EVALUACIÓN DE UN REACTOR DE BIOPELÍCULA ADHERIDA PARA EL TRATAMIENTO DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)

LAURA YEDXENIA MALDONADO MANRIQUE

ANDRÉS FELIPE RANGEL VEGA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
CENTRO DE ESTUDIOS E INVESTIGACIONES AMBIENTALES
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA
2010

EVALUACIÓN DE UN REACTOR DE BIOPELÍCULA ADHERIDA PARA EL TRATAMIENTO DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)

LAURA YEDXENIA MALDONADO MANRIQUE

ANDRÉS FELIPE RANGEL VEGA

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:

Ingeniero Químico

Director:

Ph. D. Marianny Yajaira Combariza M.

Codirector:

M.Sc. Marisol Vergara Mendoza

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
CENTRO DE ESTUDIOS E INVESTIGACIONES AMBIENTALES
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA
2010

DEDICATORIA

En primer lugar a Dios, por ser mi guía y mi fortaleza, y por darme la oportunidad de poder superarme y culminar satisfactoriamente mi trayectoria universitaria.

A mis padres, hermanos y toda mi familia por su apoyo constante, palabras de aliento y su compañía en los momentos difíciles.

A Pipe mi compañero de proyecto por su paciencia y comprensión en la realización de este proyecto.

A Leoncio por su grandiosa colaboración, como compañero, amigo y confidente en lo que significó alcanzar este logro.

A Mauro por su apoyo incondicional y su total confianza, su motivación y compañía principalmente en esta etapa de mi vida.

A mis profesores, los cuales no sólo aportaron a mi vida conocimientos sino también experiencias que complementaron mi formación.

A todas las personas que de una u otra manera, me animaron y motivaron e hicieron parte de mi inolvidable tránsito por la Escuela de Ingeniería Química de la UIS.

A mis compañeros y amigos, por darme la oportunidad de compartir con ellos dentro y fuera de la universidad y especialmente por aportar un granito de arena que fue clave para conseguir mi tan anhelado título profesional.

Laura Yedxenia Maldonado Maurrigue.

DEDICATORIA

Este trabajo es dedicado a DIOS, que iluminó el camino correcto y a mi MADRE que me cuida desde el cielo, que con sus esfuerzos y sacrificios hizo posible el cumplimiento de esta meta.

A mis HERMANOS y a toda mi FAMILIA, que con su apoyo y confianza me dieron la fuerza necesaria para lograr mis objetivos.

A LUZ HELENA, quien con su compañía y afecto aportó motivos y propósitos continuamente.

A Yedxenia, mi compañera de proyecto que con su positivismo, esfuerzos y confianza, hicieron más grato el camino a recorrer para el desarrollo de este objetivo.

A todos mis amigos y compañeros con quienes compartí buenos y difíciles momentos, teniendo la dicha de crecer personal y profesionalmente.

Andrés Felipe Rangel Vega

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darnos fortaleza, sabiduría y la capacidad de culminar esta etapa de nuestra vida.

A la Universidad Industrial de Santander, sobre todo a la escuela de Ingeniería Química y a todo su cuerpo docente, por la formación y capacitación brindada durante toda la carrera.

Al Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales (CEIAM), por su apoyo constante y colaboración prestada durante el desarrollo del proyecto.

A la Doctora Marianny Yajaira Combariza por su dedicación y constante guía.

A la profesora Marisol Vergara Mendoza por brindarnos sus conocimientos, consejos, dedicación y constante colaboración durante el desarrollo de este trabajo.

A todas las personas que nos colaboraron para llegar a cumplir con el objetivo propuesto.

CONTENIDO

Pág.

INTRODUCCIÓN 15
1. CONCEPTOS TEÓRICOS 18
1.1 DIGESTIÓN ANAEROBIA 18
1.1.1 Etapas de la Digestión Anaerobia 18
1.1.2 Factores que Afectan la Digestión Anaerobia (DA) 20
1.2 DIGESTORES ANAEROBIOS 21
1.2.1 Digestor de Tanque Continuamente Agitado 21
1.2.2 Reactor de Contacto Anaerobio 22
1.2.3 Proceso Anaerobio de Manto de Lodo de Flujo Ascendente (UASB) 22
1.2.4 Sistemas de Lecho Móvil (lecho expandido y fluidizado) 23
1.2.5 Reactores de Biopelícula 23
1.3 BIOPELÍCULA ANAEROBIA 23
 Transferencia de masa a través de la Biopelícula 25
2. DESARROLLO EXPERIMENTAL 27
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS 31
3.1 COMPORTAMIENTO DEL pH EN EL PERÍODO DE ENSAYO 31
3.2 RELACIÓN DE AGV'S Y ALCALINIDAD 32
3.3 VARIACIÓN DE LOS SÓLIDOS TOTALES (ST) CON EL TIEMPO 33
3.4 PRODUCCIÓN DE METANO 34
3.5 CALIDAD DEL BIOGÁS 37
ANEXOS 45
ANEXO A. DETERMINACIÓN DE LOS AGV's 45
ANEXO B. EQUIPOS Y MATERIAL DE LABORATORIO UTILIZADOS 46

LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. Composición del Biogás.....18

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 1. Esquema de reacciones de la digestión anaerobia 19
Figura 2. Etapas en la formación de Biopelícula.....24
Figura 3. Procedimiento Experimental 27
Figura 4. Conexiones de los reactores a la bomba peristáltica.....28
Figura 5. Conexión de los reactores a sistema de medición.....29
Figura 6. Vista final de acondicionamiento reactores.....29
Figura 7. Reactor con PVC como soporte conectado a sistema de medición y bomba peristáltica.....30
Figura 8. Reactor con ladrillo como soporte conectado a sistema de medición y bomba peristáltica.....30
Figura 9. Esquema general del desarrollo experimental.....30
Figura 10. Variación del pH con el tiempo de ensayo.....31
Figura 11. Relación Alcalinidad-AGV's para el Ladrillo como soporte 32
Figura 12. Relación Alcalinidad-AGV's para el PVC como soporte 33
Figura 13. Variación de Sólidos Totales con el tiempo de ensayo.....34
Figura 14. Producción diaria de Metano 35
Figura 15. Porcentaje de gas presente en función del tiempo de ensayo para el Ladrillo 37
Figura 16. Porcentaje de gas presente en función del tiempo de ensayo para el PVC 37

RESUMEN

TITULO: EVALUACIÓN DE UN REACTOR DE BIOPELÍCULA ADHERIDA PARA EL TRATAMIENTO DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)[*].

AUTORES: MALDONADO MANRIQUE Laura Yedxenia, RANGEL VEGA Andrés Felipe.[**]

PALABRAS CLAVES: Digestión Anaerobia, Residuos sólidos urbanos, reactor de película adherida, Biogás.

DESCRIPCIÓN

Este trabajo presenta la evaluación del funcionamiento de dos reactores anaerobios de película adherida, los soportes utilizados fueron ladrillo y policloruro de vinilo (PVC) en forma cilíndrica. El sustrato utilizado fue el efluente de un reactor hidrolítico-acidogénico cuya alimentación estaba formada por fracción orgánica de residuos sólidos urbanos. Los sistemas fueron evaluados a temperatura ambiente, con una alimentación diaria de 100 ml, el inóculo utilizado fue una mezcla 50/50 V de lodo proveniente de una planta de tratamiento de aguas residuales y lodo porcícola. La variable respuesta de la evaluación de estos reactores fue la producción de biogás, formado por metano y dióxido de carbono, principalmente. Además, se realizó medición de pH, ácidos grasos volátiles, sólidos totales, demanda química de oxígeno.

Los resultados de producción de metano mostraron que el reactor con ladrillo como soporte presentó una mayor producción de metano (436 ml/d) comparado con el reactor con PVC (ml). Las diferentes variables medidas mostraron valores típicos del funcionamiento de un reactor anaerobio.

La importancia de este trabajo se muestra al evaluar un tipo de reactor que permite el tratamiento de fracción orgánica de residuos sólidos urbanos mediante la digestión anaerobia, permitiendo la obtención de un producto de valor agregado como es el metano y contribuir además en la disminución de los impactos ambientales generados por la disposición de estos residuos en los rellenos sanitarios.

[*] Proyecto De Grado

[**] Facultad de Ing. Físico-Químicas. Escuela de Ing. Química.
Director: Ph. D. Marianny Yajaira Combariza. Codirector: M.Sc. Marisol Vergara Mendoza

ABSTRACT

TITLE: EVALUATION OF AN ATTACHED BIOFILM REACTOR FOR THE TREATMENT OF ORGANIC FRACTION OF MUNICIPAL SOLID WASTE (MSW).*

AUTHORS: MALDONADO MANRIQUE Laura Yedxenia, RANGEL VEGA Andrés Felipe.**

KEY WORDS: Anaerobic Digestion, Municipal Solid Waste, attached film reactor, Biogas.

SUMMARY

This work presents the performance evaluation of two anaerobic attached film reactors for which brick and polyvinyl chloride (PVC) in cylindrical shape were used as support. The substrate used was the effluent of a hydrolytic-acidogenic reactor whose feed consisted of the organic fraction from municipal solid waste. The systems were tested at room temperature, with a daily feeding of 100 ml, the inoculum used was a 50/50 volume mixture of sludge from a treatment plant wastewater and pig slurry. The output variable of the evaluation of these reactors was the production of biogas, consisting of methane and carbon dioxide, mainly. pH, volatile fatty acids, total solids, and chemical oxygen demand tests were also performed.

The methane production results have shown that the reactor equipped with brick as supporting material exhibited a greater production of methane (436 ml / d) compared with the PVC equipped reactor (ml). The different measured variables showed typical values for the operation of an anaerobic reactor.

The importance of this work is shown by the evaluation of a type of reactor that allows the treatment of the organic fraction of municipal solid waste by anaerobic digestion, as it allows the collection of a value-added product such as methane and also helps in reducing the environmental impacts arising from the disposal of these wastes in landfills.

---

* Final studies work report.

** Physical-Chemistry Engineering Faculty. Chemical Engineering school.
Director: Ph. D. Marianny Yajaira Combariza. Codirector: M.Sc. Marisol Vergara Mendoza

INTRODUCCIÓN

Los residuos sólidos urbanos (RSU) forman parte de la realidad diaria, son causa de impactos ambientales negativos, por su disposición incorrecta, y por su desmedido aumento relacionado con el rápido crecimiento demográfico, la concentración de la población en centros urbanos, los procesos de transformación industrial agroalimentarios y el uso, cada vez más frecuente de envases sin retorno fabricados con materiales poco o nada degradables. [1, 2]

El problema de los residuos domiciliarios, que en otros países ha sido afrontado desde varios años atrás, en Colombia se empezó a tener en cuenta desde hace aproximadamente dos décadas, esta falta de interés ha llegado a causar crisis como el colapso de uno de los rellenos sanitarios más grandes del País: Doña Juana de Santa Fe de Bogotá [3].

Durante los últimos cinco años el Gobierno Nacional ha logrado grandes avances en materia de reglamentación y regulación de los sistemas de disposición final de residuos sólidos que se utilizan en el país, buscando con ello una visión integral de la prestación del servicio de aseo y la minimización de los impactos generados desde el punto de vista ambiental y de afectación a la salud de la población [4].
Es así como el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, MAVDT expidió las Resoluciones 1045 de 2003 y 1390 de 2005 por medio de las cuales se prohíbe a los municipios disponer en botaderos a cielo abierto u otros sistemas inadecuados, como son enterramientos, quemas o cuerpos de agua. Sin embargo para aquellos donde persistía esta situación se otorgó como fecha límite, para iniciar la disposición en un relleno sanitario, el 3 de octubre de 2008. [4]

De las cuatro mil seiscientas cincuenta y un (4.651) toneladas mensuales generadas de residuos sólidos de carácter orgánico rápidamente biodegradable en la jurisdicción de la corporación autónoma regional de Santander (CAS), sólo se aprovechan mensualmente mediante transformación de mejoradores de suelos 684 ton/mes, es decir se estaría aprovechando el 11% de este tipo de residuos [5].

Este porcentaje de aprovechamiento se logra en las plantas de transformación que están operando actualmente en los municipios de Charalá, Aguada, Barichara, Betulia, Bolívar, Chipatá, Cimitarra, El Carmen, Enciso, Florián, Guaca, Guadalupe, Landázuri, Puente Nacional, San Andrés, San Joaquín, San Vicente de Chucurí, San Gil, Coromoro, El Guacamayo, Guapotá, Jesús María, Ocamonte, Páramo, Puerto Parra, Simacota, Suaita y Valle de San José.[5]
Una tecnología que permite la reducción de la fracción orgánica de residuos en los rellenos sanitarios es la digestión anaerobia la cual permite la transformación biológica en la que la materia orgánica en ausencia de oxígeno y mediante la acción de un grupo específico de microorganismos se descompone en productos gaseosos o biogás, compuesto principalmente por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), que pueden ser utilizados como combustibles. Este proceso permite el aprovechamiento energético de los residuos orgánicos, el mantenimiento y mejora del valor fertilizante de los productos tratados [6].

El Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales (CEIAM) de la Universidad Industrial de Santander ha venido desarrollando una línea de investigación en el área de digestión anaerobia. Los resultados obtenidos en los diferentes proyectos han demostrado la gran aplicabilidad de este proceso. En los diferentes proyectos se han realizado actividades que han permitido seleccionar sustratos a evaluar, inóculos propios de la zona a utilizar, establecer condiciones operacionales, evaluar configuraciones de reactores. Los reactores se han evaluado en una y dos

fases de operación y en suspensión. En este trabajo se evaluó un nuevo tipo de reactor, película adherida.

Los procesos de biopelícula están siendo usados desde finales del siglo pasado, estos reactores presentan ventajas tales como: la simplicidad en su construcción, eliminación de la necesidad de mezclado mecánico, una mayor capacidad de resistencia frente a impactos de carga orgánica, la capacidad de resistir grandes sobrecargas de productos tóxicos gracias a los microorganismos que se encuentran formando la biopelícula, esta masa bacteriana presente sobre el material de soporte degrada rápidamente las sustancias contenidas en el influente [7].

En este trabajo se realizó la evaluación de reactores de biopelícula adherida, se utilizaron dos tipos de soportes preseleccionados previamente y se tomó como variable de respuesta la producción de metano. Se realizaron mediciones de variables tales como: ácidos grasos volátiles (AGV`s), pH y porcentaje de sólidos totales (ST), analizando la influencia de cada una de ellas en el desarrollo del proceso.

1. CONCEPTOS TEÓRICOS

1.1 DIGESTIÓN ANAEROBIA

Es un proceso que ocurre naturalmente cuando la materia orgánica se encuentra en un ambiente sin oxígeno, la acción conjunta de microorganismos causa la transformación de las moléculas orgánicas, y la producción de biogás [8].
El biogás es una mezcla de gases compuesto principalmente por:

Tabla 1. Composición del Biogás

Componentes	Composición en % en volumen
Metano (CH4)	40-70 %
Dióxido de carbono (CO2)	30-60 %
Hidrógeno (H2)	0-1 %
Sulfuro de hidrógeno (H2S)	0-3 %
Otros gases	1-5 %

Fuente: Tomada del Numeral [9] de la Bibliografía

1.1.1 Etapas de la Digestión Anaerobia

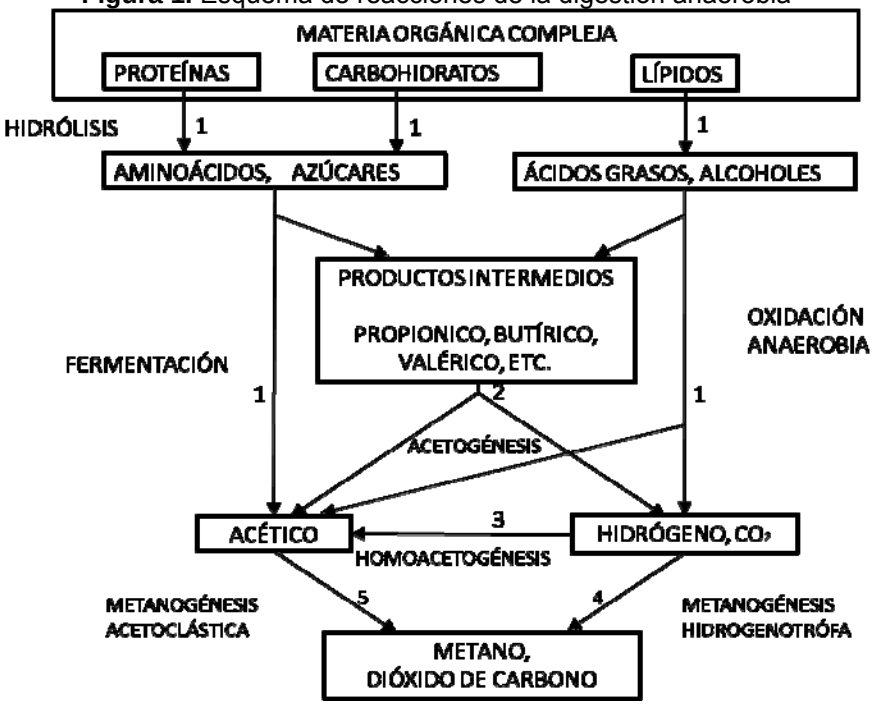
En forma general se divide en cuatro etapas:

1. Hidrólisis de biopolímeros: Es la etapa en la cual las macromoléculas orgánicas (carbohidratos, proteínas y lípidos) son transformados en moléculas más simples por la acción de enzimas extracelulares.

2. Acidogénesis: La materia orgánica disuelta es biodegradada (por un grupo de bacterias heterogéneas), a ácidos grasos volátiles (AGV) entre los cuales se encuentran, ácido butírico, ácido propiónico y ácido acético.
3. Acetogénesis: Es la etapa en la cual ocurre la producción de ácido acético por la acción de bacterias acetogénicas. Puede ocurrir por dos mecanismos diferentes: la acetogénesis de hidrogenación y la acetogénesis de deshidrogenación.
4. Metanogénesis: En esta etapa (Considerada la más importante de la Digestión Anaerobia), ocurre la producción de metano y la eliminación de productos intermedios obtenidos durante las etapas anteriores. Existen dos grupos de bacterias metanogénicas: las bacterias metanogénicas acetoclásticas (BMA) y las bacterias metanogénicas Hidrogenofílicas (BMH_2) [7, 8].

En la figura 1 se muestran las distintas fases del proceso de digestión anaerobia, los microorganismos que intervienen en cada una de ellas y los productos intermedios generados.

Figura 1. Esquema de reacciones de la digestión anaerobia



Fuente: Tomada del Numeral [10] de la Bibliografía

Los números indican la población bacteriana responsable de cada proceso: 1. bacterias fermentativas, 2. bacterias acetogénicas que producen hidrógeno 3. Bacterias homoacetogénicas, 4. Bacterias metanogénicas hidrogenotróficas, 5. Bacterias metanogénicas acetoclásticas.

1.1.2 Factores que Afectan la Digestión Anaerobia (DA)

El proceso de digestión anaerobia puede afectarse con facilidad tanto por factores internos, como externos entre ellos:

1.1.2.1 Temperatura

Se hallan dos intervalos de temperatura para el funcionamiento de las bacterias anaerobias, mesofílico (25-40 ºC), y termofílico (45-60ºC). Las tasas de crecimiento y reacción aumentan conforme lo hacen los intervalos de temperatura. Pero también la sensibilidad a algunos inhibidores, como el amoniaco.

1.1.2.2 pH

Las bacterias involucradas en las etapas de la D.A. tienen un intervalo de pH para su desempeño eficiente en cada una de ellas. Así, en la etapa de hidrólisis va de 7.2-7.4, en la acidogénesis es de 6, en la acetogénesis va de 6.0-6.2, y en la metanogénesis entre 6.5 y 7.5.

Una disminución en estos valores implica un funcionamiento de bajo rendimiento de las bacterias participantes en cada etapa.

En general, el proceso puede efectuarse en un intervalo de 6.0-8.5. Si toma un valor por debajo de 4.5, se detiene la actividad de todos los microorganismos participantes.

1.1.2.3 Ácidos Grasos Volátiles (AGV's)

La concentración de AGV's, es uno de los parámetros que puede indicar de una forma eficaz la evolución del proceso. La acumulación de éstos provoca una disminución en la capacidad amortiguadora del pH en el sistema, que impide disminuir el tiempo de residencia hidráulico. La acidificación del medio inhibe las bacterias metanogénicas por lo cual el proceso se desestabiliza provocando disminución en la producción de biogás.

1.1.2.4 Alcalinidad

La alcalinidad de un sistema es la capacidad que tiene el mismo para neutralizar los ácidos, es importante porque las bacterias producen ácidos, que implican disminución del pH. El carbonato reacciona con los ácidos, permitiendo controlar la acidez del medio (efecto tampón de carbonato). [7, 11,12]

1.2 DIGESTORES ANAEROBIOS

Son reactores biológicos en el cual las reacciones son llevadas a cabo por microorganismos o enzimas. Se clasifican de acuerdo a las características físico-químicas del residuo, pueden ser de crecimiento suspendido o de lecho fijo.

1.2.1 Digestor de Tanque Continuamente Agitado

Consiste en un reactor en el que se mantiene una distribución uniforme de concentraciones, tanto de sustrato como de microorganismos en el volumen total del reactor y en el efluente. Esto se consigue mediante un sistema de agitación, puede ser mecánica o neumática, pero nunca violenta. Es similar al reactor CSTR,

con la diferencia que es necesario disminuir considerablemente los esfuerzos cortantes. Los líquidos o corrientes de lodos son alimentados continuamente, y el contenido de líquidos es igualmente eliminado.

1.2.2 Reactor de Contacto Anaerobio

Los residuos que se quieren tratar se mezclan con los sólidos del lodo recirculado y se digieren en un reactor cerrado. El contenido del reactor se mezcla completamente y tras la digestión, la mezcla se separa en un clarificador. El sobrenadante del proceso, normalmente, es sometido a un tratamiento posterior. La reinoculación de una biomasa bien aclimatada permite mantener óptimas condiciones de funcionamiento del proceso, sobre todo en aguas residuales industriales. Estas a diferencia de las urbanas, no contienen generalmente una alta proporción de microorganismos.

1.2.3 Proceso Anaerobio de Manto de Lodo de Flujo Ascendente (UASB)

En este tipo de sistemas, las bacterias se desarrollan como una masa floculante en un flujo ascendente del afluente. El lecho bacteriano es retenido por su propia masa y por pequeñas partículas presentes en el afluente en la parte inferior del reactor, mientras que el gas y el efluente escapan por la parte superior del mismo. Como la disociación de la biomasa bacteriana ocurre en cierto grado, parte de los organismos se pierden por el efluente.

En un reactor UASB, la biomasa bacteriana está presente en forma de granos o glomérulos compactos de hasta 3 - 4 mm, que se desarrollan bajo condiciones de flujo ascendente continuo. Los gases producidos provocan una circulación interior, que colabora con la formación y el mantenimiento de éstos.

1.2.4 Sistemas de Lecho Móvil (lecho expandido y fluidizado)

En el proceso de lecho expandido el agua residual a tratar se bombea a través de un lecho de material adecuado (arena, carbón) en el que se ha desarrollado un cultivo biológico.

El efluente se recircula para diluir el agua entrante y para mantener el lecho en la expansión adecuada. Con este sistema se consigue que la totalidad de la película bacteriana esté en contacto con el efluente a tratar, aumentando la eficiencia del sistema. [7, 13]

1.2.5 Reactores de Biopelícula

Estos reactores tienen soportes que permiten la inmovilización de la biomasa, pueden ser de carbón activado, de policloruro de vinilo (PVC), anillos de cerámica. Aunque esto implica un mayor tamaño del reactor comparado con reactores que trabajan con mayor carga, debido al volumen ocupado por el soporte.

1.3 BIOPELÍCULA ANAEROBIA

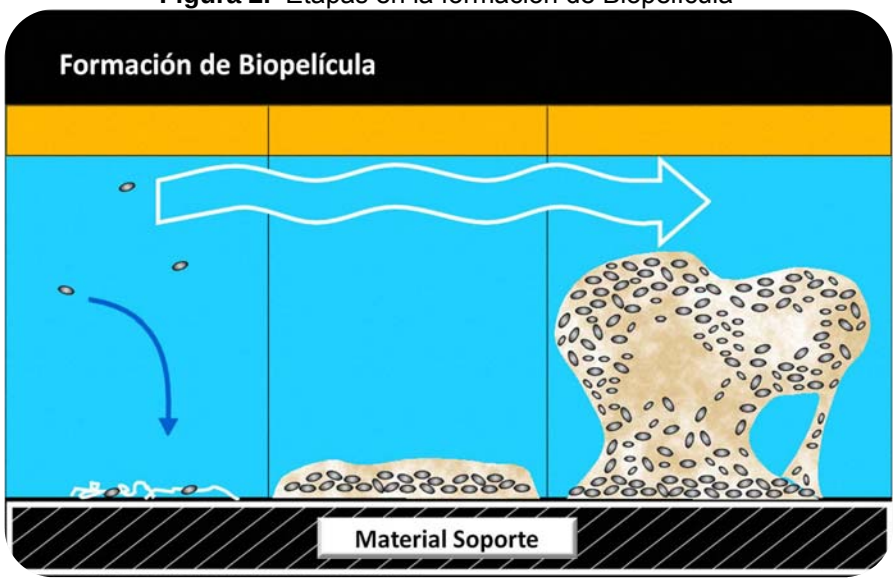
Son comunidades complejas de microorganismos y polímeros extracelulares fijas a una superficie, las cuales pueden contener ya sea una sola especie de bacterias, o un grupo heterogéneo entrelazado de bacterias.

Las biopelículas pueden formarse en cualquier medio en donde estén presentes bacterias, solo necesitan un ambiente hidratado y la presencia mínima de nutrientes. En ciertas ocasiones pueden ser beneficiosas o perjudiciales; en el caso de digestión anaerobia resultan de gran importancia en el tratamiento de residuos sólidos, ya que permiten la disminución de la carga orgánica, y la producción de metano y dióxido de carbono.

La biopelícula empieza a formarse cuando una célula individual se une a la superficie, esta capacidad para adherirse depende tanto de factores ambientales como temperatura, pH, como de factores genéticos. Esta célula empieza a crecer y a esparcirse formando una monocapa, las bacterias van construyendo una superficie más estable, las fuerzas de interacción entre los componentes pueden ser: químicas, interacciones electrostáticas o hidrofóbicas.

Su formación no es un proceso aleatorio, tiene un orden sistemático como se observa en la figura 2

Figura 2. Etapas en la formación de Biopelícula



Fuente: Tomada del Numeral [7] de la Bibliografía

Se considera que tiene cinco fases:

1. Acondicionamiento de la superficie: Depende en gran medida de la gran facilidad de adhesión de las bacterias, este acondicionamiento comienza con el contacto entre la materia orgánica y el soporte o sólido sobre el cual se va a formar la biopelícula, mientras ocurre este contacto una parte de

esta materia orgánica queda adherida a la superficie y hace más fácil que las bacterias se unan.

2. La adsorción y la fijación: El proceso mediante el cual las bacterias se adhieren a la superficie, puede ser activo, (adhesinas, cargas de superficie.) o pasivo, (por gravedad, difusión). Las bacterias sufren cambios radicales para poder adaptarse a la biopelícula, estos son los responsables de la fijación y adsorción de la biopelícula.
3. La maduración: consiste en el proceso de crecimiento y separación celular, permite la fabricación de un polímero que las mantiene unidas.
4. El crecimiento y la dispersión: Las bacterias existentes liberan otras junto con sustancias que les permiten la preparación de una nueva superficie, para la formación de otra biopelícula, estas bacterias liberadas tiene mayor facilidad de adhesión.
5. La separación: Esta es la última fase del crecimiento de la biopelícula, aunque los procesos de separación no son bien conocidos.

La principal característica que poseen es que los microorganismos están unidos a un soporte que actúa como base. Esto implica que todos los nutrientes presentes sean transportados al interior de la biopelícula hacia los microorganismos por algún proceso de transporte [7].

- ✓ **Transferencia de masa a través de la Biopelícula**

Dentro de una biopelícula los sustratos se transportan por difusión dentro de los conglomerados celulares, sin embargo, también existen poros (tanto en dirección vertical como horizontal) y canales llenos de líquido donde el transporte de masa se lleva a cabo por convección y difusión. El flujo de líquido dentro de los poros y canales es función de la velocidad del líquido fuera de la biopelícula y ésta decrece con la edad de la biopelícula debido a cambios de su porosidad.

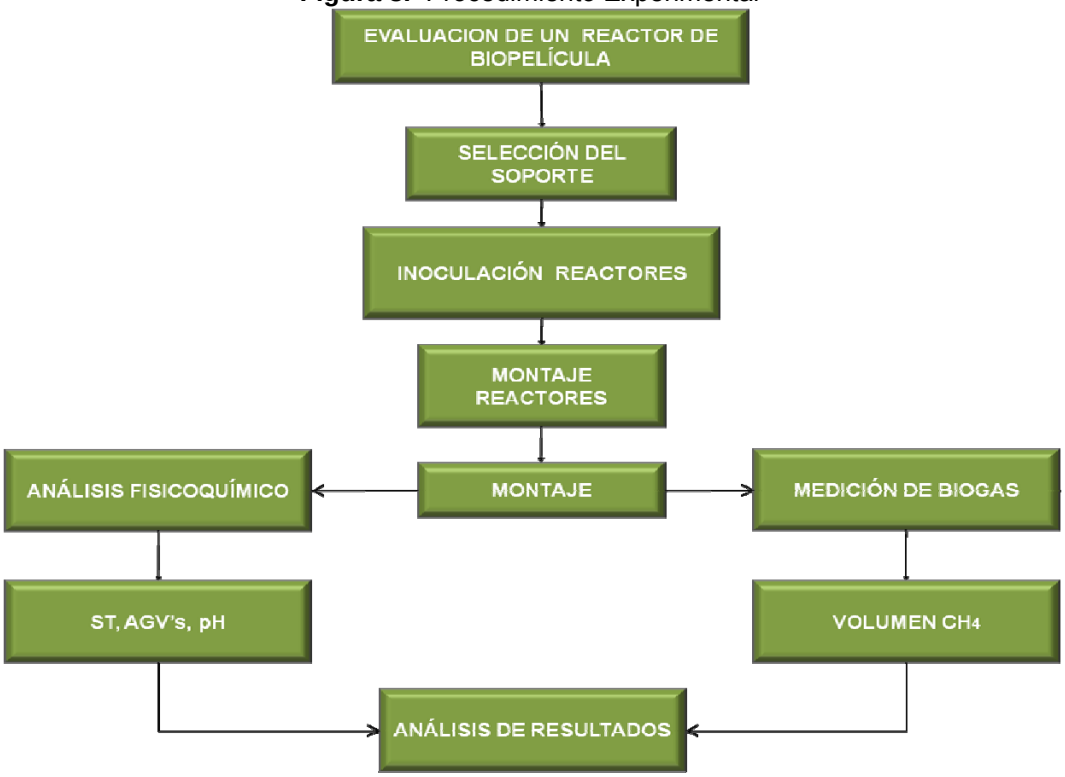
El líquido entre los poros y canales no tienen la misma concentración que el líquido fuera de la biopelícula, por lo tanto, existe transporte de masa convectivo entre el líquido fuera de la biopelícula y: 1) los conglomerados celulares y 2) el líquido contenido en los poros y canales.

El transporte de masa dentro de los conglomerados celulares se modela como un proceso difusivo de acuerdo con la Ley de Fick. Los microorganismos que viven en la biopelícula se encuentran “atrapados” dentro de los conglomerados por lo cual el consumo de sustratos se lleva a cabo únicamente en la parte sólida de la biopelícula [14].

2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Para la evaluación de un reactor de Biopelícula adherida fueron realizadas una serie de actividades, las cuales comenzaron con la selección de los soportes usados en los biorreactores, posteriormente se realizaron los montajes respectivos para cada reactor en una cámara anaerobia evitando así la presencia de oxígeno en el sistema, la siguiente etapa fue realizar el montaje de los reactores y se inició la medición de las variables propias del proceso. En la figura 3 se muestra el procedimiento experimental llevado a cabo.

Figura 3. Procedimiento Experimental



Fuente: Elaborado por los autores de la Tesis

La selección del soporte fue efectuada por medio de revisión de trabajos anteriores elaborados en el Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales (CEIAM) en los cuales se comparó la producción diaria de metano, con estropajo,

tuza de mazorca, ladrillo y PVC, de los cuales los mejores resultados fueron obtenidos cuando los dos últimos soportes fueron empleados.

En el desarrollo experimental se utilizaron reactores en vidrio de 2 L de volumen, con un volumen útil de 1.5 L, acondicionados con entradas y salidas, una bomba peristáltica que permitió la recirculación en el sistema. La alimentación de 100 ml al sistema se realizó diariamente.

El pH fue medido diariamente mediante un pH metro (Hanna Instruments HI 8314). La composición volumétrica de biogás fue determinada por un analizador in situ (Bacharach GA-94), el cual detecta los gases utilizando una celda electroquímica y una infrarroja. Los AGV's y la alcalinidad fueron medidos de acuerdo con el método de titulación descrito por Anderson y Yang [15], como se muestra en el Anexo A. Los reactores fueron acondicionados de tal forma que las conexiones a la bomba peristáltica y el sistema de medición de biogás no tuvieran fugas y para evitar entradas de aire que perturbaran el sistema. En las figuras 4, 5 y 6 se muestran los reactores finalmente acondicionados.

Figura 4. Conexiones de los reactores a la bomba peristáltica

Fuente: Fotografía tomada por los autores de la Tesis

Figura 5. Conexión de los reactores a sistema de medición

Figura 6. Vista final de acondicionamiento reactores

Fuente: Fotografías tomadas por los autores de la Tesis

El montaje del sistema se llevó a cabo en una cámara de anaerobiosis que asegurara la ausencia de oxígeno durante y al final del montaje, a cada reactor se le adicionó su respectivo soporte ya seleccionado, fue añadido 500 ml de inóculo el cual provenía de una mezcla 50:50 de lodo PTAR y porcícola, los reactores se sellaron y fueron mantenidos inoculando por dos semanas. Posteriormente se agregaron 500 ml de sustrato formado por el efluente del reactor hidrolítico-acidogénico del tratamiento de residuos sólidos.

Para finalizar el montaje e iniciar con los experimentos de medición, los reactores fueron conectados a la bomba peristáltica y su respectivo sistema de medición de biogás, algunos de los equipos usados se pueden observar en el Anexo B.

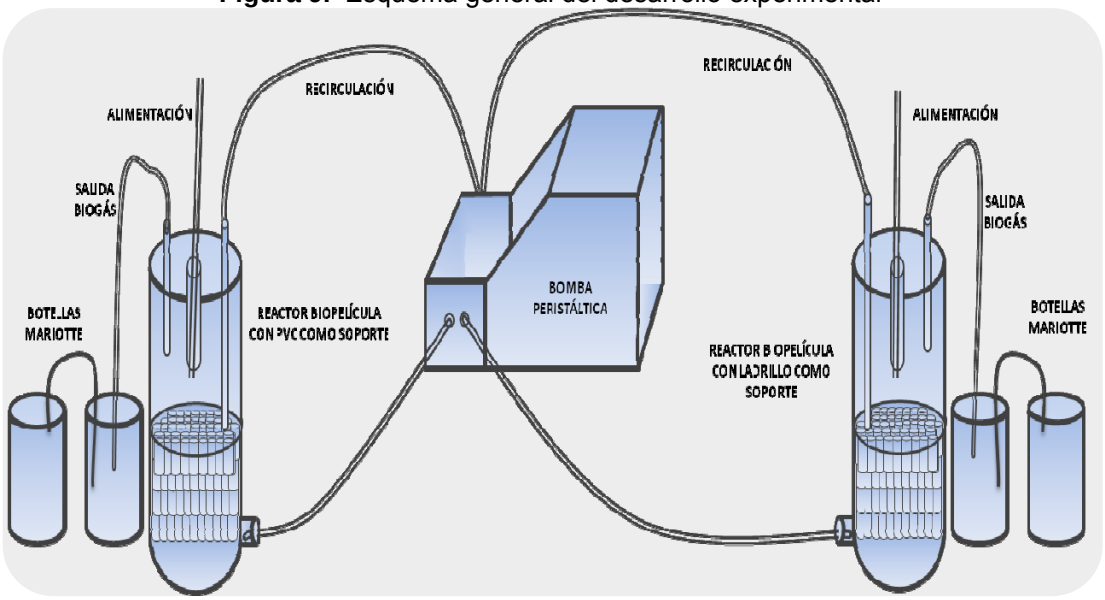
Figura 7. Reactor con PVC como soporte conectado a sistema de medición y bomba peristáltica

Figura 8. Reactor con ladrillo como soporte conectado a sistema de medición y bomba peristáltica

Fuente: Fotografías tomadas por los autores de la Tesis

Luego estos reactores fueron alimentados con este efluente con una velocidad de carga orgánica de 0,13 g/L y un tiempo de retención hidráulico de 15 días.
En el siguiente esquema se muestra el conjunto completo de reactores conectados a la bomba peristáltica y sus sistemas de medición.

Figura 9. Esquema general del desarrollo experimental



Fuente: Elaborado por los autores de la Tesis

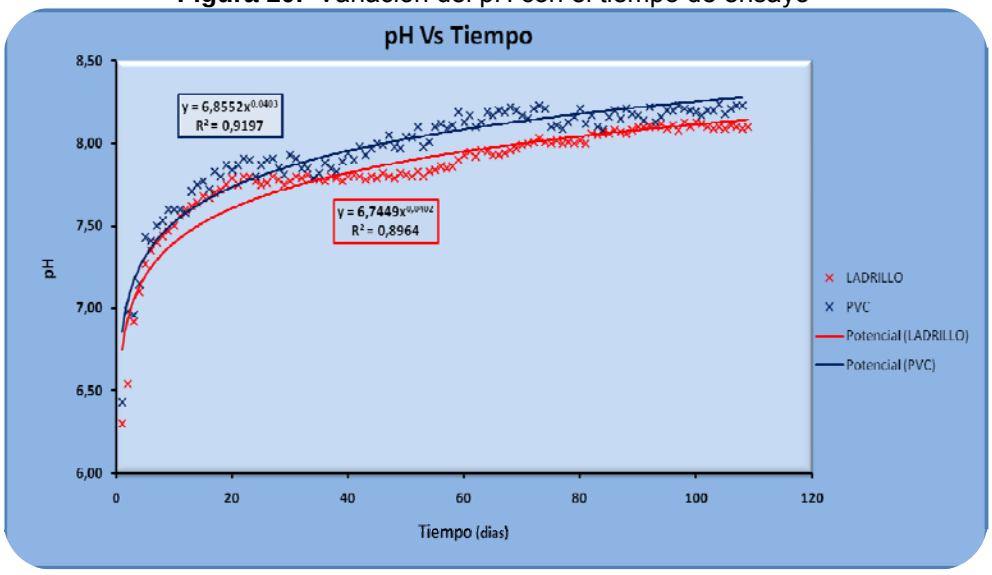
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

A continuación se presentan y analizan los resultados de las diferentes variables medidas y de la producción diaria de Metano obtenida durante el desarrollo de la experimentación en los reactores de Biopelícula.

3.1 COMPORTAMIENTO DEL pH EN EL PERÍODO DE ENSAYO

El proceso general de Digestión Anaerobia se lleva a cabo eficientemente en un intervalo de pH de 6,5 a 8,5, como se puede observar en la figura 10 el intervalo de valores de pH inició en 6,3 aumentando de forma potencial estabilizándose alrededor de 8,13 para el ladrillo como soporte y en el caso del PVC está entre 6,43 y 8,23, este comportamiento en el pH se debe a la dinámica de producción y transformación de los AGV's durante el proceso por los diferentes microorganismos presentes. [9]. En la figuran 10, también se puede observar que el pH presenta la misma tendencia para los dos soportes, aunque la del ladrillo se ubica por debajo del PVC.

Figura 10. Variación del pH con el tiempo de ensayo



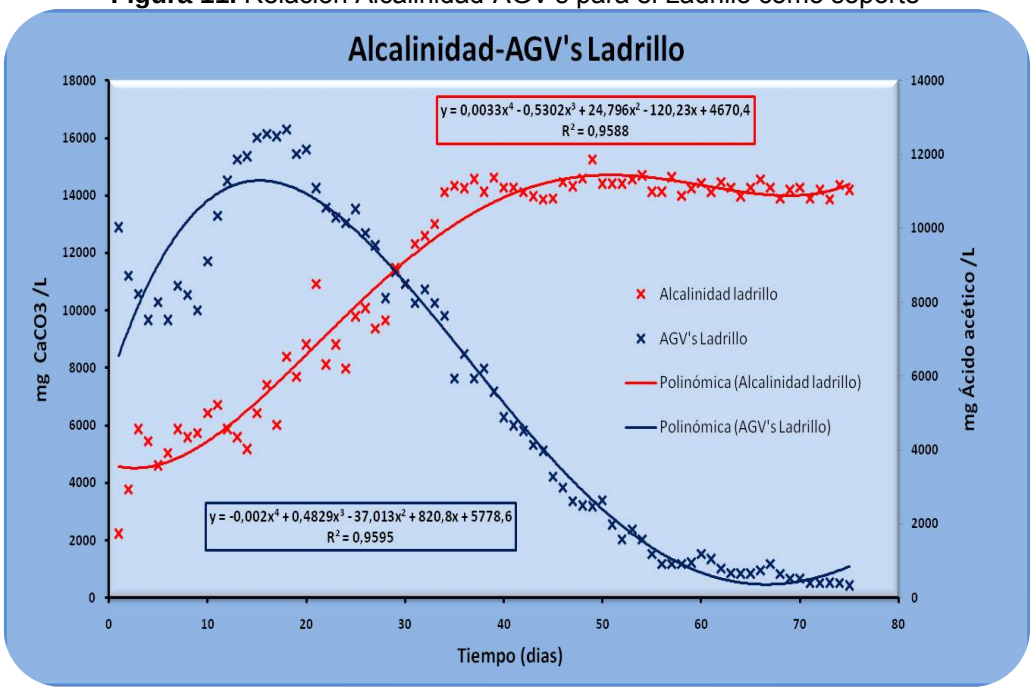
Fuente: Elaborada por los autores de la Tesis

3.2 RELACIÓN DE AGV'S Y ALCALINIDAD

La Alcalinidad es la capacidad de un sistema de mantener el pH sin verse afectado por la presencia de ácidos, se ha demostrado en estudios anteriores que la alcalinidad tiene un valor mínimo para el desarrollo óptimo del proceso siendo 2500 mg $CaCO_3$/L [11], con valores superiores a este se consigue una estabilidad adecuada del pH y del sistema.

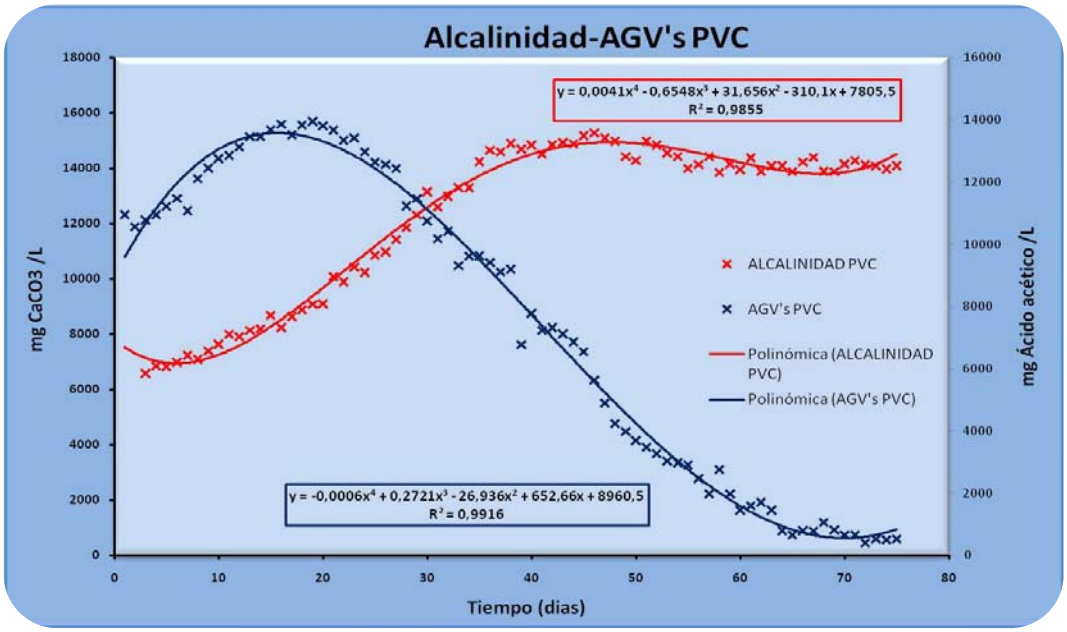
Los AGV's son un parámetro que muestra el estado del proceso, un aumento brusco en estos indica que hay un desequilibrio en el sistema [11]. Como se puede observar en la figura 11 y 12 en los primeros 15 días se presentó una oscilación indicando una inestabilidad del sistema debido al aumento de los AGV's, este comportamiento se visualiza en ambos Biorreactores, trascurrido el tiempo de ensayo se observó una disminución gradual de la cantidad de AGV's llegando a estabilizarse, favoreciendo así la producción de Biogás.

Figura 11. Relación Alcalinidad-AGV's para el Ladrillo como soporte



Fuente: Elaborada por los autores de la Tesis

Figura 12. Relación Alcalinidad-AGV's para el PVC como soporte



Fuente: Elaborada por los autores de la Tesis

En las figuras 11 y 12, se observa que a medida que los AGV's crecen el comportamiento de la Alcalinidad es inverso, esto demuestra el efecto tampón que tiene la alcalinidad sobre el proceso, manteniendo el pH del sistema en valores que permitieron su buen funcionamiento.

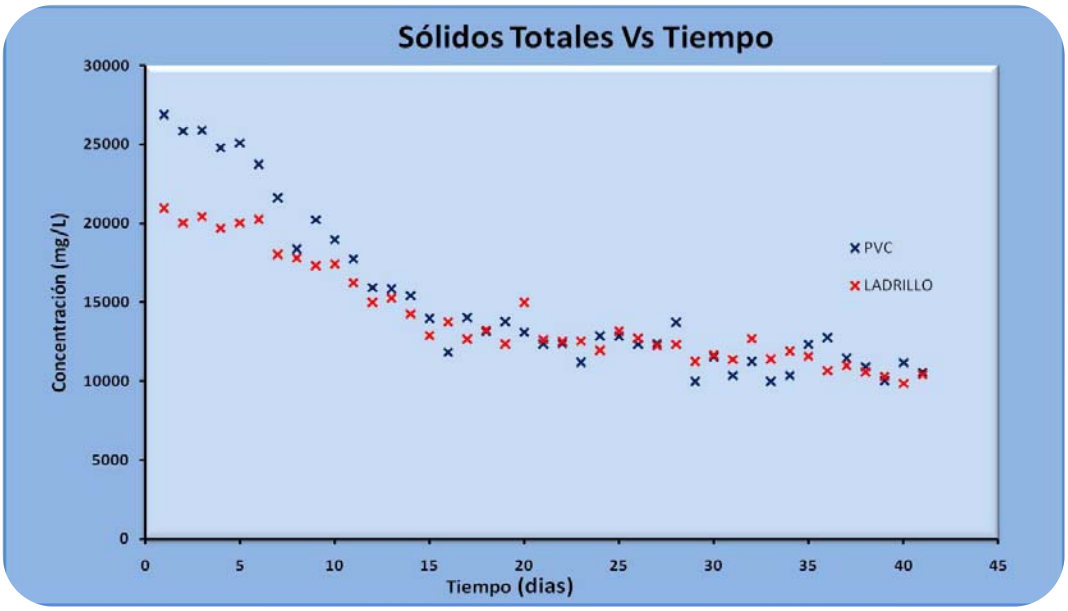
3.3 VARIACIÓN DE LOS SÓLIDOS TOTALES (ST) CON EL TIEMPO

Los sólidos Totales es un parámetro que está relacionado la eficiencia del proceso de digestión anaerobia, al aumentar la cantidad de ST en el sistema se presenta una baja eficiencia en la producción de biogás debido a la limitación de transferencia de masa [16].

En la imagen figura 13, se muestra que la presencia de los Sólidos Totales va disminuyendo con el tiempo de ensayo, este comportamiento es válido y esperado

en este trabajo ya que el bajo porcentaje de Sólidos Totales presentes en el sistema indica un aumento en la capacidad de producción de biogás.

Figura 13. Variación de Sólidos Totales con el tiempo de ensayo



Fuente: Elaborada por los autores de la Tesis

3.4 PRODUCCIÓN DE METANO

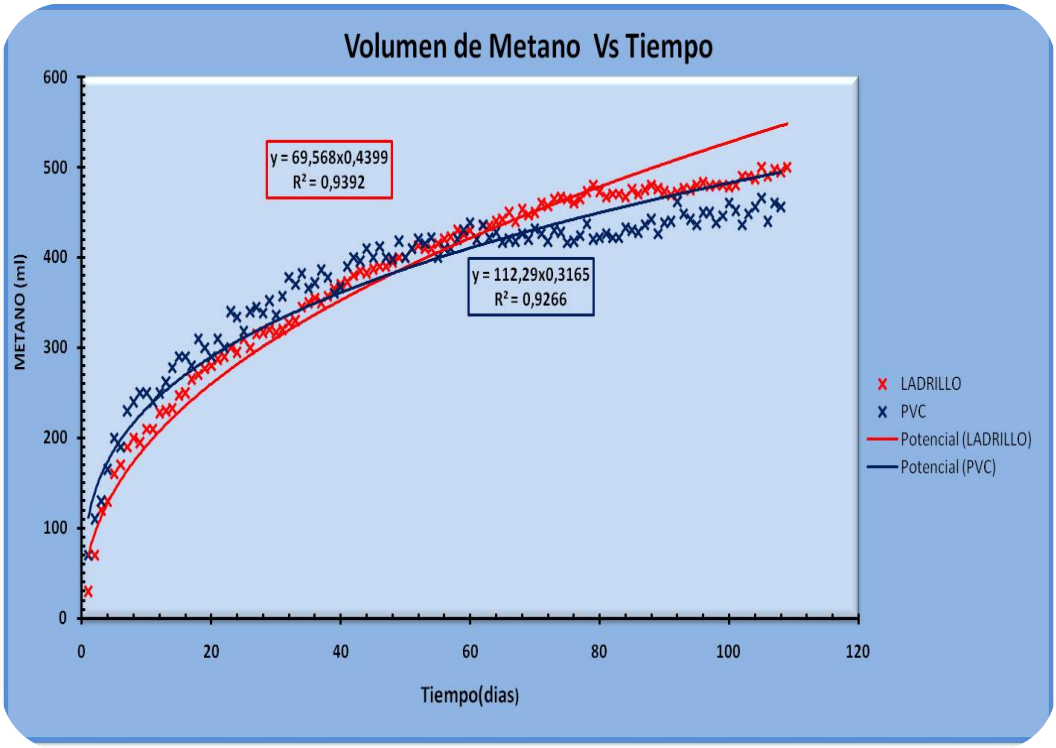
La principal variable a medir fue la producción de metano, teniendo en cuenta el comportamiento de las variables analizadas se observó un desarrollo favorable para alcanzar este propósito.

En la figura 14 se muestra la producción diaria de Metano vs Tiempo para los reactores usados con sus respectivos soportes, observándose que para el volumen de biogás generado presentan la misma tendencia.

En esta figura se observa que los sistemas alcanzan su estado de estabilidad a partir de los 30 días, aproximadamente. El volumen promedio de metano

alcanzado en la etapa de estabilización para cada uno de los reactores fue de 436 ml y 419 ml para ladrillo y PVC, respectivamente, observándose una mayor producción en el reactor con ladrillo como soporte.

Figura 14. Producción diaria de Metano



Fuente: Elaborada por los autores de la Tesis

En el trabajo realizado por Rojas y col. [17] en el cual se evaluó la producción de metano a partir de lodos de desecho proveniente de dos plantas de aguas residuales: una de tratamiento biológico aerobio y otra de tratamiento primario avanzado en reactores tipo Egg-Shaped Digesters (ESD) de 5L de volumen, obtuvo una producción de metano de 346 ml de biogás por día y una producción máxima se registró en 880 ml de biogás por día. En cuanto a los valores de la proporción de metano y CO_2 los más altos registrados fueron de 65,3 % y 26,6% respectivamente. Como se puede observar los valores obtenidos en el desarrollo del proceso muestran una alta eficiencia en la producción de metano en comparación con nuestros datos.

Umaña y col [18] evaluaron la producción de metano en reactores de lecho con 18 y 26 L de volumen, utilizaron flujo ascendente y alimentación intermitente, el soporte utilizado fue zeolita adherida a piezas de llantas, el inóculo provino de un digestor anaerobio de flujo tipo pistón. Ellos obtuvieron una producción de metano de 0.15 LCH_4/ g $DQO_{removido}$ la cual es muy similar al compararla con los resultados obtenidos en este trabajo de 0.01LCH_4/g$DQO_{removido}$, teniendo en cuenta que los reactores utilizados en este caso fueron de 1.5 L.

Anderson y col (2002) [19], utilizaron reactores con paja como soporte en reactores de 1.5 L de volumen bajo condiciones mesofílicas, inoculado con lodos provenientes de planta de aguas residuales, el reactor presentó una producción de metano de 5,4 L CH_4 / L d, la cual es más elevada comparada con la obtenida en este trabajo de 0,29 L CH_4/L d para el reactor con ladrillo como soporte y 0,28 L CH_4/ L d para el PVC, una de las razones que pudo influir en esta mayor producción es la posibilidad de degradación de la paja, la cual entraría a ser parte de la degradación del sustrato.

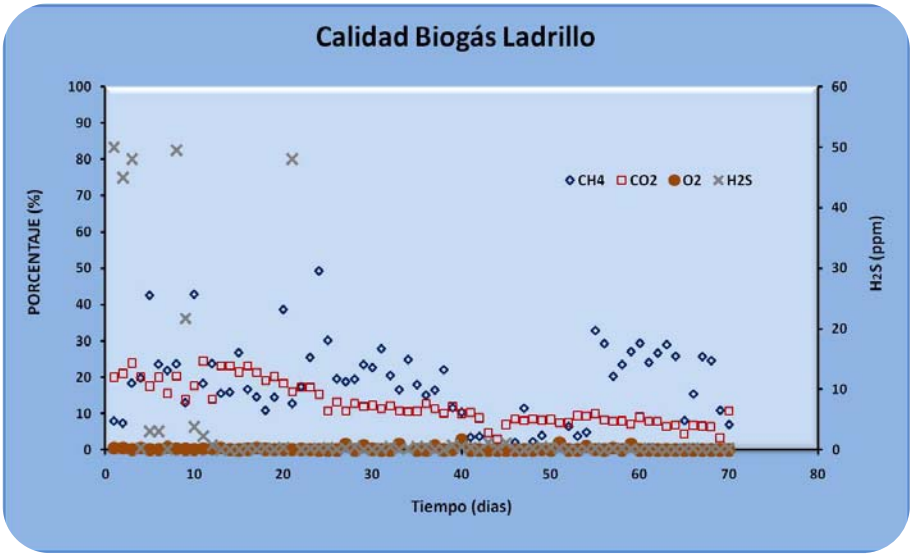
Investigaciones realizadas por Murray y col (1981) [20], donde comparan tres materiales de soportes, PVC, arcilla cocida y vidrio grabado, en filtros anaerobios muestran que el material de soporte afecta notablemente la tasa de adherencia y crecimiento de bacterias convirtiendo ácido acético en metano. La Biopelícula se desarrolló tres veces más rápido en la arcilla cocida que en los otros materiales.

Lo que indica que tanto la textura de la superficie del soporte y la porosidad tienen un impacto significativo en el funcionamiento de los filtros anaerobios, en este trabajo se observó una mejor actividad metanogénica con el Ladrillo como soporte, comparado con el PVC que puede ser resultado de las características superficiales del ladrillo.

3.5 CALIDAD DEL BIOGÁS

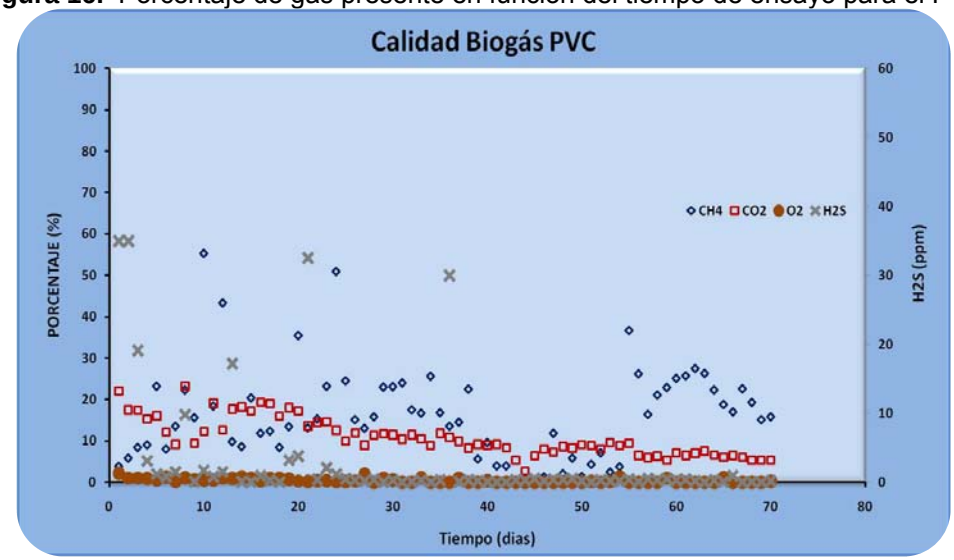
En las figuras 15 y 16, se puede observar diferentes porcentajes de CO_2, O_2, H_2S y CH_4 presentes en el biogás, indicando para ambos casos una mayor presencia de Metano en el tiempo de ensayo.

Figura 15. Porcentaje de gas presente en función del tiempo de ensayo para el Ladrillo



Fuente: Elaborada por los autores de la Tesis

Figura 16. Porcentaje de gas presente en función del tiempo de ensayo para el PVC



Fuente: Elaborada por los autores de la Tesis

El pH y la alcalinidad influyen en la composición del gas obtenido, si el pH es alcalino, parte del CO_2 se disolverá en el efluente, dando lugar a un gas más rico en metano. Con los datos obtenidos de pH, los intervalos que se muestran en la figura 10 oscilan entre 6,30-8,13 para el ladrillo y 6,43-8,23 para el PVC, muestran que el pH durante el desarrollo del ensayo no alcanzó valores inferiores a 6.0 permitiendo obtener un biogás de alta calidad energética debido a una mayor presencia de Metano [11].

El porcentaje de metano tanto para PVC y Ladrillo, no superó el 60%, pero se evidencia que el ensayo se desarrolló de manera adecuada, observando que al estabilizarse el pH entre 7-8 la producción de metano y su porcentaje en el Biogás aumentó, comportamiento que se muestra en ambos soportes [9, 21].

CONCLUSIONES

El reactor con mayor producción de metano fue el que contenía ladrillo como soporte, con una producción en estado estable de 436 ml, comparado con 419 ml para el reactor con PVC como soporte.

Los sistemas de reactor de película adherida evaluados en este trabajo mostraron un comportamiento de las variables de la DA, tales como pH, alcalinidad, AGV's, ST dentro de los intervalos establecidos para un buen desempeño de los sistemas.

La calidad del biogás obtenido presenta mayor contenido de metano, seguido por el dióxido de carbono y H_2S, lo que indica que el gas producido tiene las características reportadas en investigaciones anteriores.

Los ensayos realizados mostraron que este tipo de biodigestor es una buena alternativa para el tratamiento del efluente de un reactor hidrolítico que evalúa la digestión de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos, ya que la presencia de la Biopelícula influye en una mayor degradabilidad del sustrato.

RECOMENDACIONES

Se recomienda el uso de la Digestión anaerobia para la transformación de la materia orgánica contenida en los RSU, ya que esto permite dar un valor agregado a estos residuos que simplemente llegan a ser desechados.

Se sugiere utilizar un sistema de medición de volumen desplazado de metano en continuo, ya que esto presenta una limitante en el desarrollo del proceso.

Se propone realizar un montaje en condiciones termofílicas y mesofílicas en forma paralela que permita la comparación del funcionamiento de ambos reactores.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Zafra, C.A. Metodología de diseño para la recogida de residuos sólidos urbanos mediante factores punta de generación: sistema de caja fija (SCF). Universidad Distrital Francisco José de Caldas. 2009.

[2] S.M. Puerta. Los residuos sólidos municipales como acondicionadores de suelos. Corporación universitaria Lasallista.

[3]Problema de los desechos en Bogotá podrían generar una emergencia sanitaria. Revista cambio. Mayo 7 2009.

[4]http://www.superservicios.gov.co/siteSSPD/documentos/documentos_pub/64_2942.doc

[5]http://www.cas.gov.co/index.php?option=com_content&task=blogcategory&id=72&Itemid=143

[6] F. Caicedo. Diseño, construcción y arranque de un reactor U.A.S.B. piloto para el tratamiento de lixiviados. Universidad Nacional de Colombia. Sede Manizales. Especialización en ingeniería ambiental. 2006. pp. 2.

[7] E. Castillo, M. Vergara, L. Arenas, A. Martínez, M. A. Hernández, H.J. Castillo, C.J. Sandoval. *DIGESTIÓN ANAEROBIA una alternativa para el tratamiento de residuos sólidos urbanos*, Centro de estudios e investigaciones ambientales CEIAM, Universidad Industrial de Santander. 2007. p. 13-17, 31.

[8] Perrigault, Thibault. Mejoramiento del comportamiento técnico de un biodigestor low- cost tipo plug flow. Universidad politécnica de Cataluña, Febrero de 2010

[9] Werner, U. et al. Biogas plants in animal husbandry, 1989.

[10] Pavlostathis, S.G. and Giraldo-Gomez E., (1991), "Kinetics of Anaerobics Treatment", Wat. Science Tech., Vol. 24.

[11] Nuria Martí Ortega. Phosphorus precipitation in anaerobic digestion process. 2002.

[12] Jose L Sanz. Tratamiento biológico de aguas residuales. Master microbiología.

[13] Instituto para la diversificación y ahorro de energía (IDEA). “Biomasa: Digestores Anaerobios”. Madrid, octubre 2007.

[14] Gonzáles – Brambila, M; López – Isunza, F. Comportamiento de un reactor de biopelícula para tratamiento de agua residual a diferentes velocidades de flujo. Universidad Autónoma Metropolitana – Iztapalapa. Revista Mexicana de Ingeniería Química. Vol. 7 No 3 2008, pp. 183 – 193.

[15] G. Anderson, K. G. Yang. *Determination of bicarbonate and total volatile acid concentration in anaerobic digesters using a simple titration*. Water Environment Research. 1992. 64: p. 53–59.

[16] J. Riquelme. *Problemas de estimación/observación en procesos de biodigestión anaerobia*. Universidad Técnica Federico Santa María 2009

P. Nguyen, P. Kuruparan, C. Visnvanathan, *Anaerobic digestion of municipal solid waste as a treatment prior to landfill*. Bioresource Technology 98 (2007). pp. 380–387

[17] M*. Rojas*, P. Castro, S. Ortega, A. Noyola. *Digestión anaerobia mesofílica y termofílica de lodos biológicos de desecho y lodos de tratamiento primario avanzado. Puesta en marcha del proceso.* Instituto de ingeniería, universidad nacional autónoma de México. pp. 5-10.

[18] O. Umaña, S. Nikolaeva, E. Sánchez. Comportamiento de dos reactores anaerobios de lecho fijo durante la fase de aclimatación en residuales de lechería. Universidad Nacional (Costa Rica). Departamento de física.

[19] J. Andersson, L. Björnsson. Evaluation of Straw as a biofilm carrier in the methanogenic stage of two-stage anaerobic digestion of crop residues. Department of biotechnology, Lund University. Sweden. 2002. pp 51-56.

[20] W. Murray, L. Van Den Berg. Effect of Support Material on the Development of Microbial Fixed Films Converting Acetic Acid to Methane.1981.

[21] J.L. Magaña, E. Torres, M. Martínez, C. Sandoval, R. Hernández. Producción de biogás a nivel laboratorio utilizando estiércol de cabras. Universidad de Guanajuato. 2006. pp. 27 – 37.

[22] M. Fuentes, N. Serna, P. Aguirre, M. Mussati. Application of two anaerobic digestion models to biofilm systems. Biochemical engineering Journal 38 (2008), pp. 259 – 269.

[23] Marek Mösche, Hans – Joachim Jördening. Comparison of different models of substrate and product inhibition in anaerobic digestion. Technical University of Braunschweig. Wat Res. Vol 33, No 11, 1999. pp. 2545 – 2554.

[24] A. G. Brito, L. F. Melo. Mass transfer coefficients within anaerobic biofilms: effects of external liquid velocity. Univesidade do Minho. Wat. Res. Vol. 33, No 17. 1999. Pp. 3673 – 3678.

[25] Cung – Fang Liu, Xing – Zhong Yuan, Guang - Ming Zeng, Wen – Wey Li, Jing Li. Prediction of methane yield at optimum pH for anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste. University Changsha. Bioresource technology, 99. (2008). pp. 882 – 888.

[26] S. Michaud, N. Bernet, P. Buffière, J.P. Delgenès. Use of the methane yield to indicate the metabolic behavior of methanogenic biofilms. Laboratory of biotechnologie of Environment. Process Biochemistry 40 (2005). pp. 2751 – 2755.

[27] Wei Wang, Huahua Hou, Song Hu, Xingbao Gao. Performance and stability improvements in anaerobic digestion of thermally hydrolyzed municipal biowaste by a biofilm system. Tsinghua university. 2009.

[28] R. Cresson, H. Carrère, J.P Delgenès, N. Bernet. Biofilm formation during the start-up period of an anaerobic biofilm reactor – Impact of nutrient complementation. Laboratory de biotechnologie de ℓ. Environnement. Biochemical engineering Journal, 30. 2006. pp. 55 – 62.

[29] R. Carrhá, A.C. Van Haandel, G. Zeeman, G. Lettinga. The effects of operational and environmental variations on anaerobic wastewater treatment systems: A review. Bioresource technology 97. 2006. pp. 1105 – 1118.

[30] P. Torres, J. Rodríguez, I. Uribe. Tratamiento de aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca en filtro anaerobio: influencia del medio de soporte. Scientia et Technica Año IX, No 23, Diciembre 2003.

[31] J. O'Reilly, Ch. Lee, G. Collins, F. Chinalia, T. Mahony, V. O'Flaherty. Quantitative and qualitative analysis of methanogenic communities in mesophilically and psychrophilically cultivated anaerobic granular biofilm. National university de Ireland. Water Reseacrh 43. 2009. pp. 3365 – 3374.

[32] G. Pedraza, J. Chará, N Conde, S. Giraldo, L. Giraldo. Evaluación de los biodigestores en geomembrana (pvc) y plástico de invernadero en clima medio para el tratamiento de aguas residuales de origen porcino. Fundación centro de investigación en sistemas sostenibles de producción agropecuaria (CIPAV). 2002.

[33] M. Sandoval. Disminución de la demanda química de oxígeno (DQO) en vinazas mediante tratamiento biológico. Huajuapan de león, OAX., Agosto de 2006.

[34] E. Castillo, D. Cristancho, V. Arellano. Estudio de las condiciones de operación para la Digestión Anaerobia de Residuos Sólidos Urbanos. Universidad Nacional de Colombia. Revista Colombiana de Biotecnología. Diciembre 2003. pp. 11 – 22

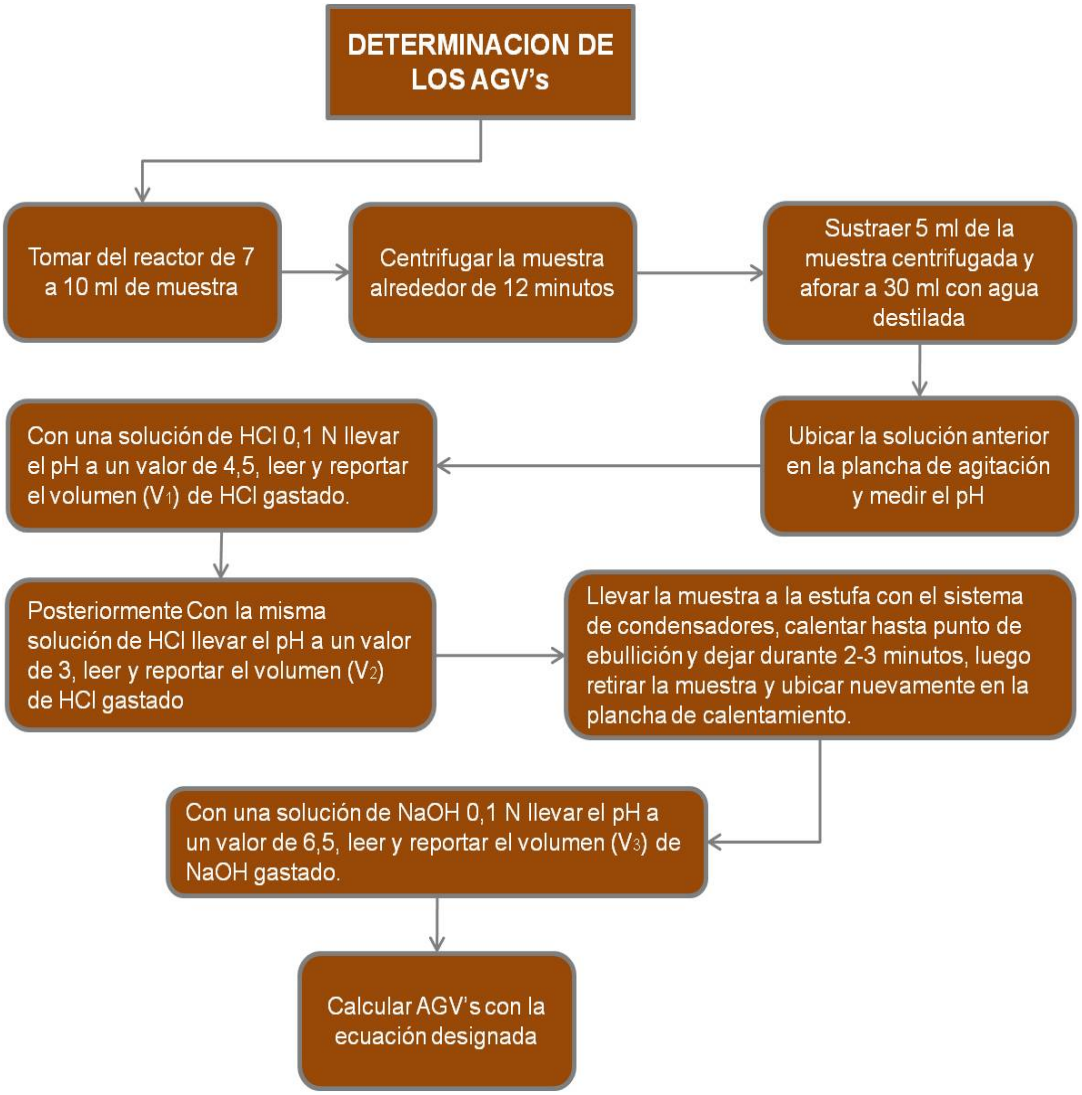
[35] F. Raposo, C.J. Banks, I. Siegert, S. Heaven, R. Borja, Influence of inoculum to substrate ratio of biochemical methane potential of maize in batch test. University of Southampton. Process Biochemistry 41. 2006. pp. 1444-1450.

ANEXOS

ANEXO A. DETERMINACIÓN DE LOS AGV's

La estimación de los AGV's se llevó a cabo mediante una serie de ensayos descritos en el siguiente diagrama [29].

Figura A. Diagrama general para el procedimiento de Determinación de AGV's



Fuente: Elaborado por los autores de la Tesis

Para calcular finalmente los AGV's se utiliza la siguiente relación:

$$AGV's = \frac{V_3 * 0{,}947 * 6000}{5} = V_3 * 0{,}947 * 1200$$

ANEXO B. EQUIPOS Y MATERIAL DE LABORATORIO UTILIZADOS

A continuación se muestra los instrumentos de laboratorio y dispositivos usados durante la experimentación:

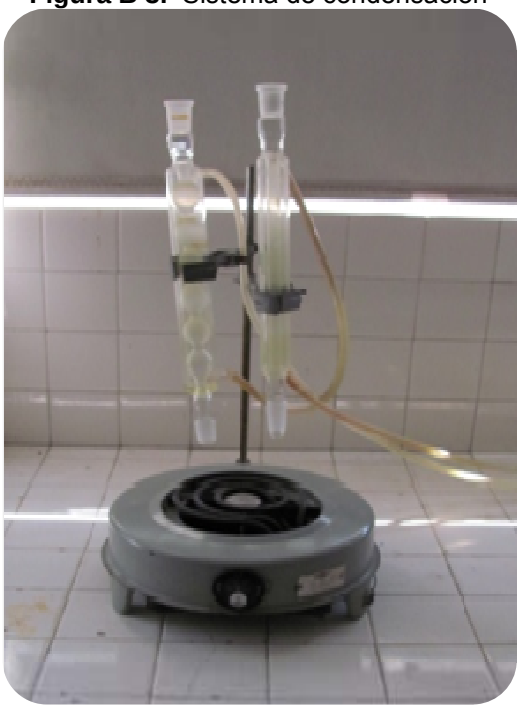
Figura B 1. Centrifuga

Fuente: Fotografía tomada por los autores de la Tesis

Figura B 2. Sistema de agitación magnético

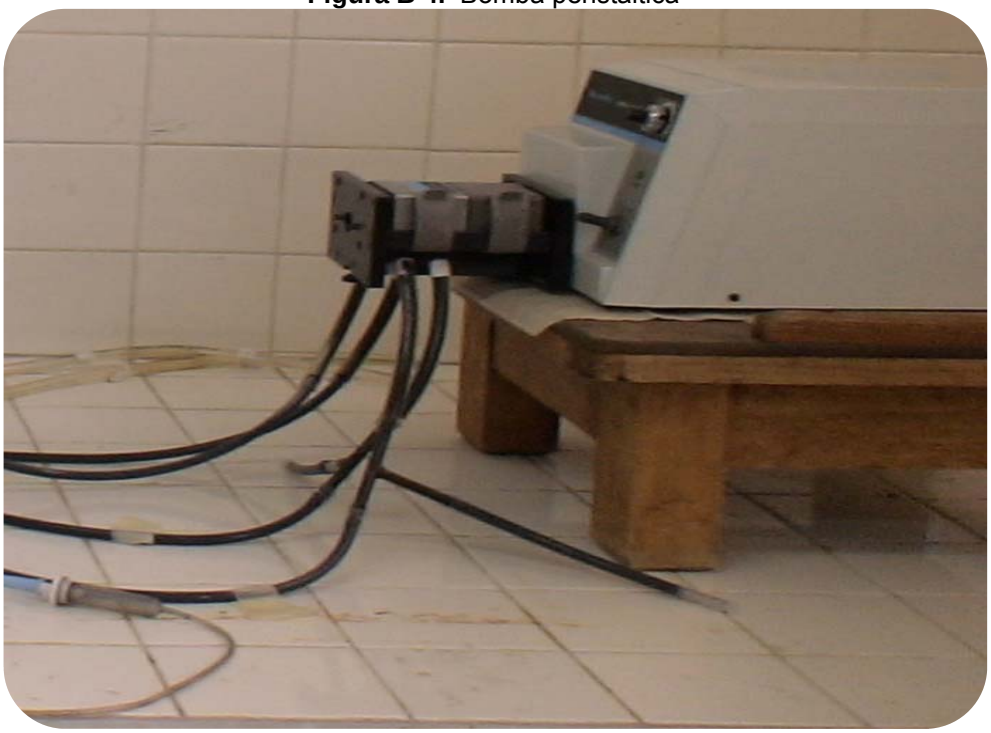
Fuente: Fotografía tomada por los autores de la Tesis

Figura B 3. Sistema de condensación



Fuente: Fotografía tomada por los autores de la Tesis

Figura B 4. Bomba peristáltica



Fuente: Fotografía tomada por los autores de la Tesis

Figura B 5. Cámara Anaerobia

Fuente: Fotografía tomada por los autores de la Tesis