá de la composición de las materias primas o sustratos, las condiciones de descomposición y el tiempo de retención hidráulica en el biodigestor entre otros (Varnero *et al.* 2011). El H_2S se presenta en cantidades de 0.1% de toda la composición del biogás (Cuadro 1).

Cuadro 1. Composición del biogás

Componentes	Fórmula Química	Porcentaje
Metano	CH ₄	60-70
Dióxido de Carbono	CO ₂	30-40
Hidrógeno	H ₂	1
Nitrógeno	N ₂	0.5
Monóxido de Carbono	CO	0.1
Oxígeno	O ₂	0.1
Sulfuro de Hidrógeno	H ₂ S	0.1

Fuente: adaptado del Instituto de Investigaciones Eléctricas de México (1980).

Las razones por las cuales en el sector rural, las familias no acostumbran adoptar la tecnología de los biodigestores son debido a que el biogás corroe las tuberías de las estufas y los motores cogeneradores de energía. Por lo tanto en el sector rural se utilizan principalmente los métodos tradicionales de desulfuración los cuales generan residuos que difícilmente se pueden tratar o reincorporar a un ciclo cerrado de nutrientes (Martí 2008). Los métodos tradicionales de desulfuración implican el uso de filtros de óxido de hierro siendo unos de los métodos más antiguos el uso de limaduras de hierro (óxido de hierro II). La capacidad de eliminación de las columnas es de 0.12 – 0.18 kg S/ kg Fe, siendo la duración de dichas columnas de dos meses para un tiempo de contacto de tres minutos y una concentración de H₂S en el gas de 0.3% en volumen (Fernández 2003).

La tecnología de los biodigestores no es accesible en todas las zonas, especialmente rurales. Dicho método tiene como desventajas, que cuando se quiere eliminar grandes cantidades de H₂S, el costo de la mano de obra resulta excesivo, así como la cantidad de limaduras de hierro es difícil de obtener (Fernández 2003). Actualmente, existen tecnologías de purificación de biogás de tipo físico-químico, eficientes pero presentan altos costos de adquisición y de operación. En los últimos años se ha dado importancia a posibles métodos biológicos y de materiales biodegradables de purificación que se puedan integrar en un ciclo cerrado de nutrientes. Se utilizan como agentes de transformación, en filtros y biofiltros con potencialidad de separar mezclas gaseosas y de esta manera poder disminuir los altos costos presentados por los sistemas de purificación que emplean métodos fisicoquímicos y tradicionales (Pinjin 2001).

El H₂S es un componente normal en el gas de digestión y se forma por transformación de proteínas sulfurosas. Estas pueden provenir de materiales vegetales o de restos de forrajes de animales (Muche y Zimmermann 1985). Para eliminar el H₂S existen diferentes métodos basados en técnicas fisicoquímicas y biológicas. Los métodos físicos reaccionan por el principio de adsorción en donde las partículas de sulfuro de hidrógeno se quedan adheridas a los medios filtrantes. Los métodos químicos funcionan bajo el principio de absorción en donde el H₂S reacciona con distintas sustancias químicas y se transforma en azufre elemental o sulfatos los cuales tienen mayor facilidad de remoción. Por último el método biológico que consiste en agregar microorganismos con alto potencial de consumo de azufre (Pinjing 2001).

Métodos fisicoquímicos para la eliminación de sulfuro de hidrógeno:

Métodos de purificación por adsorción. También se les llama lecho seco, se llevan a cabo sobre un material sólido fijo, sobre el cual el H_2S es adsorbido por adherencia. Por lo general, los materiales sólidos utilizados como adsorbentes son carbón activado, sílicagel y tamices moleculares de zeolitas o tamices moleculares de carbón (Llaneza *et al.* 2010). El proceso de adsorción ocurre sobre la superficie del material adsorbente, donde las moléculas son retenidas por fuerzas electrostáticas débiles. Una limitante en las reacciones es la humedad, selectividad, temperatura, presión y presencia de partículas (Varnero *et al.* 2011). Al utilizar carbón activado en los procesos de adsorción es cuando se requiere menos energía, porque se opera con temperatura y presión menor, donde la reacción se realiza en los poros por lo que el sulfuro de hidrógeno reacciona con el oxígeno produciendo azufre y agua. El azufre donde el sulfuro de hidrógeno queda ocluido en los poros del carbón (Llaneza *et al.* 2010).

Métodos de purificación por absorción. Se utilizan ampliamente, debido a la eficiencia y reactividad del sulfuro con la mayoría de los metales (Horikawa 2004). Los sistemas más empleados son la absorción con agua como medio filtrante, el cual se pone en contacto con el biogás que se purifica en torres o columnas (rellenas o no) donde se efectúa la transferencia de masa del CO_2 y H_2S al agua que fluye a contracorriente. Esta es una metodología poco eficiente debido a las temperaturas y altas presiones de trabajo, que aumenta los costos de operación (Varnero *et al.* 2011).

Así mismo, la FAO (2011), propone el método de precipitación de sulfuros, el cual consiste en la adición de iones Fe^{2+} en la forma de cloruro de hierro (II) (FeCl_2) o los iones Fe^{3+} en las formas de cloruro de hierro (III) o sulfato de hierro (II). Permiten la precipitación de azufre a una forma estable que permanece en el residuo. También existe el método de carbón activado el cual consiste en pasar el biogás por filtros de carbono activado. En el caso de generación de biogás libre de oxígeno donde se presentan concentraciones medias a altas de H_2S , en la superficie de carbón activado se adsorbe el H_2S molecular. Sin embargo, generalmente la eficiencia de la descontaminación no es suficiente, por lo que se requiere el uso de catalizadores, para incrementar la velocidad de reacción de oxidación del H_2S a azufre elemental (FAO 2011).

La FAO (2011), también describe el método de enlace químico de zinc que principalmente se utiliza en plantas agrícolas pequeñas, debido a que es posible producir un biogás con bajas concentraciones de sulfuro de hidrógeno. Consiste en hacer pasar el biogás a través de un cartucho de óxido de zinc (ZnO) que captura el azufre dentro del cartucho, el cual debe ser remplazado cuando el medio filtrante se satura. Finalmente, el método de filtración por membrana cuyo objetivo principal es el de “filtrar” el biogás a través de una membrana selectiva (Fernández 2004). El factor determinante en este proceso es la permeabilidad que poseen las moléculas que componen la corriente de gas a purificar.

Métodos biológicos para la eliminación de sulfuro de hidrógeno. Además de las técnicas fisicoquímicas para la purificación de biogás, existen los métodos biológicos o de biofiltración, que han sido probados a escala de laboratorio y pruebas piloto. Estos métodos utilizan la capacidad metabólica de algunos microorganismos que degradan sustancias contaminantes como el sulfuro de hidrogeno (Soreanu 2008). Se basa en la oxidación microbiológica de H_2S a compuestos de azufre de fácil eliminación, como azufre elemental (S^0) o sulfatos (SO_4^{-2}), se fija CO_2 simultáneamente como función estequiométrica de la oxidación del sulfuro.

De acuerdo a la FAO (2011), existen distintos métodos de desulfuración como la biológica, que consiste en el uso de microorganismos para la remoción de H_2S presente en el biogás. Se basa en la oxidación microbiológica de H_2S a compuestos de azufre de fácil eliminación, como azufre elemental o sulfatos. Para que ocurran estas reacciones, los microorganismos requieren de carbono y sales inorgánicas (N, P, K) como nutrientes al igual que elementos traza (Fe, Co, Ni). En el caso de los microorganismos aeróbicos que atacan H_2S , es esencial la adición de aire a una composición de 4-6% del biogás para que los microorganismos se desarrollen correctamente. La gran ventaja que presentan estas técnicas, en comparación de los métodos fisicoquímicos es la carencia de contaminantes secundarios, menores costos de inversión y operación (Pérez y Villa 2005).

Según Muche y Zimmermann (1985), existen otros métodos de purificación del biogás como el uso de cal (que es el procedimiento más antiguo). Este no se aplica a escala industrial debido a que en presencia de grandes cantidades de CO_2 en el gas, es difícil lograr una eliminación satisfactoria del H_2S . Finalmente el uso de masas purificadoras, que consiste en mezclas de minerales naturales que contienen hidróxido de hierro u oxihidrato férrico, que al reaccionar el H_2S presente en el biogás lo captura en forma de sulfuro de hierro.

Antecedentes. Varias Universidades como la universidad EARTH en Costa Rica han realizado estudios acerca de filtración con materiales orgánicos como el EM-compost y lombricompost. De los dos sustratos utilizados, el que muestra mayor eficiencia en la retención de H_2S es el EM-compost y el filtro de mayor eficacia utilizado con ambos sustratos fue el de 200 cm de longitud en donde tuvieron resultados satisfactorios con una remoción máxima de un 96.7% de sulfuro de hidrogeno. Se logró determinar que, tanto el tipo de sustrato, como la longitud del filtro, influyen en la eficiencia de retención, es decir que hay interacción entre ellos. Por ello se puede notar que a mayor longitud del filtro, la retención aumenta, en ambos sustratos (Botero *et al.* 2009).

La capacidad de fijación o retención del H_2S por parte del EM-compost, se podría atribuir a sus características biológicas y físico-químicas (alto contenido de hierro que convierte y retiene el H_2S en forma de sulfato de hierro, no tóxico ni corrosivo). El EM-compost contiene materia orgánica en proceso de fermentación, mientras que el lombricompost es un material orgánico estable, el cual ha sido procesado por el tracto digestivo de la lombriz, teniendo así una menor reacción. (Botero *et al.* 2009).

Otro ejemplo es la investigación realizada por la Corporación Biotec, el cual se basó en la utilización de bagazo de caña y piedra pómez inoculado con lodos que contienen bacterias consumidoras de azufre, las cuales son las encargadas junto con el bagazo de eliminar el H_2S . La capacidad máxima de eliminación del bagazo se determinó en $100 \text{ g } H_2S / m^3 - h$ aproximadamente y la de la mezcla de bagazo piedra pómez en $80 \text{ g } H_2S / m^3 - h$ (Chávez *et al.* 2003). Todas estas investigaciones se realizaron con el propósito de buscar mejores alternativas para sustituir los métodos tradicionales de desulfuración. Dichos métodos tienen una alta eficiencia pero presentan altos costos de mantenimientos y una reducida vida útil. Los materiales utilizados en estos métodos, en comparación con los sistemas de filtros de materiales biodegradables (lombricompost) y bacterias consumidoras de azufre mencionados anteriormente, aparte de presentar alta eficiencia, presentan un bajo costo de mantenimiento y sus residuos una vez terminada su vida útil son aprovechados para incorporarlos a un ciclo cerrado de nutrientes.

Se pretende la selección de un medio filtrante alternativo para la remoción de H_2S y así mejorar la calidad del biogás para promover el uso de esta tecnología en zonas rurales. Con lo anteriormente planteado en esta investigación se pretende alcanzar los siguientes objetivos:

- Determinar la eficiencia de la remoción del H_2S en los medios filtrantes de carbón vegetal y bokashi.
- Determinar si existe una diferencia significativa en la concentración del biogás tratada por cada uno de los medios filtrantes a evaluar.
- Determinar la capacidad de remoción del H_2S que determine la vida útil de los materiales filtrantes.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se construyeron dos sistemas de filtración para el complejo de biodigestores, contruidos para la evaluación de los diferentes medios filtrantes. El primer sistema de filtración está constituido por cuatro barriles de plástico que en su interior contienen los medios filtrantes, que tendrá la finalidad de evaluar la eficiencia de reducción de H_2S de cada medio filtrante. El segundo sistema de filtración que es una copia en menor escala, pero conserva las proporciones de material del primer sistema. Este tiene como objetivo la determinación de la curva de saturación de los medios filtrantes, es decir, el volumen de biogás que puede ser tratado antes de que su eficiencia de remoción se agote.

El MULTITEC 540 es un equipo que cuenta con un electrodo alargado el cual succiona el biogás y lo transporta hacia el aparato y dentro del mismo se encuentran los sensores electroquímicos e infrarrojos. El electrodo alargado el cual es el que succiona el biogás es introducido en las áreas donde se quiere hacer la medición y es flexible para facilitar su manejo. Los dos sistemas de filtros se encuentran bajo techo, esto debido a que por los factores climáticos adversos el sistema puede recibir daños o en dado caso los cambios drásticos de temperatura pueden contribuir al deterioro o alteración de los materiales con los que están contruidos los sistemas. Se explica en los siguientes párrafos los materiales y procedimientos para la construcción de los sistemas.

Sistema 1. Para la construcción de los filtros del primer sistema, se tomo el diseño establecido en el “Manual de construcción de un filtro para el H_2S del biogás” (Oblitas 2012). Este sistema consta de cuatro filtros, los cuales son barriles de plástico con una capacidad de 150 litros. El sistema de filtros está conectado por tuberías y accesorios de PVC. El sistema se encuentra conectado en forma paralela para medir la eficiencia individual de cada filtro, esto con fines de investigación y en serie para medir la eficiencia colectiva del sistema. Cada filtro cuenta con válvulas que se encuentran antes y después de que el biogás pase por el filtro, las cuales controlan la entrada y salida de forma independiente del biogás. Cada filtro cuenta con dos aberturas selladas con tapones removibles, la primera abertura se encuentra antes de la entrada del biogás al filtro y la segunda después de la salida del biogás en el filtro. Estas con el fin de facilitar la introducción del MULTITEC 540 para la medición del H_2S .

Cada filtro cuenta con tres capas las cuales tienen un volumen diferente debido a que el barril de plástico no tiene forma de cilindro sino que tiene distintos diámetros por lo cual es necesario calcular el diámetro promedio por cada sección. Los cuatro filtros en su interior están dividido en cinco secciones de 16 cm. La primera y la última sección se encuentran vacías para permitir la entrada y salida del biogás y las secciones centrales contienen los materiales filtrantes. Entre la primera y segunda sección de cada filtro, se encuentra una tapadera de plástico la cual está llena de agujeros para permitir el paso del biogás y a la vez servir de soporte de los materiales filtrantes. Los materiales utilizados fueron cáscara de coco, grava, arena, aserrín, carbón vegetal y bokashi. No se requirió de maquinaria especializada para reducir el tamaño de las partículas, si no con instrumentos como machetes o cuchillos se disminuyó el tamaño de las mismas, las fibras de coco se

encontraban sueltas de su estado original, el aserrín con un tamaño menor a un cm, el carbón vegetal tenía un tamaño de tres a cinco cm, la grava con un tamaño de uno a dos cm. Para los primeros dos filtros los materiales filtrantes están distribuidos en base a sus funciones (Cuadro 2).

Cuadro 2. Materiales para filtros uno y dos

Capa	Mezcla	Relación	Volumen (m ³)
1	Cáscara de coco/grava	2:1	0.03
2	Aserrín/arena	5:1	0.04
3	Carbón Vegetal	1	0.03

La segunda sección que sería la primera capa de medio filtrante es la mezcla de cáscara de coco y grava, la cual cumple la función de absorción de humedad, la tercera sección que corresponde a la segunda capa de medios filtrantes es la mezcla de aserrín y arena que también cumple la función de absorción de humedad estas con la finalidad de que una vez el biogás llegue a la tercera y última capa que es de carbón vegetal, a esta se le facilite la adsorción del H₂S.

Para los últimos 2 filtros los materiales filtrantes están distribuidos en base a sus funciones (Cuadro 3).

Cuadro 3. Materiales para Filtros tres y cuatro

Capa	Mezcla	Relación	Volumen (m ³)
1	Cáscara de coco/grava	2:1	0.03
2	Aserrín/arena	5:1	0.04
3	Bokashi	1	0.03

Al igual que en los 2 primeros filtros las capas de materiales filtrantes están colocadas de la misma manera y con la misma finalidad, siendo la mezcla de cáscara de coco y grava la primer capa de material filtrante. De la misma forma los filtros contienen una tapadera con agujeros que es la división entre la primera sección y la segunda del filtro y es la base de soporte de los materiales de filtración. La segunda capa es la mezcla de aserrín y arena. A diferencia de los primeros dos filtros la última capa de materiales de filtración es bokashi. Los materiales seleccionados para la construcción de los filtros y la tubería fueron elegidos ya que tienen una mayor resistencia a corrosión, tienen un precio más accesible y son fáciles de conseguir.

Sistema 2. Se utilizaron mangueras transparentes de una pulgada de diámetro y 80 cm de largo, tubos y accesorios de PVC. A diferencia del flujo del primer sistema, en este sistema se requirió de una bomba para aumentar la presión del biogás y permitir el paso del mismo a través de filtros construidos a escala. Las aberturas se encuentran antes y después de los filtros, lo cual permite registrar la concentración de H_2S del biogás producido para calcular así la eficiencia de remoción de cada unidad. Los materiales utilizados en el segundo sistema son los mismos utilizados en el sistema anterior teniendo las mismas mezclas a iguales proporciones, pero sobre todo mantienen el mismo orden de deposición de los materiales filtrantes.

El sistema se encuentra conectado en paralelo. Al final de los filtros se encuentran instalados medidores de flujos. Los medidores de gas trabajan a una presión máxima de 10 kPa, por tal motivo antes de que el biogás pase por los filtros se instaló un manómetro, el cual nos indicó la presión a la cual se encontraba el biogás para evitar posibles daños en los medidores de flujo. La curva de saturación de cada filtro se determinó mediante el porcentaje de remoción de H_2S luego de que el biogás pasó a través del medio filtrante en un tiempo dado. Para poder hacer las mediciones, cada unidad de filtración cuenta con dos aberturas selladas con taponetes removibles en los cuales se introducía el MULTITEC 540 y se realizaban las lecturas.

Descripción de los medios filtrantes. Los materiales que se utilizaron como medio filtrante en los filtros fueron elegidos principalmente por sus características fisicoquímicas y la capacidad de remoción de sulfuro de hidrógeno del biogás. Se utilizaron como medios filtrantes la cáscara de coco debido a que en sus propiedades físicas presenta característica de porosidad total de 80 a 82% y en sus propiedades químicas se presentan porcentajes de calcio mayor al 200%.

Otro medio filtrante seleccionado fue el aserrín debido a que presenta una porosidad total del 75 al 90% y en sus propiedades químicas presenta concentraciones de calcio de 2%. También como medio filtrante se tiene el carbón vegetal debido a que presenta una capacidad de aire de 50 a 60% y porosidad total de 65 a 80%, pero sobre todo tiene una mala capilaridad la cual es importante debido a que el agua no satura los poros del carbón vegetal. Por último se seleccionó el bokashi como medio filtrante debido a que cuenta con altas concentraciones de hierro (5593 ppm), concentraciones de calcio de 5% y su materia orgánica se encuentra en un proceso de fermentación.

Sistema de filtración uno. En este primer sistema la variable a considerar es la eficiencia de remoción de H_2S de cada filtro, para distinguir si existe una diferencia significativa al utilizar como medio filtrante el carbón vegetal o el bokashi, concluyendo de esta manera cual medio filtrante tendrá la mayor capacidad de remoción de H_2S . El primer paso que se realizó fue abrir todas las válvulas de los biodigestores para que el biogás fuera saturando la tubería. Luego se procedió a la toma de la composición del biogás antes de pasar por el filtro con el MULTITEC 540. Una vez estabilizado el MULTITEC 540 se procedió hacer la lectura en la abertura que se encuentra después del filtro para determinar la reducción

de H_2S . Considerando que se debe evitar los errores de muestreos se procedió a mantener encendida la estufa para estar quemando el biogás filtrado. Este proceso se realizó de forma consecutiva en los cuatro filtros del primer sistema durante un período de cincuenta días.

Posteriormente se procede a ingresar los datos de eficiencias al programa estadístico de SPSS. En el programa estadístico se procede a realizar la prueba paramétrica la cual es T STUDENT. Se utilizó una prueba paramétrica debido a que se basa en una forma determinada de la distribución de los valores, que generalmente es una distribución normal, en la población de la que se obtiene la muestra experimental (Pardo 2001).

Sistema de filtración dos. Al igual que en el sistema anterior después de haber abierto las válvulas de los biodigestores se procedió a abrir la válvula que alimenta los filtros del segundo sistema. Este sistema cuenta con una bomba que es alimentada con energía solar, la cual tiene como finalidad aumentar la presión dentro del sistema ya que de forma natural el biogás tiene un desplazamiento lento lo cual impide que funcionen de manera adecuada los medidores de flujo.

Al igual que los filtros del primer sistema la toma de composición del biogás se realizó con el MULTITEC 540 antes y después de que el biogás pase por los medios filtrantes. En este sistema es fundamental saber la cantidad exacta de H_2S en ppm que se ha reducido, porque en base a este dato podemos determinar la curva de saturación. También hay que tener muy en cuenta la cantidad de biogás que ha pasado por los mismos por tal motivo al final de cada filtro hay medidores de flujo, los cuales van registrando el volumen total de biogás filtrado. Este proceso se repite en los demás filtros teniendo siempre presente de que la estufa tiene que estar encendida para que el biogás filtrado se vaya eliminando del sistema y evitar errores en la toma de datos. La toma de datos se realizó con una frecuencia de siete días consecutivos, ya que luego de siete días las mediciones de H_2S indicaron que los materiales se habían saturado.

Los datos recopilados en el sistema 2 sobre la composición de biogás y el volumen de biogás filtrado se introdujeron en una plantilla de Excel en donde lo que se calculó la reducción sulfuro de hidrógeno. Una vez calculado la reducción de H_2S se procede a calcular la curva de saturación, la cual consiste en graficar las reducciones de H_2S del biogás en base al volumen de biogás filtrado.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Sistema uno: a partir de los resultados obtenidos se determinó que los filtros de carbón vegetal tuvieron una eficiencia promedio de remoción de sulfuro de hidrógeno del 97% con un valor mínimo de remoción de 90% y un valor máximo de remoción de 99.6%. Por otro lado el biogás que se hizo pasar por los filtros que contenían bokashi tuvo una eficiencia promedio de remoción de sulfuro de hidrógeno de 96% con un valor máximo 99.6% y un valor mínimo de remoción de 87.7%. (Cuadro 4).

Cuadro 4. Eficiencia de remoción de sulfuro de hidrógeno del sistema uno

		Filtros				
		N	Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar
1	Carbón Vegetal	102	90.00	99.59	97.08	1.87
		102				
2	Bokashi	102	87.72	99.59	96.01	2.74
		102				

Se realizaron dos pruebas, la primera prueba consta de 51 observaciones. Las diferencias en los porcentajes de reducción de H_2S se debe a la forma en que se encuentran disponibles las moléculas de carbono en el medio filtrante de carbón vegetal y bokashi, ya que en el carbón vegetal las partículas de carbono no se encuentran asociadas con otros compuestos caso opuesto al bokashi que debido al proceso de descomposición de la materia las partículas de carbono se encuentran menos disponibles porque están asociadas con otros compuestos. Se realizó la prueba estadística T Student, en la cual se obtuvo una significancia estadística de 0.001, esto nos indica de que a pesar de que ambos medios filtrantes tienen una alta eficiencia de remoción de H_2S se encontró una diferencia significativa entre ambos medios filtrantes, siendo el medio filtrante de carbón vegetal más eficiente que el medio filtrante de bokashi. También se realizó una prueba T Student a las mediciones de composición de biogás después de haber pasado por los filtros, para determinar con cuál de los medio filtrantes el biogás salía con mayor pureza, el análisis estadístico demostró de que existe una diferencia significativa del 0.002, queriendo decir de que el biogás después de pasar por el medio filtrante de carbón vegetal sale con una mayor calidad a comparación del biogás que pasa por el medio filtrante de bokashi.

Sistema 2. En el filtro de carbón vegetal se dio un flujo de biogás de 7.94 m^3 en un tiempo de 4 horas y 35 minutos. En base al volumen total de biogás filtrado hubo un total de 62.11 ppm de sulfuro de hidrógeno removidas. Por otro lado se determinó que por cada 81.07 cm^3 (volumen de capa) de carbón vegetal se removió 493.15 cm^3 de H_2S lo que equivale a que por cada m^3 de carbón vegetal se removía 5.89 m^3 de sulfuro de hidrógeno.

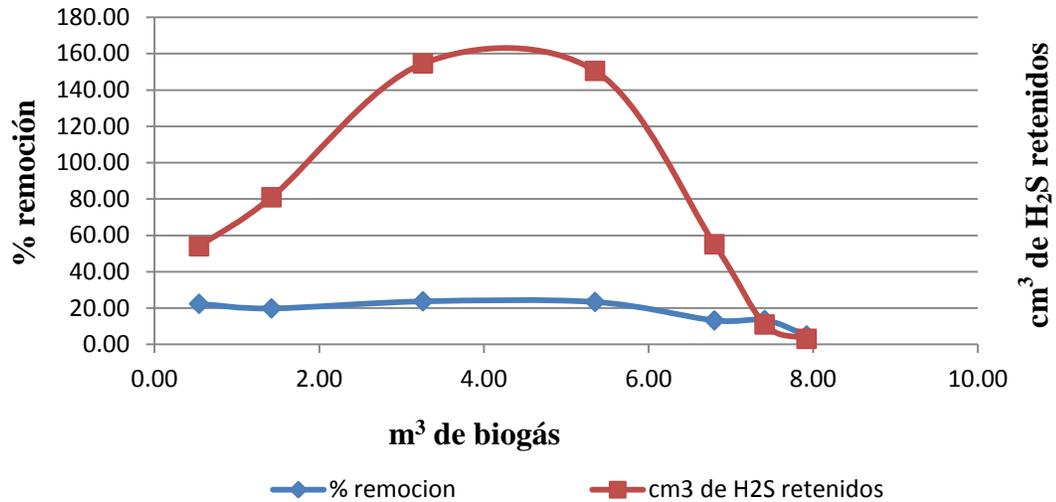


Figura 1 Capacidad de remoción de sulfuro de hidrógeno en el filtro de carbón vegetal

En los filtros de carbón vegetal el proceso de desulfuración que sucedió fue una reacción física por adsorción, en donde las partículas de sulfuro de hidrógeno quedan adheridas en los espacios porosos del carbón vegetal debido a fuerzas electroestáticas débiles. Un factor determinante que le permite al carbón vegetal tener una buena propiedad de adsorción es su mala capilaridad, debido a que esta forma una capa permeable lo que hace que los espacios porosos del carbón vegetal no se saturan de agua y estén disponibles para que la fuerza electroestática débil fije las partículas de sulfuro de hidrógeno en ellos. Podemos observar que a lo largo de la investigación la variable de eficiencia de remoción se mantuvo estable mientras que la variable que tubo cambios considerables fue la variable de volumen en cm^3 de H_2S retenido, debido a que esta variable depende de la cantidad de biogás que entre al sistema y de la composición química del mismo.

En el filtro de bokashi hubo un flujo de biogás de 1.70 m^3 un tiempo de 4 horas y 35 minutos. Este medio filtrante no alcanzó una saturación completa que el carbón vegetal ya que el diseño a escala dificultaba el paso del biogás a través de las partículas de bokashi. Sin embargo los resultados obtenidos en este periodo de tiempo permitieron extrapolar el volumen de biogás que este medio filtrante podía tratar. Los resultados de la extrapolación nos indicaron que con 4.24 m^3 de biogás el medio filtrante de bokashi se iba a saturar. En base al volumen total de biogás calculado se determinó que habría un total de 88.92 ppm de sulfuro de hidrógeno removidas.

Por otro lado se determinó que por cada 81.07 cm^3 (volumen de capa) de bokashi se removió 377.02 cm^3 de sulfuro de hidrógeno lo que equivale a que por cada metro cúbico de bokashi se removía 4.65 m^3 de sulfuro de hidrógeno. Esta poca saturación de los materiales fue debida a externalidades como el volumen de biogás pasado por el sistema de filtración, la compactación de los materiales por el pequeño diámetro de la manguera y difícil maniobrabilidad.

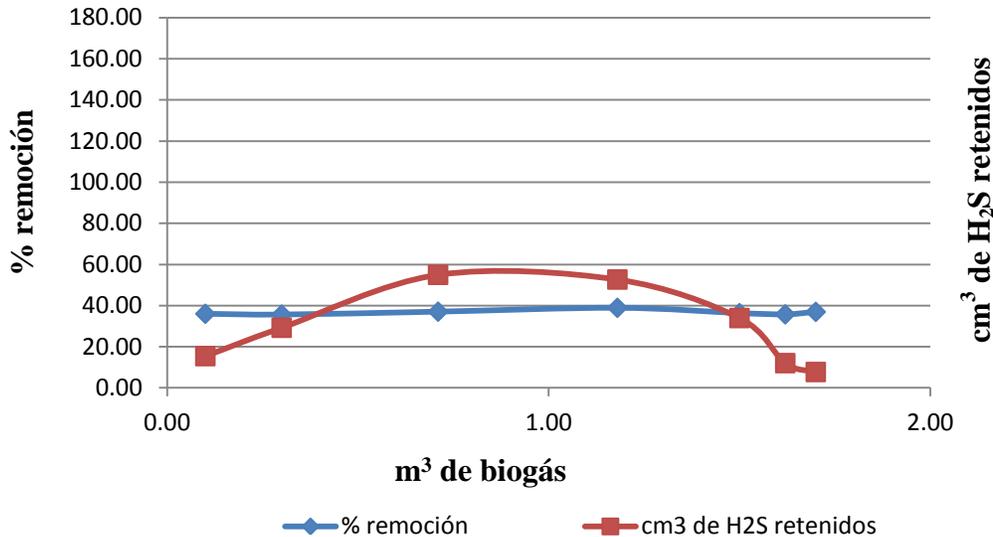


Figura 2 Capacidad de remoción de sulfuro de hidrógeno en el filtro de bokashi.

En los filtros de bokashi el proceso de desulfuración fue por medio de una reacción química, debida al alto contenido de hierro que contiene el bokashi que es mayor a 5000 ppm, de acuerdo a resultados obtenidos en el laboratorio de suelos de Zamorano, lo cual convierte y retiene el H_2S en forma de sulfato de hierro, no tóxico ni corrosivo. Al igual que como ocurrió en los filtros de carbón vegetal la variable de porcentaje de eficiencia de remoción se mantuvo estable a lo largo de la investigación habiendo nada más variaciones en la variable de volumen de H_2S retenido debido a las razones mencionadas anteriormente.

En el sistema dos se determinó que la remoción de sulfuro de hidrógeno no depende directamente del porcentaje de eficiencia del filtro, sino del volumen de biogás ingresado en el mismo, al igual que la concentración en ppm contenida en el biogás. En las figuras uno y dos se observó que a medida que aumentaba la variable de retención la variable de eficiencia no aumentaba proporcionalmente con la variable de retención, lo que nos indica que los picos más altos en la variable de retención se dan por el volumen de biogás ingresado en ese momento. En base al volumen (m^3) de sulfuro de hidrógeno retenido por cada m^3 de medio filtrante calculados en el sistema dos, se calculó que la capa de carbón vegetal del sistema uno que tienen un volumen de 0.03 m^3 tienen una capacidad de remoción de 0.19 m^3 y que por cada metro cúbico de carbón vegetal se pueden retener

5.89 m³ de sulfuro de hidrógeno. La capa de los filtros de bokashi con un volumen de 0.03 m³ tienen una capacidad de remoción de 0.15 m³ indicando que por cada metro cúbico de bokashi se puede retener 4.65 m³ de sulfuro de hidrógeno, demostrando de que un metro cúbico de carbón vegetal tiene la capacidad de remover 1.24 m³ adicionales de H₂S en comparación al mismo volumen de bokashi. El volumen máximo de biogás que pueden filtrar los filtros de carbón vegetal es 778.86 m³, mientras que los filtros de bokashi pueden filtrar un volumen de biogás total de 615.40 m³.

4. CONCLUSIONES

- A pesar que la prueba estadística T Student que muestra una diferencia significativa entre ambos medios filtrantes los porcentajes de remoción obtenidos nos indican que la calidad del biogás será aceptable para ambos casos se tienen eficiencias de remoción mayor al 95%.
- Así mismo se obtuvo una diferencia significativa al realizar el análisis estadístico en el conjunto de datos de las concentraciones de H₂S en la salida de los filtros determinando que hay una diferencia entre en la pureza de biogás después de haber pasado por cada medio filtrante, en donde el biogás que pasó por el filtro de carbón vegetal tiene una mayor pureza que cuando pasa por el bokashi.
- El sistema muestra que la capacidad de retención de H₂S es mayor para el filtro de carbón que para el de bokashi, donde un metro cúbico de carbón vegetal tiene la capacidad de remover 1.24 m³ adicionales de H₂S en comparación al mismo volumen de bokashi.
- Los resultados muestran que con un mismo volumen de medio filtrante, el carbón vegetal tendrá una vida útil mayor a la vida útil mayor al bokashi será expresada al volumen de biogás que puede tratar o H₂S que puede remover. Con los datos analizados, la cantidad de biogás que puede tratar los filtros de carbón 778.86 m³ y los filtros de bokashi una capacidad de 615.40 m³.

5. RECOMENDACIONES

- Para el uso adecuado de los filtros en un sistema de biodigestores es recomendable colocar un medidor de volumen de biogás para estimar el tiempo de vida útil de los medios filtrantes.
- A pesar de que el carbón vegetal presenta mejores eficiencias y mayor vida útil, en su análisis de su ciclo de vida el bokashi presenta menos impactos ambientales por su facilidad de reincorporación al suelo como medio fertilizante.
- Realizar pruebas con filtros de distintos diámetros para determinar curva de saturación en cada medio filtrante.
- Determinar la combinación de medios filtrantes de material biodegradable incrementara su vida útil, probar otros filtrantes para determinar vida útil y potencial de reducción de H₂S.
- Evaluar la mejora de los abonos al reincorporar los medios filtrantes agotados al suelo o como mezcla de abono.

6. LITERATURA CITADA

Agency for Toxic Substances and Disease Registry. 1999. Departamento de salud y servicios humanos de los EE.UU. Servicio de Salud Pública (en línea). Consultado 10 agosto. 2012. Disponible en http://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts46.pdf

Botero R., Maldonado, J., Coto E., Murillo J., 2007. Implementación de un sistema para generar electricidad a partir de biogás en la finca pecuaria integrada de EARTH. Universidad EARTH. Las Mercedes de Guácimo, Limón, Costa Rica. 129 – 138 p.

Botero R., Tax O., Revelo D., Acosta M., 2009. Capacidad de filtración y retención del sulfuro de hidrogeno del biogás, en dos diferentes sustratos orgánicos (EM-Compost y Lombricompos). Universidad EARTH. Las Mercedes de Guácimo, Costa Rica. 109 – 113 p.

Botero, R. y Preston, T., (1987). Biodigestor de bajo costo para la producción de combustible y fertilizante a partir de excretas. Manual para su instalación, operación y utilización (en línea). Consultado 15 agosto. 2012. Disponible en <http://www.utafoundation.org/publications/botero&preston.pdf>

Calderón F. y Cevallos F. 2001. Los Sustratos. Laboratorios Calderón Ltda. Bogotá, Colombia (en línea). Consultado 3 septiembre. 2012. Disponible en http://www.drcalderonlabs.com/Publicaciones/Los_Sustratos.htm

Chávez H., Mora A., Cabra J., Carmona Y., Revah S., Gnecco G. 2004. Biofiltración de ácido sulfhídrico utilizando bagazo de caña de azúcar y piedra pómez como material de soporte. Corporación Biotec.. Bogotá, Colombia. Volumen 5. 8 -14 p.

FAO. 2011. Manual de Biogás, “Chile: Remoción de Barreras para la Electrificación Rural con Energías Renovables”. Santiago, Chile. Editado por: Proyecto CHI/00/G32. 18 p.

Fernández A. 2006. Fundación Erosky, Biodigestores la energía del estiércol (en línea). Consultado 6 septiembre. 2012. Disponible en http://www.consumer.es/web/es/medio_ambiente/energia_y_ciencia/2006/05/22/152178.php

Fernández E, Montalvo S. 2003. Métodos Económicos y Ecológicamente Viables para purificar Gases Contaminantes. Facultad de Ingeniería Química, Instituto Superior Politécnico Jose Antonio Echeverría (ISPJAE). Habana, Cuba. Edit. Oficina Cubana de la Propiedad Intelectual. 10 p.

Fernández, E. 2004. Procedimiento para la purificación de biogás. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. Publicación CU 23003 Al. Habana, Cuba. Edit Oficina Cubana de la Propiedad Intelectual. 18 p.

Horikawa, M. 2004. Chemical absorption of H₂S for biogas purification. ELSEVIER. (Tailandia). 3 (21): 415 -422.

Instituto de Investigaciones Eléctricas. 1980. Digestores de desecho organicos. Boletín Energético No.14, Organización Latinoamericana de Energía, Cuernavaca, Morelos, México (en línea). Consultado 23 agosto. 2012. Disponible en <http://www.utafoundation.org/publications/botero&preston.pdf>

Llaneza, H. 2010. Estudio de viabilidad de sistemas de purificación y aprovechamiento de biogás. Cap. 1. Caracterización, purificación y control del biogás. PSE PROBIOGAS (en línea). Consultado 16 septiembre. 2012. Disponible en [http://213.229.136.11/bases/ainia_probiogas.nsf/0/7559B244B63EB155C125753F0058E255/\\$FILE/Cap1.pdf](http://213.229.136.11/bases/ainia_probiogas.nsf/0/7559B244B63EB155C125753F0058E255/$FILE/Cap1.pdf)

Martí J. 2008. Guía de Diseño y Manual de instalación de biodigestores familiares. GTZ (en línea). Consultado 12 septiembre. 2012. Disponible en http://www.endevbolivia.org/images/stories/proyecto_endev/biogestores/Descargas/Difusion/Manualconstruccion-BDG.pdf

Muche, H. Zimmermann, H. 1985. La Purificación del Biogás. República Federal de España. Edit. GATE. 17 - 20 p.

Navarro J, Hernández Y, Hernández H. 2007. Diseño de un biofiltro para disminuir la concentración de H₂S de un reactor Anaeróbico de flujo a pistón. Revista de la Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Universidad Industrial de Santander (en línea). Consultado 7 septiembre. 2012. Disponible en <http://revistas.uis.edu.co/index.php/revistausingenierias/article/view/410>

Oblitas S. 2012. Manual de construcción de un filtro para el ácido sulfhídrico del biogás. Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras. 4–14 p.

Pardo A., Ruiz M., 2001. SPSS 10.0 Guía para el análisis de datos. Universidad Autónoma de Madrid, España. 235-249 p.

Pérez, H. y Villa, P. 2005. Desulfuración biológica: una alternativa para el tratamiento de emisiones de gases a la atmosfera. Agua Latinoamericana. Vol. 5 (3): 17-20 (en línea). Consultado 28 agosto. 2012. Disponible en <http://www.scielo.cl/pdf/infotec/v23n2/art05.pdf>

Pérez, M. 2008. Utilización de biogás en pilas de combustible. Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas. España, 68 p. (en línea). Consultado 16 septiembre. 2012. Disponible en

http://www.ciemat.es/CIEMATportal/recursos/doc/Areas_Actividad/Prospectiva_Tecnologica/476900838_21120091174.pdf

Pinjing, 2001. Removal of hydrogen sulfide and methyl mercaptan by a packed tower with immobilized micro-organism beads. *Water Science Technology*. Vol. 44 (9): 327-333 (en línea). Consultado 5 septiembre. 2012. Disponible en <http://www.scielo.cl/pdf/infotec/v23n2/art05.pdf>

Soreanu G. 2008. Laboratory pilot scale study for H₂S removal from biogas in an anoxic biotrickling filter". *Water Sci. Technol.* 57 (2), 201-207 (en línea). Consultado 5 septiembre. 2012. Disponible en <http://www.scielo.cl/pdf/infotec/v23n2/art05.pdf>

Varnero M. Carú M., Galleguillos K., Achondo P. 2011. Tecnologías disponibles para la purificación de biogás utilizado para la generación eléctrica. Facultad de Ciencias Agronómicas. Universidad de Chile. Santiago, Chile. Vol. 23 N° (en línea). Consultado 5 septiembre. 2012. Disponible en <http://www.scielo.cl/pdf/infotec/v23n2/art05.pdf>

7. ANEXOS

Anexo 1. Construcción sistema uno



Anexo 2. Sistema filtración dos.



Anexo 3. Propiedades físicas de la cáscara de coco.

Densidad	0.08 - 0.12 g/cm ³
Porosidad total, % vol.	80-82%
Espacio poroso mayor (>200 um) % vol.	8-12%
Espacio poroso intermedio (>30 y <200) % vol.	4-6%
Espacio poroso capilar, % vol.	60-66%
Capacidad de aire, % vol.	20 - 30%
Agua fácilmente disponible, AFD, % vol.	45-60%
Fuente: Calderón 2001	

Anexo 4. Propiedades químicas cáscara de coco.

CE (dS m-1)	0.75-3.5
pH	5.2-6.3
N%	1
P%	8
K%	150-249
Ca%	>200
Mg%	>70

Fuente: Calderón 2001.

Anexo 5. Propiedades físicas del aserrín.

Densidad aparente; kg/m ³	0.3
Porosidad total % vol.	75-90
Capacidad de aire	10-20
Agua fácilmente disponible AFD % vol.	20-30
Agua de reserva; AR % vol.	5-10
Agua difícilmente disponible; ADD % vol.	2-5
Capilaridad	Mala

Fuente: Calderón 2001.

Anexo 6. Propiedades químicas del aserrín.

CE (dS m-1)	0.2
N%	0.35
P%	0.06
K%	0.03
Ca%	0.28/ 1.30
Mg%	0.49
Fe (ppm)	0.6622
Mn (ppm)	0.0132
Cu (ppm)	0.0013
Zn (ppm)	0.0022
Humedad%	73.3

Anexo 7. Propiedades físicas del carbón vegetal.

Densidad aparente; kg/m ³	0.5
Porosidad total% vol.	65-80
Capacidad de aire	50-60
Agua fácilmente disponible AFD% vol.	12-30
Agua de reserva; AR % vol.	5-15
Agua difícilmente disponible; ADD% vol.	2-5
Capilaridad	Mala
Humedad%	7.9

Anexo 8. Propiedades químicas del bokashi

CE (dS m-1)	39
N%	1.69
P%	1.76
K%	1.75
Ca%	5.08
Mg%	0.73
Fe (ppm)	5593
Mn (ppm)	519
Cu (ppm)	58
Zn (ppm)	396
Humedad%	19.4

Fuente: Zamorano 2012.

Anexo 9. Diagrama de proceso del biogás

