

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO DE BOTÁNICA



Evaluación del Uso de Dos Polímeros como Soportes en el Tratamiento de
Agua Residual Doméstica en Filtros Anaerobios

Por:

JOSÉ ÁNGEL GUTIÉRREZ RAMÍREZ

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener título de:

INGENIERO EN AGROBIOLOGÍA

Saltillo, Coahuila, México

Junio del 2014

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO DE BOTÁNICA

Evaluación del Uso de Dos Polímeros como Soportes en el Tratamiento de Agua
Residual Doméstica en Filtros Anaerobios

Por:

JOSÉ ÁNGEL GUTIÉRREZ RAMÍREZ

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener título de:

INGENIERO EN AGROBIOLOGÍA

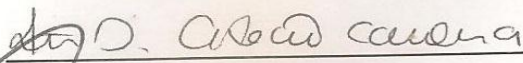
Aprobada



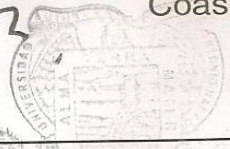
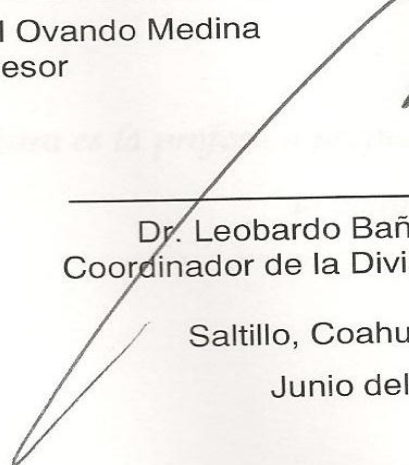
Dra. Silvia Yudith Martínez Amador
Asesor Principal



Dr. Víctor Manuel Ovando Medina
Coasesor



M.C. Iveth Dalila Antonio Carmona
Coasesor



Dr. Leobardo Bañuelos Herrera
Coordinador de la División de Agronomía

Saltillo, Coahuila, México

Junio del 2014

DEDICATORIA

A Dios por permitirme terminar mi carrera profesional.

A mis padres; Sr. José Gutiérrez Solano - Sra. Paula Ramírez Chávez

Por todas las enseñanzas que me han brindado en todo este tiempo, ustedes me formaron como una persona de bien, cada situación, cada palabra, todo lo he usado como una lección de vida. Me pusieron en el camino correcto, y gracias a todo su apoyo incondicional, logre culminar esta profesión.

A mi hermana Cheya por tu apoyo incondicional durante este largo camino.

A mis hermanos; Cando, Orfe, Belin, Adán, Quique, Gogue.

A mis sobrinos; Ale y Kevin.

A mi novia Tommy por acompañarme y darme su amor y apoyo incondicional en esta etapa de mi vida.

Gracias a ustedes he aprendido a afrontar los retos que se me presentan, sé que siempre pasamos por situaciones difíciles pero siempre sabemos salir adelante.

*La agricultura es la profesión propia del sabio, la más adecuada al sencillo y
la ocupación más digna para todo hombre libre.*

CICERÓN

AGRADECIMIENTOS

A Dios: agradezco que me hayas dado vida y salud, así como la oportunidad de disfrutar y compartir con mi familia y amigos de una de las etapas más felices de mi vida, y porque nunca me dejaste flaquear ni perder la fe en los momentos más difíciles.

A mis Padres y Hermanos: Sabiendo que no existirá forma alguna de agradecer una vida de sacrificios, esfuerzos y amor constantes, que me han conducido por la vida con amor y paciencia; hoy han forjado un anhelo, una ilusión, un deseo... Gracias por enseñarme lo que han recogido a su paso por la vida, por compartir mis horas grises; mis momentos felices, ambiciones, sueños e inquietudes.

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro: A esta Honorable Institución que me abrió sus puertas para adquirir nuevos conocimientos que me servirán para enfrentarme a nuevos retos que me ponga la vida.

A mi Asesora de Tesis: Dra. Silvia Yudith Martínez Amador, quien gracias al apoyo otorgado y la confianza pude realizar este trabajo de Tesis.

A mi coasesora: M.C. Iveth Dalila Antonio Carmona agradeciéndole el apoyo que siempre me otorgo al trabajar en el laboratorio.

A mi coasesor: Dr. Víctor Manuel Ovando Medina

A Tommy (kachetitos), mi novia, compañera y amiga, por apoyarme de igual manera en momentos difíciles en mi estancia en la Universidad, por compartir y permitirme estar estos tres años a su lado. - Te amo- dije...pd ”y los que siguen”

A mis compañeros de tesis, Tommy, Anayeli, Brenda, Guadalupe, e Isela

A mis compañeros de la Generación CXVII de Ing. en Agrobiología

Ya todas aquellas personas que en algún momento me brindaron su amistad y su apoyo y me motivaron con palabras alentadoras en momentos difíciles. Me es difícil mencionarlos a todos.

“Gracias por compartirme momentos de su vida”

José Ángel Gutiérrez Ramírez

ÍNDICE DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 1. Cinética del comportamiento de la DQO en un sistema batch anaerobio.....	32
Cuadro 2. Cinética del comportamiento de sulfatos en un sistema batch anaerobio.....	34
Cuadro 3. Cinética del comportamiento de la DQO en un sistema batch anaerobio.....	36
Cuadro 4. Cinética del comportamiento de sulfatos en un sistema batch anaerobio.....	37
Cuadro 5. Cinética del comportamiento del pH en un sistema batch anaerobio.....	39

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Etapas de la digestión anaerobia.....	12
Figura 2. Distribución de los organismos dentro de la biopelícula.....	19
Figura 3. Polimerización química del pirrol y sus dos posibles estructuras PPy.....	20
Figura 4. Espuma de poliuretano antes y después de recubrirse con polipirrol.....	23
Figura 5. Reactores tipo batch.....	24
Figura 6. Reactores en proceso para formación de la biopelícula.....	25
Figura 7. Eliminación del exceso de lodo y arranque del experimento.....	25
Figura 8. a) Espuma de poliuretano; b) Espuma de poliuretano recubierta con polipirrol vistas al microscopio 40x.....	26
Figura 9. Cinética del comportamiento de la DQO en un sistema batch anaerobio conteniendo espuma de poliuretano (E) como soporte; en uno de los casos la E se encuentra recubierta con polipirrol.....	33
Figura 10. Cinética del comportamiento de sulfatos en un sistema batch anaerobio conteniendo espuma de poliuretano (E) como soporte; en uno de los casos la E se encuentra recubierta con polipirrol.....	35
Figura 11. Cinética del comportamiento de la DQO en un sistema batch anaerobio conteniendo espuma de poliuretano (E) como soporte; en uno de los casos la E se encuentra recubierta con polipirrol.....	37
Figura 12. Cinética del comportamiento de sulfatos en un sistema batch anaerobio conteniendo espuma de poliuretano (E) como soporte; en uno de los casos la E se encuentra recubierta con polipirrol.....	38
Figura 13. c) Espuma de poliuretano con biopelícula; d) Espuma de poliuretano recubierta con polipirrol con biopelícula vistas al microscopio 100x.....	39

ÍNDICE

	Pág.
Dedicatoria.....	i
Agradecimientos.....	ii
Índice de cuadros.....	iii
Índice de figuras.....	iv
Resumen.....	1
I. INTRODUCCIÓN.....	2
Objetivo general.....	5
Objetivos específicos.....	5
Hipótesis.....	5
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	6
2.1. Antecedentes.....	6
2.2. Composición de las aguas residuales domésticas.....	6
2.3. Tratamiento anaerobio de aguas residuales.....	7
2.3.1. Mecanismo de la digestión anaerobia.....	9
2.4. Etapas de la digestión anaerobia.....	9
2.4.1. Hidrólisis.....	9
2.4.2. Acidogénesis.....	9
2.4.3. Acetogénesis.....	10
2.4.4. Metanogénesis.....	10
2.5. Factores que influyen en la digestión anaerobia.....	13
2.5.1. Agitación.....	13
2.5.2. Contenido de nutrientes.....	13
2.5.3. pH.....	14
2.5.4. Temperatura.....	14
2.5.5. Tóxicos e inhibidores.....	15
2.6. Filtros anaerobios.....	15
2.6.1. Ventajas.....	15

2.6.2. Desventajas.....	16
2.7. Características del material de soporte.....	16
2.8. Conceptos de biopelícula.....	16
2.8.1. Características de la biopelícula.....	17
2.8.2. Formación de la biopelícula.....	17
2.9. Fases de formación de biopelícula.....	18
2.9.1. Primera fase.....	18
2.9.2. Segunda fase.....	18
2.9.3. Tercera fase.....	18
2.10. Espuma de poliuretano.....	19
2.11. Tratamientos de agua residual domestica mediante el uso de filtros anaerobios.....	21
III. METODOLOGIA.....	22
3.1. Ubicación del experimento.....	22
3.2. Generalidades del experimento.....	22
3.3. Recubrimiento de la espuma de poliuretano con pirrol.....	23
3.4. Descripción de reactores.....	24
3.5. Formación de la biopelícula.....	24
3.6. Establecimiento del experimento.....	25
3.7. Descripción del experimento.....	26
3.8. Variables monitoreadas.....	26
3.8.1. Demanda Química de Oxígeno (DQO).....	26
3.8.2. Determinación de pH.....	28
3.8.3. Determinación de sulfatos.....	29
3.8.4. Determinación de nitratos.....	30
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	32
V. CONCLUSIONES.....	40
VI. GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	41
VII. BIBLIOGRAFÍA.....	43

RESUMEN

En éste trabajo se planteó el desarrollo de biopelículas sobre espuma de poliuretano y espuma de poliuretano recubierta con polipirrol como material de soporte, en reactores anaerobios tipo batch. La experimentación se realizó en el Laboratorio de Biología perteneciente al Departamento de Botánica de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Se utilizó un diseño completamente al azar con dos tratamientos, (T₁Espuma de poliuretano + Biopelícula + Agua residual doméstica, (T₂ Espuma de poliuretano recubierta con polipirrol + Biopelícula + Agua residual doméstica) con cuatro repeticiones en cada tratamiento, además se utilizaron dos testigos (control). (Testigo 1 Espuma de poliuretano + Agua residual doméstica) con dos repeticiones. (Testigo 2Espuma de poliuretano recubierta con polipirrol + Agua residual doméstica) con tres repeticiones. Se manejaron dos temperaturas 35 °C y temperatura ambiente.

Las variables evaluadas fueron Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sulfatos (SO₄⁻²), Nitratos (NO₃) y Potencial Hidrógeno (pH).

De acuerdo a los resultados, se detectó un incremento del 10% en la eficiencia de remoción de la DQO cuando la espuma recubierta se usó como soporte en comparación con el testigo sin recubrir.

Palabras clave: Polímeros, soportes, filtros anaerobios.

I. INTRODUCCIÓN

Según el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP, 2009), en el 2025 la población mundial será del orden de 7.200 millones de personas y unas dos terceras partes se concentrarán en ciudades. Aunque la urbanización por sí misma no es un problema, los crecimientos mal planeados, por lo general, causan problemas ambientales, como agotamiento y contaminación de los recursos agua, aire y suelo por el vertimiento y manejo inadecuado de los residuos líquidos y sólidos generados. [36]

Ante la inminente escasez del recurso en algunas zonas del país, su reutilización se plantea como una alternativa de abastecimiento y disminución del impacto ambiental negativo. Uno de los propósitos del desarrollo sustentable es reconciliar el crecimiento económico con el uso sostenido y racional de los recursos naturales; de esta manera, podemos decir que la depuración de aguas residuales para su reutilización sería una herramienta preponderante que permitiría concretar en la realidad este objetivo para nuestro país. [31]

La limitación de espacios para instalar plantas para tratamiento de aguas residuales obliga a desarrollar nuevas tecnologías para incrementar la capacidad de los sistemas depuradores por unidad de área construida. Una alternativa para el tratamiento biológico de aguas residuales son los sistemas que utilizan biopelículas como forma de crecimiento de microorganismos. [6]

Biopelícula es una comunidad de microorganismos embebidos en una matriz polimérica orgánica y adheridos a una superficie. Por lo tanto, una biopelícula está compuesta por tres partes principales: 1) microorganismos, 2) una matriz polimérica, y 3) una superficie que actúa como medio de soporte. Si una de estas partes se elimina, la biopelícula no se desarrolla.[13]

Recientes estudios de los procesos de tratamiento anaerobios y aerobios han demostrado que los reactores con biopelículas desarrolladas en soportes de origen natural o sintético, han sido usados con éxito para el tratamiento de agua residual municipal, obteniendo altas eficiencias de remoción de la DQO empleando altas velocidades de carga orgánica, cortos tiempos de retención hidráulica (TRH), y un tiempo de arranque rápido.

Los sistemas de biopelículas han cobrado gran importancia en los últimos años, principalmente en el tratamiento de aguas residuales. Diferentes tipos de materiales sintéticos como resinas termoplásticas (poliestireno y poliuretano), polietileno de baja y alta densidad, y materiales granulares (termoplásticos), han sido estudiados como medio de soporte para el desarrollo de biopelículas aerobias y anaerobias, los cuales son diferenciados de acuerdo a su porosidad y rugosidad..

Algunos investigadores han utilizado materiales de origen natural para el desarrollo de biopelículas; entre ellos destacan arena, paja, yute, piedra, grava, tallo de arrozal, arcilla granulada, piedra caliza, piedra pómez, cerámica, concha, ladrillo refractario, tierra de diatomeas, semillas de casuarina, puzolana, pizarra, madera, ostras y cenizas de carbón. [31]

Un factor importante a considerar, sobre todo en las etapas iniciales de la formación de una biopelícula, es la característica del soporte. Se ha estudiado que aquellas superficies que presentan mayor rugosidad son más susceptibles al desarrollo de la biopelícula, ya que las cavidades o poros de su estructura permiten el asentamiento de las primeras células, protegiéndolas de esfuerzos de corte dados por la turbulencia del medio. [39]

Los tallos secos de la cactácea *Opuntia imbricata* han sido usados con éxito como medio de soporte en procesos de tratamiento de aguas residuales para el desarrollo de biopelículas empleados en la biodegradación de una variedad de efluentes de distintos orígenes, como los de la industria textil, de lácteos, farmacéutica, rastro, refresquera y agua residual municipal, obteniéndose

efluentes con la calidad requerida por la normatividad mexicana (NOM-0003-ECOL-1997) para su reutilización. [14]

La tecnología basada en lechos fijos anaerobios, es una tecnología que requiere bajos costos de construcción, no requiere equipos sofisticados y además, se pueden utilizar como medios de soporte materiales de fácil consecución. Los filtros anaerobios son relativamente pequeños, fáciles de construir y presentan buenas eficiencias de remoción (70 a 90 %) de materia orgánica. [33]

Las aguas residuales domésticas son la principal fuente de contaminación y causante de grandes daños a la salud, por lo que se ha dado mucho énfasis al tratamiento anaerobio de las aguas residuales domésticas, debido a sus ventajas de ahorro de energía y la menor producción de lodos.

OBJETIVO GENERAL

Determinar la eficiencia del uso de espuma de poliuretano y espuma de poliuretano recubierta con polipirrol como soportes en el tratamiento de agua residual doméstica en filtros anaerobios.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1) Evaluar la eficiencia de la espuma de poliuretano como soporte para la formación de biopelícula como soporte en el tratamiento de agua residual doméstica en filtros anaerobios.

2) Evaluar la eficiencia de un copolímero como soporte para la formación de biopelícula como soporte en el tratamiento de agua residual doméstica en filtros anaerobios.

HIPÓTESIS

La espuma de poliuretano recubierta con polipirrol tendrá un mejor desempeño debido a una mejora en la afinidad entre los microorganismos y el pirrol.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Antecedentes

El tratamiento de las aguas residuales ha sido preocupación de la humanidad desde muchos años atrás; la aplicación de los procesos biológicos para tal fin, se remonta al siglo XVII cuando se empezaron a usar sistemas rústicos para el control de la contaminación y de los riesgos sanitarios y de salud pública asociados a la disposición de dichos desechos. Los procesos biológicos pueden ser aerobios o anaerobios, dependiendo del aceptor de electrones. [35]

La historia del tratamiento biológico de las aguas residuales se inicia a finales del siglo XIX precisamente con un proceso de biopelícula, un filtro biológico. Durante la primera mitad del siglo XX los sistemas de tratamiento basados en biopelícula, como los lechos bacterianos (filtros percoladores) dominaron la tecnología del tratamiento de aguas. Posteriormente, los sistemas de fangos activos, una vez caducada la vigencia de su patente, desplazaron en preferencia a los de biopelícula, en gran parte debido a un conocimiento más amplio de su funcionamiento y a un estancamiento en el desarrollo de la tecnología de biopelícula. En las últimas décadas, una serie de factores como el incremento en el volumen de agua residual, la limitación de espacio disponible y la promulgación de normativas ambientales cada vez más exigentes han promovido el desarrollo de nuevas tecnologías. [11]

2.2. Composición de las aguas residuales domésticas

El agua residual doméstica está compuesta por constituyentes físicos, químicos y biológicos. Es una mezcla de sustancias orgánicas e inorgánicas, suspendidas o disueltas. La mayor parte de la materia orgánica consiste en residuos alimenticios, excretas, materia vegetal, sales minerales y materiales diversos como jabones y detergentes sintéticos.

Desde el punto de vista de la fuente de generación, se puede definir el agua residual como la combinación de los residuos líquidos, o aguas portadoras de residuos, procedentes tanto de residencias como de instituciones públicas y establecimientos industriales y comerciales, a los que pueden agregarse eventualmente aguas subterráneas, superficiales y pluviales.

Se consideran aguas residuales domésticas a los líquidos provenientes de las viviendas o residencias, edificios comerciales e institucionales. La generación de aguas residuales es un producto inevitable de la actividad humana. El tratamiento y disposición apropiada de las aguas residuales supone el conocimiento de las características físicas, químicas y biológicas de dichas aguas; de su significado y de sus efectos principales sobre las fuentes receptoras, así como también, el conocimiento de la naturaleza del agua residual doméstica es necesario para determinar su manejo, tratamiento y disposición final. [33]

Las aguas residuales domésticas contienen material suspendido y disuelto orgánico e inorgánico que, de acuerdo con el tipo de constituyente, se clasifican en: i) Convencionales (sólidos suspendidos y coloidales, materia orgánica carbonácea, nutrientes y microorganismos patógenos); ii) No convencionales (orgánicos refractarios, orgánicos volátiles, surfactantes, metales, sólidos, disueltos) y iii) Emergentes (medicinas, detergentes sintéticos, antibióticos veterinarios y humanos, hormonas y esteroides, etc.). Los no convencionales y los emergentes pueden encontrarse en las aguas residuales, debido a la predominancia de sistemas de alcantarillado combinado y ante todo a la potencial mezcla con agua residual industrial. [17]

2.3. Tratamiento anaerobio de aguas residuales

El tratamiento biológico anaerobio de aguas residuales supone la remoción de contaminantes mediante actividad biológica. Dicha actividad se aprovecha para la remoción de sustancias orgánicas biodegradables, coloidales o disueltas, contenidas en el agua residual, mediante su conversión en biomasa fácilmente

sedimentable y en gases que escapan a la atmósfera. También es posible la remoción de nitrógeno y fósforo del agua residual mediante los procesos biológicos. Los microorganismos involucrados en el tratamiento biológico de aguas residuales se encargan de la estabilización de la materia orgánica a través de procesos de oxidación-reducción con el fin de obtener energía para crecimiento y mantenimiento celular.

La digestión anaerobia es una práctica de tratamiento de residuos en el que se pueden lograr tanto el control de la contaminación y la recuperación de energía, así mismo implica la degradación y la estabilización de materiales orgánicos bajo condiciones anaeróbicas por organismos microbianos y conduce a la formación de biogás (una mezcla de dióxido de carbono y metano, una fuente de energía renovable) y la biomasa microbiana. Este proceso permite eliminar, mediante el más bajo costo, hasta el 80% de la carga orgánica contaminante del agua. [33]

El tratamiento anaerobio es un proceso biológico ampliamente utilizado en el tratamiento de aguas residuales. Cuando éstas tienen una alta carga orgánica, se presenta como única alternativa frente al que sería un costoso tratamiento aerobio, debido al suministro de oxígeno. El tratamiento anaerobio se caracteriza por la producción del denominado “biogás”, formado fundamentalmente por metano (60-80%) y dióxido de carbono (40-20%) y susceptible de ser utilizado como combustible para la generación de energía térmica y/o eléctrica. Además, solo una pequeña parte de la DQO tratada (5-10%) se utiliza para formar nuevas bacterias, frente al 50-70% de un proceso aerobio. Sin embargo, la lentitud del proceso anaerobio obliga a trabajar con altos tiempos de residencia, por lo que es necesario diseñar reactores o digestores con una alta concentración de microorganismos. [28]

2.3.1. Mecanismo de la digestión anaerobia

La digestión anaerobia es un proceso biológico degradativo en el cual parte de los materiales orgánicos de un sustrato son convertidos en biogás, mezcla de dióxido de carbono y metano con trazas de otros elementos, por un consorcio de bacterias que son sensibles o completamente inhibidas por el oxígeno.

Utilizando el proceso de digestión anaerobia es posible convertir gran cantidad de residuos vegetales, estiércoles, efluentes de la industria alimentaria y fermentativa, de la industria papelera y de algunas industrias químicas, en subproductos útiles. En la digestión anaerobia más del 90% de la energía disponible por oxidación directa se transforma en metano, consumiéndose sólo un 10% de la energía en crecimiento bacteriano frente al 50% consumido en un sistema aerobio. [33]

2.4. Etapas de la digestión anaerobia

El mecanismo de digestión anaerobia se divide en 4 etapas principales (figura 1):

2.4.1. Hidrólisis: la hidrólisis es la ruptura de moléculas grandes, solubles e insolubles, en moléculas de menor tamaño que pueden ser transportadas dentro de las células y metabolizadas. En este proceso no se produce metano, y en la mayor parte de los casos supone una etapa que se desarrolla lentamente, en esta etapa los compuestos insolubles y los solubles poliméricos son escindidos en compuestos de menor peso molecular, denominados mono y oligómeros (Azúcar, aminoácidos y péptidos), por acción de exoenzimas de forma tal que los compuestos pueden ser asimilados por la célula. En este proceso intervienen las bacterias fermentativas.

2.4.2. Acidogénesis: una vez las bacterias asimilan los compuestos generados en la primera etapa estos se transforman en ácidos orgánicos saturados, principalmente propiónico, butírico y acético, en proporciones variables que

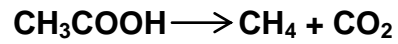
dependen de las condiciones medio ambientales. Paralelamente se produce hidrógeno.

2.4.3. Acetogénesis: existen dos precursores del metano: el ácido acético y el hidrógeno de tal forma que los dos productos de la fase anterior deben ser necesariamente transformados a estos para dar lugar a la formación del metano. El avance de esta fase está fuertemente influenciado por las condiciones del medio especialmente por la presión parcial del hidrógeno. En esta etapa intervienen bacterias acetogénicas (productoras de hidrógeno) y bacterias metanogénicas (consumidoras de hidrogeno). La acidogénesis siempre produce hidrógeno que se convierte en un elemento regulador del metabolismo del proceso.

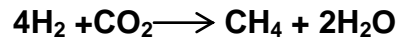
Formación de ácidos (acidogénesis) y acetato (acetogénesis): Los productos finales de la hidrólisis son transformados en ácidos orgánicos de cadena corta, otros compuestos de bajo peso molecular, hidrógeno y dióxido de carbono. Estas bacterias son altamente resistentes a variaciones en las condiciones ambientales. Por ejemplo, aunque el pH óptimo para el desarrollo de su actividad metabólica es 5-6, los procesos anaerobios generalmente son conducidos a pH 7, y aún en estas condiciones su actividad metabólica no decae.

2.4.4. Metanogénesis: esta es la etapa más importante del proceso, pues en ella donde se produce la remoción de la materia orgánica disuelta en el agua y la recuperación de la energía en forma de metano, adicionalmente del correcto equilibrio de esta etapa y las anteriores depende la estabilidad del proceso. Intervienen las bacterias acetoclásticas y las metanogénicas hidrogenoclásticas respectivamente. La formación de metano, siendo este el último producto de la digestión anaerobia, ocurre por dos grandes rutas: La primera de ellas, es la formación de metano y dióxido de carbono a partir del principal producto de la fermentación, el ácido acético. Las bacterias que consumen el ácido acético se denominan bacterias acetoclastas.

La reacción, planteada de forma general, es la siguiente:



Algunas bacterias metanogénicas son también capaces de usar el hidrógeno para reducir el dióxido de carbono a metano (metanogénicas hidrogenoclastas) según la reacción:



La metanogénesis es la etapa crítica en el proceso de degradación, por las características de las bacterias que la llevan a cabo, y por ser la más lenta de todo el proceso. [33,28]

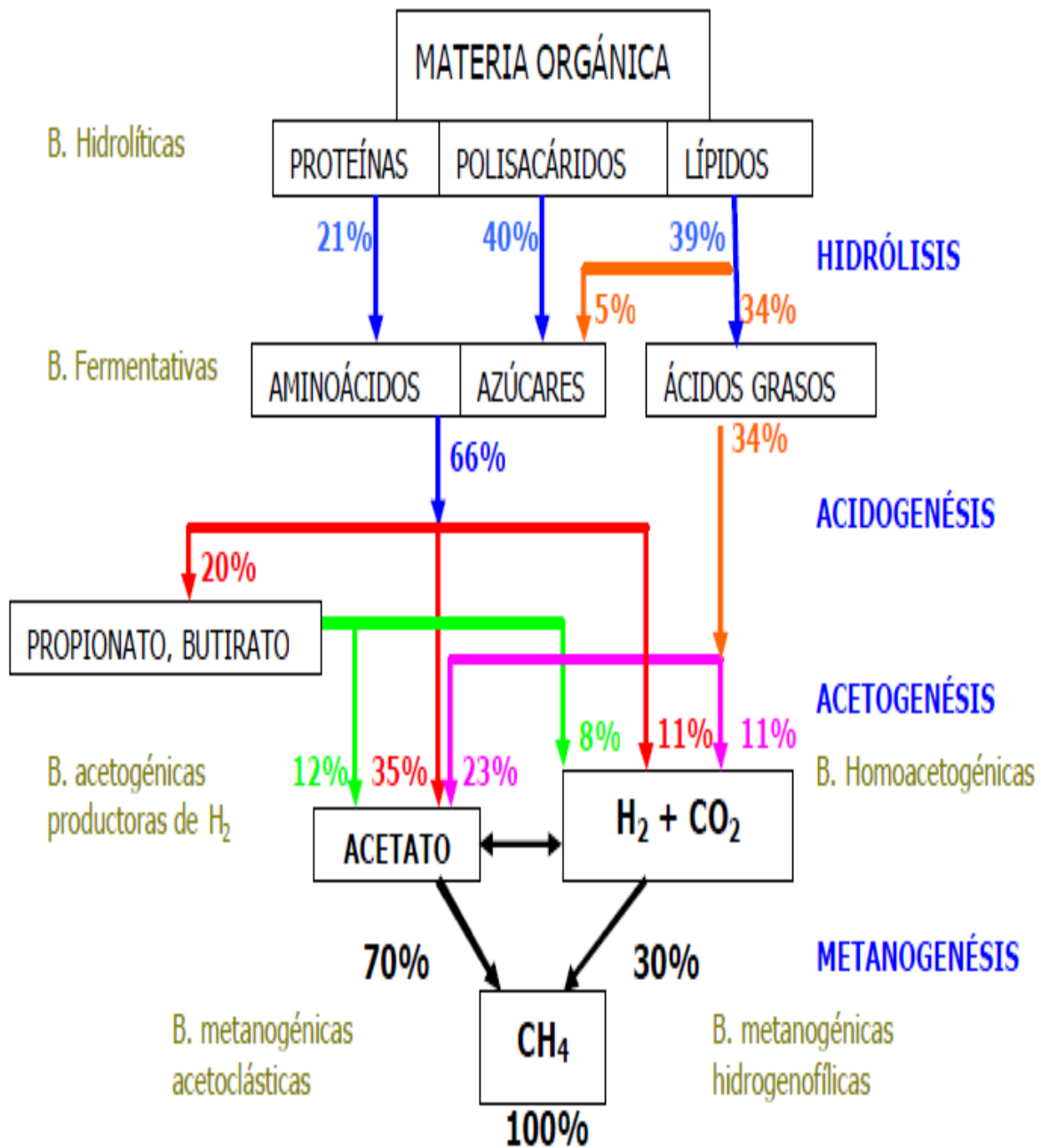


Figura 1. Etapas de la digestión anaerobia [15,38]

2.5. Factores que influyen en la digestión anaerobia

La digestión anaerobia al igual que cualquier proceso es susceptible a un cierto número de factores que pueden alterar la estabilidad y la eficacia del mismo.

2.5.1. Agitación

La agitación de los reactores anaerobios tiene diversos objetivos, que se describen a continuación. [21]

- Poner en contacto el sustrato fresco o influente con la población bacteriana, y eliminar los metabolitos producidos por los metanogénicos, al favorecer la salida de los gases; proporcionar una densidad uniforme de población bacteriana; prevenir la formación de capa superficial y de espumas, así como la sedimentación en el reactor.
- Prevenir la formación de espacios muertos que reducirían el volumen efectivo del reactor, y la formación de caminos preferenciales en función de la hidráulica del sistema.
- Eliminar la estratificación térmica, manteniendo la temperatura uniforme en todo el reactor.

2.5.2. Contenido de nutrientes

El proceso anaerobio se caracteriza, frente a procesos aerobios, por los bajos requerimientos de nutrientes, debido fundamentalmente a los bajos índices de producción de biomasa. A pesar de ello, la biomasa necesita para su desarrollo el suministro de una serie de nutrientes minerales, además de una fuente de carbono y de energía. Los principales nutrientes del sistema anaerobio son nitrógeno, sulfuro, fosforo, hierro, cobalto, níquel, molibdeno, selenio, riboflavina y vitamina B12.[34]

2.5.3. pH

Los microorganismos anaerobios necesitan un pH en torno a la neutralidad para su correcto desarrollo, aunque permiten cierta oscilación. El pH debe de estar en torno a la neutralidad, presentando problemas graves si el pH baja por debajo de 6 o sube por encima de 8.3 [10]. Sin embargo, el proceso de inhibición parece ser completamente reversible, aunque el tiempo de recuperación depende de la duración de la alteración.

El pH es también una importante variable de diagnóstico de los sistemas anaerobios, pues muchos fenómenos tienen influencia sobre el mismo. Ejemplos clásicos son las sobrecargas orgánicas, o la presencia de un inhibidor de la etapa metanogénica, que pueden provocar desequilibrios entre la producción y el consumo de ácidos grasos volátiles, produciendo a acumulación de estos y el consiguiente descenso del pH, produciéndose la acidificación del reactor.

2.5.4. Temperatura

Podrá operarse en los rangos psicrófilico (temperatura ambiente), mesófilico (temperaturas en torno a los 35 °C) o termófilico (temperaturas en torno a los 55 °C). Las tasas de crecimiento y reacción aumentan conforme lo hace el rango de temperatura, pero también la sensibilidad a algunos inhibidores, como el amoníaco. En el rango termófilico se aseguran tasas superiores de destrucción de patógenos. [2] El proceso anaerobio mesófilico es el más utilizado en la digestión anaerobia, cuyo intervalo de temperatura está entre los 25-45°C, con un ideal entre los 33-38°C. [1] La velocidad del proceso aumenta con la temperatura, aunque también aumentan los requerimientos energéticos, y puede disminuir la estabilidad del proceso, al menos en presencia de determinados tóxicos. [7]

2.5.5. Tóxicos e inhibidores

Estos son elementos principalmente de naturaleza química que pueden inhibir o disminuir sustancialmente la actividad bacteriana, afectando directamente la eficiencia global del proceso. La magnitud de toxicidad observada es una función de diversos factores, incluyendo concentración, antagonismos, sinergismos, formación de complejos y aclimatación. [9]

2.6. Filtros anaerobios

Un filtro anaerobio es un reactor, en cuyo interior se dispone de un medio de soporte (lecho) constituido por materiales tales como piedras, cerámicas, espumas, materiales plásticos, cáscara de coco, bambú entre otros, en cuya superficie e intersticios se fijan las bacterias, las cuales están contenidas en el lodo que se inocula en el reactor, con el objetivo de que sobre su superficie se desarrolle una biopelícula bacteriana que lleve a cabo la degradación anaerobia. Este lecho es un lecho fijo lo cual significa que las bacterias no se mueven libremente, sino que están adheridas a un soporte inerte. En este caso, los microorganismos anaerobios se desarrollan sobre la superficie de un sólido formando una biopelícula de espesor variable. El sólido permanece inmóvil en el interior del equipo. [33,28]

2.6.1. Ventajas

- Soporta altas cargas orgánicas (15 kg DQO/m³ d).
- Con recirculación es resistente a sobrecargas orgánicas o tóxicos.
- Construcción simple.
- Aplicable a pequeña y mediana escala.
- Rápidos arranques.
- Operación simple.
- Operación con flujo descendente o ascendente.

2.6.2. Desventajas

- Riesgo de taponamiento sobre todo con soportes de piedra.
- Sensible a sólidos suspendidos en el efluente.
- Sensible a aguas que forman precipitados.
- Alto costo de material de soporte.
- Presencia de sólidos suspendidos en el efluente.

2.7. Características del material soporte

Las características físicas y químicas del material soporte influyen en gran manera sobre la adherencia de la biopelícula.

El material soporte de la biopelícula se puede clasificar en función de su origen y en función de la superficie que soporta la biopelícula:

De origen natural: arena, paja, yute, piedra, grava, tallo de arrozal, arcilla granulada, piedra caliza, piedra pómez, cerámica, concha, ladrillo refractario, tierra de diatomeas, semillas de casuarina, puzolana, pizarra, madera, ostras, cenizas de carbón, etc.

De origen sintético: plexiglás, PVC, vidrio, HDPE, LDPE, nylon, carbón activo, esponja, espuma de poliuretano, porcelana, ruedas de coche.

2.8. Conceptos de biopelícula

Biopelículas son comunidades bacterianas englobadas en una matriz de exopolisacáridos producida por las bacterias y adheridas a una superficie viva o inerte. En la naturaleza constituyen un modo de crecimiento protegido que permite la supervivencia de las bacterias en un medio hostil. Las estructuras que forman estas microcolonias contienen canales por los que circulan los nutrientes.[5]

Biopelícula es aquella población bacteriana adherida entre sí, formando gránulos, o adherida a la superficie de un soporte particulado; cabe mencionar que tanto las propiedades físicas como estructurales de ambas son bastante similares, su hidrodinámica y fenómenos de transferencia de masa no presentan mayores diferencias. [20]

2.8.1. Características de la biopelícula

La característica principal de esta asociación biológica consiste en que los microorganismos están unidos a la superficie de un sólido que actúa de soporte, son por esto también llamados sistema de película fija (retenidos en el reactor, no necesitan separarlos del efluente). [33]

2.8.2. Formación de la biopelícula

Se componen de grupos complejos de microorganismos que forman delgadas e irregulares colonias o múltiples capas superficiales, donde se protegen contra los cambios del medio o sustancias tóxicas, se relacionan particularmente con sistemas acuáticos con altos contenidos de nutrientes, especialmente aguas residuales. La biopelícula no sigue una forma única de crecimiento; las aglomeraciones de microorganismos tienden a ocupar espacios limitados rodeados de otros espacios sin crecimiento. Los microorganismos se desarrollan de una manera irregular, sin formar biopelículas definidas. Se observan espacios libres de microorganismos por los que circula el agua con nutrientes y oxígeno hasta las partes más profundas de los cubos de espuma de poliuretano (soporte). Se identifica el diámetro promedio de los poros como el factor limitante para que los microorganismos colonicen las zonas internas de material y para que circulen los nutrientes. [18]

2.9. Fases de formación de biopelícula

Los procesos que conllevan a la formación de la biopelícula son similares para ambientes acuáticos naturales como para los desarrollados en aguas residuales.

Después de acondicionarse la superficie del sólido, que generalmente es impermeable y de naturaleza muy variada, con materiales orgánicos, se lleva a cabo la adsorción de bacterias a superficies en un proceso de tres fases o pasos:

2.9.1. Primera fase: adhesión reversible a la superficie, los microorganismos normalmente se perciben como seres solitarios que flotan libremente, es decir, en estado planctónico.

2.9.2. Segunda fase: adhesión irreversible a la superficie, a medida que las bacterias se multiplican, se adhieren más firmemente (sésiles) y se diferencian, cambiando los patrones de expresión génica en formas que promueven la supervivencia.

2.9.3. Tercera fase: biopelícula sobre matriz protectora viscosa, una vez bien adheridas, las bacterias comienzan a segregar una matriz circundante conocida como sustancia polimérica extracelular (SPE). Se trata de una matriz protectora o "limo". A partir de ahí, las pequeñas colonias bacterianas empiezan a formar una biopelícula inicial. [27]

Los microorganismos formadores de biopelículas poseen algunas ventajas sobre los microorganismos suspendidos: 1) mayor persistencia dentro del sistema; 2) mayores tasas de crecimiento; 3) mayor incremento en la actividad metabólica; y 4) mayor resistencia a la toxicidad. En la (figura 2) se puede observar la distribución de los organismos dentro de la biopelícula.

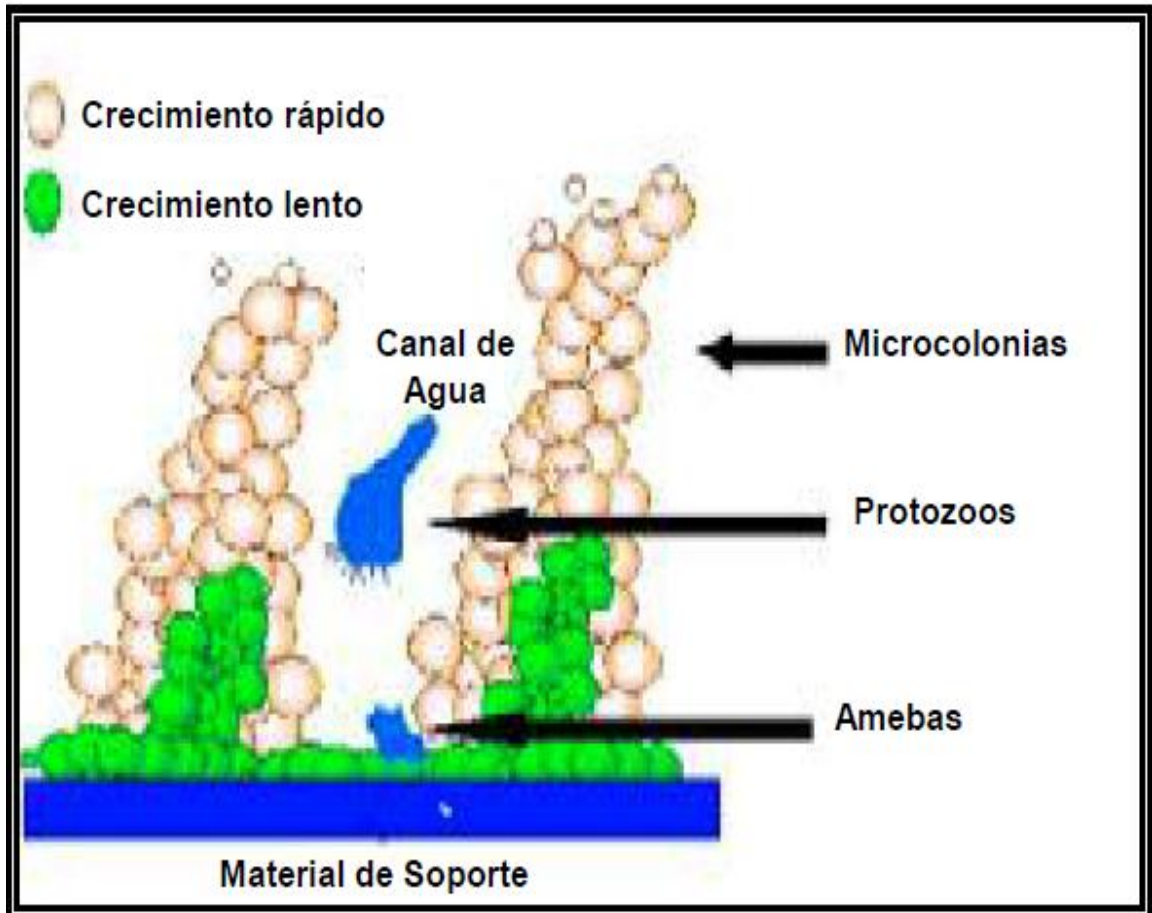


Figura 2. Distribución de los organismos dentro de la biopelícula. [3]

2.10. Espuma de poliuretano

La Espuma de Poliuretano es un material sintético y duroplástico, altamente reticulado y no fusible, que se obtiene de la mezcla de dos componentes generados mediante procesos químicos a partir del petróleo y el azúcar: el Isocianato y el Polioli. El poliuretano al igual que el polivinil, son materiales ampliamente usados en la inmovilización de microorganismos gracias a su resistencia a condiciones ambientales diferentes. Se ha reportado el uso de estas sustancias en la inmovilización de *Scenedesmus obliquus* para la remoción de metales en agua. [37]

El polímero es un compuesto químico que posee una elevada masamolecular y que es obtenido a través de un proceso de polimerización. En tanto, la polimerización consiste en la unión de varias moléculas de un compuesto a partir del calor, la luz o un catalizador, con la misión de conformar una cadena de múltiples eslabones de moléculas y así entonces obtener una macromolécula. En la (figura 3) se puede observar el proceso de polimerización química del pirrol-polipirrol.

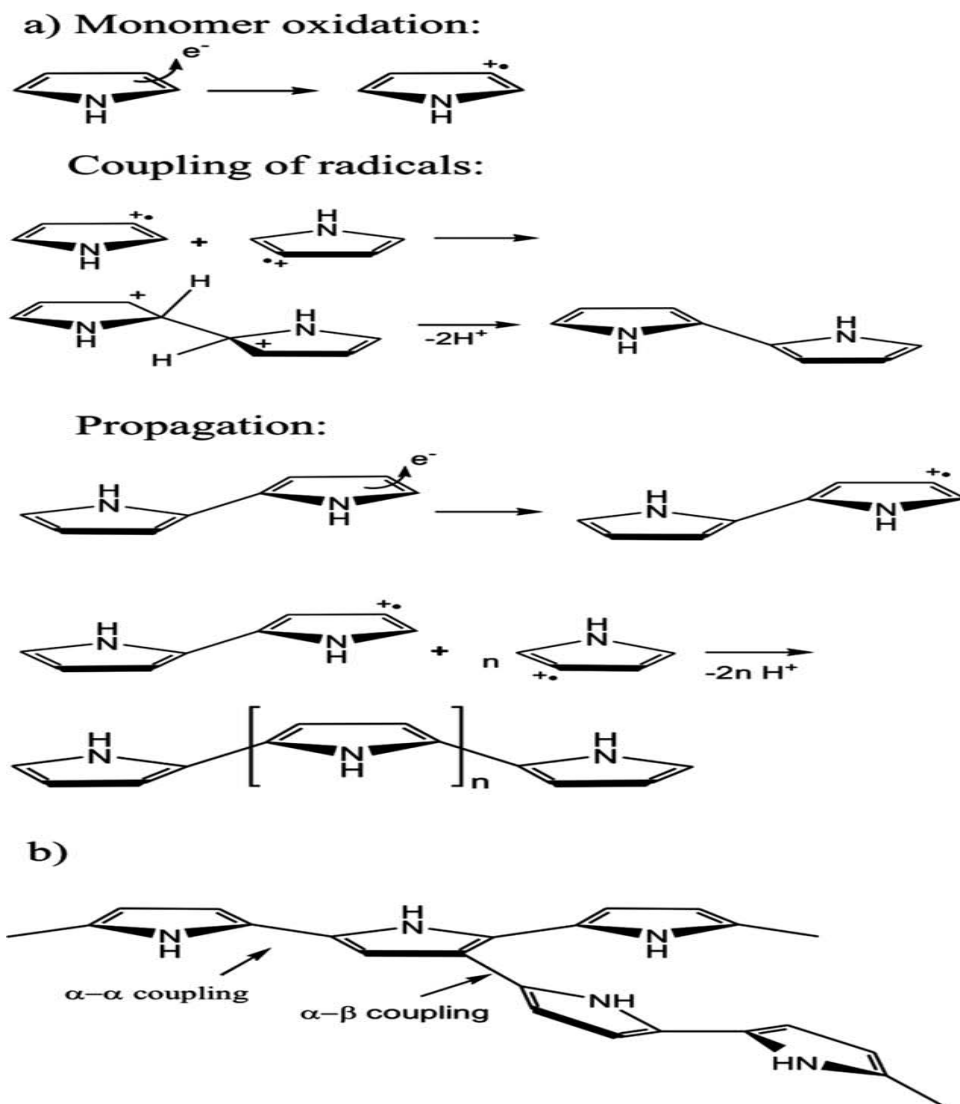


Figura 3. (a) Polimerización química de pirrol y (b) las dos posibles estructuras de PPy [26]

2.11. Tratamientos de agua residual mediante el uso de filtros anaerobios

Van Dun *et al* 1999 [40] realizaron un trabajo en donde utilizaron una columna de sabanas con espuma de poliuretano reticulada en donde introdujeron agua residual domestica por un corto tiempo para evaluar el atrapamiento físico y filtración de partículas. Los resultados revelaron que para la eliminación suspendida de DQO que fue en un >75 % eficaz con un tiempo de retención hidráulica bajo de 0,5 horas. Por lo tanto la presencia de una biopelícula anaerobia en conjunto con la eliminación de sólidos en suspensión (SS) de la influente aumentaron la eficiencia de eliminación en el tratamiento de las aguas residuales domesticas en un filtro con espuma de poliuretano a una temperatura de 24°C.

Camargo y Nour 2001 [4] utilizaron aros de bambú (*Bambusatuldoides*) como filtro biológico en un reactor en columna de una planta de tratamiento de agua residuales, observando que el uso de este material como medio de soporte para el desarrollo de biopelículas resultó ser relativamente eficiente.

Villegas *et al* 2006 [41] en su estudio de un filtro anaerobio de flujo ascendente obtuvieron remociones de 49,6% ± 2,6 en DQO, de 56,6% ± 2,1 en DBO₅ y 62,4% ± 2,3 en SST, sin detectarse diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos.

Zeeman *et al* 2001 [42] investigaron en un filtro anaerobio (FA) y un anaeróbico híbrido (AH) el pre tratamiento de las aguas residuales a una temperatura de 13°C y un Tiempo de retención hidráulica (TRH) de 4 horas, el filtro anaerobio y la parte superior del reactor anaeróbico hídrico tenían hojas verticales de espuma de poliuretano reticulada con las perillas. El reactor FA mostró una eliminación significativamente mayor de la demanda total y en suspensión química de oxígeno (DQO) que el reactor de AH, respectivamente, 55% y 82% en el reactor de AF y el 34% y el 53% en el reactor de AH. Debido a que los reactores se hicieron funcionar a un corto TRH y la baja temperatura, la hidrólisis, la acidificación y la metanogénesis sobre la base de la DQO influente

se limitan , respectivamente, 12%, 21% y 23% para el reactor de AF y el 12%, 17% y 16 % para el reactor de AH. . Por lo tanto, se recomienda el reactor AF para el pre-tratamiento de aguas residuales domésticas a bajas temperaturas.

III. METODOLOGÍA

3.1. Ubicación del experimento

El trabajo experimental se desarrolló a escala laboratorio en reactores batch instalados en el Laboratorio de Biología, perteneciente al Departamento de Botánica de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro ubicada en Buenavista, Saltillo, Coahuila México a los 25°21'13'' latitud norte, 101°02'01'' longitud oeste y a una altura de 1758 metros sobre el nivel del mar.

3.2. Generalidades del experimento

Ambos reactores trabajaron bajo las mismas condiciones de carga orgánica, La diferencia estriba en los medios de soporte con que fueron empacados para el desarrollo de la biopelícula; en algunos se utilizó espuma de poliuretano y en otros fue espuma de poliuretano recubierta con polipirrol, además de las temperaturas a que se conservaron los reactores, la mitad de ellos se mantuvieron a una temperatura controlada de 35 °C y la otra mitad a temperatura ambiente. El agua residual que se utilizó es de uso interno de la propia universidad, la cual se colectó en el afluente de la planta de tratamiento ubicada a un costado del jardín botánico, se le realizaron análisis de los distintos parámetros considerados en esta investigación: DQO, SO_4^{-2} , NO_3^- y pH.

3.3. Recubrimiento de la espuma de poliuretano con pirrol

Se pesaron 5 gramos de espuma de poliuretano y se mezclaron con 700 gramos de agua destilada hasta desplazar la mayor cantidad de aire atrapado en el poliuretano, es decir, hasta que no se observó que flotaran sobre la superficie del agua. Posteriormente, se agregaron 1.6 gramos de pirrol monómero y se procedió a homogenizar con agitación magnética durante 1 hora, con la finalidad de que el pirrol se difundiera hasta el interior de los poros del poliuretano. A continuación se agregaron 2.7156 g de persulfato de amonio (APS) como agente oxidante, dando inmediatamente una coloración negra en la mezcla de reacción, lo cual es característico de la formación del polipirrol semiconductor. Se dejó reaccionar durante 2 horas, después de lo cual, se procedió a retirar las piezas de poliuretano recubiertas con polipirrol (PU/PPy), las cuales fueron lavadas con abundante agua corriente, hasta que no se observó una coloración negra en el agua de lavado. Se procedió a secar toda la muestra a 70 C durante 24 horas. En la (figura 4) se muestra la espuma de poliuretano antes y después de recubrirse con el polipirrol.



Figura 4. Espuma de poliuretano antes y después de recubrirse con polipirrol.

3.4. Descripción de los reactores

Para la experimentación se utilizaron frascos tipo batch con un volumen de 540 mililitros, a estos frascos se les perforó su tapa donde se colocó tapones de hule para poder tomar la muestra con una jeringa al momento de monitorear y así evitar la entrada de oxígeno al reactor. (Ver figura 5)

La digestión anaerobia se desarrolló en reactores batch con capacidad de 540 mililitros, se destinaron 8 reactores para el tratamiento 1, 8 reactores para el tratamiento 2, 6 reactores para el testigo (control) 1, 4 reactores para el testigo (control) 2 teniendo un total de 26 reactores, de estos la mitad se mantuvieron en una incubadora a una temperatura de 35 °C y la otra mitad de los reactores estuvieron a temperatura ambiente.



Figura 5. Reactores tipo batch.

3.5. Formación de la biopelícula

Para la formación de la biopelícula el día 2 de octubre de 2013, se colectó lodo anaerobio de la planta de tratamiento de la Universidad. A cada reactor se le agregó 10% de lodo anaerobio (54 ml), 40% de agua residual doméstica (216 ml) y se le adiciono 1 gramo de espuma de acuerdo a su respectivo tratamiento, dejando un espacio vacío para la formación de los gases. Los reactores se dejaron por 15 días para que se formara la biopelícula. (Ver figura 6)



Figura 6. Reactores en proceso para formación de la biopelícula.

3.6. Establecimiento del experimento

El día 16 de octubre se retiró el exceso de lodo lavando con agua corriente la espuma y agregándole nueva agua residual para el proceso experimental y se colocaron 13 reactores a 35 °C y los otros 13 a temperatura ambiente.

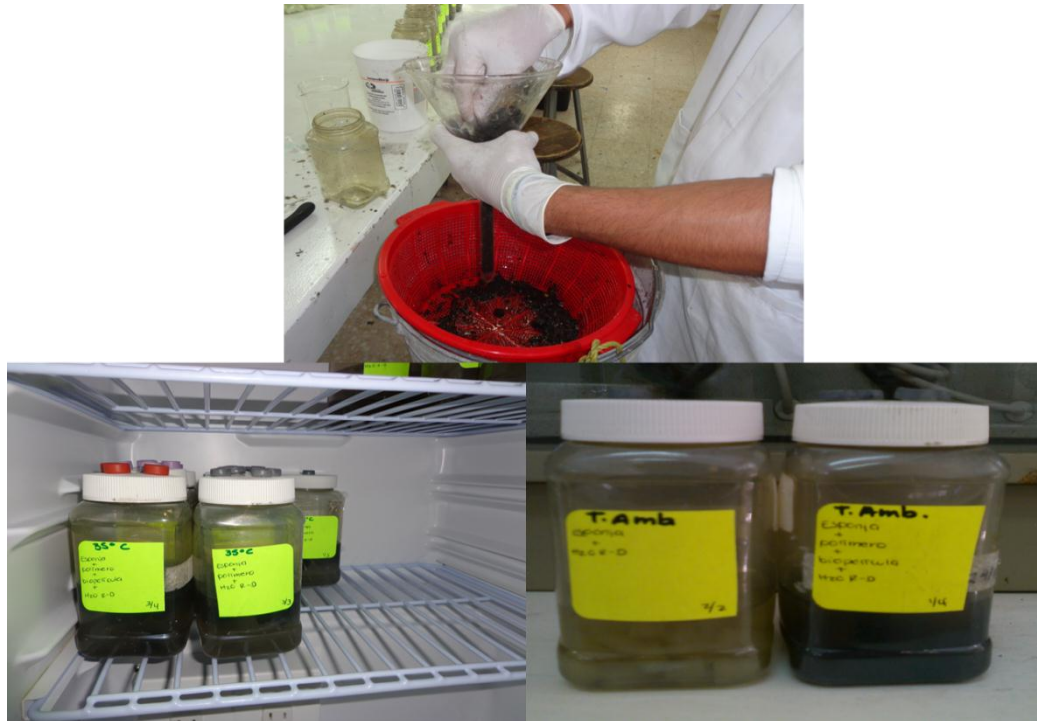


Figura 7. Eliminación del exceso del lodo y arranque del experimento.

3.7. Descripción del experimento

El experimento fue distribuido de acuerdo a un Diseño Completamente al azar dos tratamientos con cuatro repeticiones cada tratamiento, además dos testigos, el testigo 1 con dos repeticiones y el testigo 2 con tres repeticiones.

- **Tratamiento 1.** Espuma de poliuretano + Biopelícula + Agua residual doméstica
- **Tratamiento 2.** Espuma de poliuretano recubierta con polipirrol + Biopelícula + Agua residual doméstica
- **Testigo (control) 1.** Espuma de poliuretano + Agua residual doméstica
- **Testigo (control) 2.** Espuma de poliuretano recubierta con polipirrol + Agua residual doméstica.

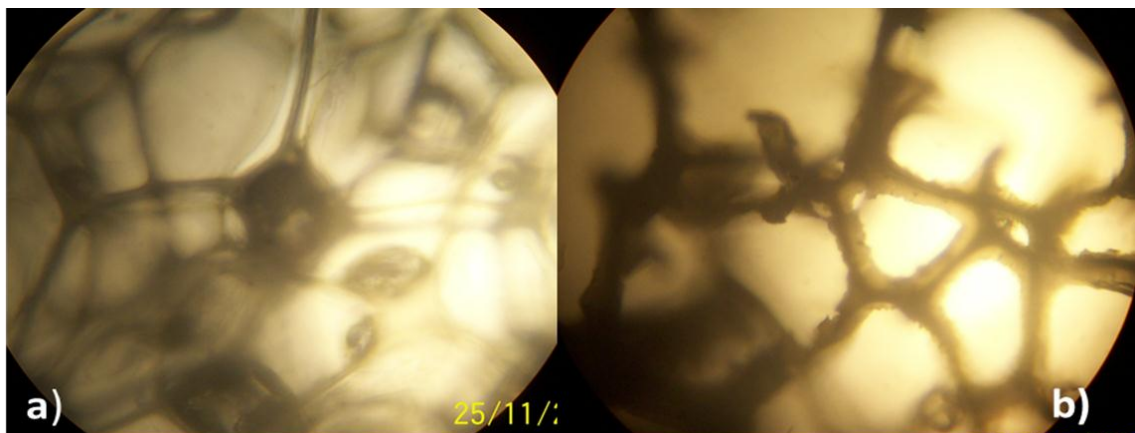


Figura 8. a) Espuma de poliuretano; b) Espuma de poliuretano recubierta con polipirrol vistas al microscopio 40x

En la figura 8 se puede observar como la espuma de poliuretano recubierta con polipirrol b); muestra mayor superficie que la espuma sin recubrir a).

3.8. Variables monitoreadas

3.8.1. Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Es la cantidad de oxígeno necesario para la oxidación de la materia orgánica e inorgánica presentes en una muestra de agua. Se entiende por demanda

química de oxígeno (DQO) como la cantidad de materia orgánica e inorgánica en un cuerpo de agua, susceptible de ser oxidada por un oxidante fuerte. Se expresa en mg/l de oxígeno. [22]

La materia orgánica es oxidada por el dicromato de potasio en un medio fuertemente ácido en presencia del catalizador (Ag_2SO_4 y H_2SO_4). La coloración pasa de un color amarillo a verde-azul y se lee a una absorbancia de 600 nanómetros. Esta es la base de las mediciones de los reactores anaerobios las condiciones de los parámetros de operación para los tratamientos de efluentes industriales y urbanos.

Materiales y reactivos

- Digestor Termorregulador HACH DRB/200
- Tubos Hach con tapón de rosca
- Espectrofotómetro HACH DR/2010
- Micropipetas LABMATE SOFT (1/5000) (100/1000) ml
- Centrifuga SOLBAT J600
- Frascos ámbar de 1 litro
- Matraces de aforación de 1 litro
- Dicromato de potasio($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$)
- Sulfato de mercurio, (HgSO_4)
- Ácido sulfúrico (H_2SO_4)
- Sulfato de plata (Ag_2SO_4)
- Biftalato de potasio ($\text{HOOC-C}_6\text{H}_4\text{-COOK}$)

Preparación de soluciones

Solución de Dicromato de potasio ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$): solución digestora para altas concentraciones (mayores a 75 mg DQO/L). Secar durante 2 horas a 103 °C, 20 gramos de dicromato de potasio. Enfriar en un desecador y pesar 10.216 gramos de dicromato, pasar este dicromato a un matraz de adoración de un litro y añadirle 500 ml de agua destilada, adicionar 33.3 gramos de sulfato mercúrico

(HgSO_4), adicionar 167 ml de ácido sulfúrico concentrado lentamente por ser una reacción exotérmica en baño de hielo, por último aforar a un litro con agua destilada cuando la mezcla se haya enfriado, en el caso de que no todas las partículas se hayan disuelto, se mezcla con agitación magnética, para después pasar esta mezcla a un frasco ámbar, ya que puede sufrir una descomposición por la luz.

Solución de Ácido sulfúrico-Plata: pesar con precisión 15 gramos de sulfato de plata, pasar este compuesto a un matraz de aforación de un litro, aforar a 1 litro con ácido sulfúrico concentrado, dejarlo reposar durante dos días en un lugar seco y oscuro para su completa disolución. Después pasar esta solución a un frasco ámbar.

Procedimiento

En un tubo hach añadir 3.5 ml de la solución de Acido plata. Y 1.5 ml de la solución de Dicromato de potasio.

Agregar 2.5 ml de la muestra problema, cerrar bien con el tapón de rosca; es necesario realizar un blanco de referencia (agua destilada).

Agitar lentamente por inversión. Colocar los tubos en el Digestor durante 2 horas a 150°C .

Sacar los tubos y dejar enfriar a temperatura ambiente. Leer las absorbancia en el espectrofotómetro a una longitud de onda de 600 nm.

Calcular la concentración de la DQO con la curva estándar.

3.8.2. Determinación de pH

Es una medida de la concentración de iones de hidrógeno en un medio. Esta concentración está directamente relacionada al carácter ácido, neutro o básico del medio. Un pH menor de 7.0 indica una tendencia hacia la acidez, mientras que un valor mayor de 7.0 muestra una tendencia hacia lo alcalino. La mayoría

de las aguas naturales tienen un pH entre 4 y 9, aunque muchas de ellas tienen un pH ligeramente básico debido a la presencia de carbonatos y bicarbonatos. Un pH muy ácido o muy alcalino, puede ser indicio de una contaminación industrial. El valor del pH en el agua, es utilizado también cuando nos interesa conocer su tendencia corrosiva o incrustante, en las plantas de tratamiento de agua. [23]

Materiales y equipo

- Vasos de precipitado de 100 ml
- Agua residual
- Agua destilada
- pHmetro/Conductivity Meter ORION STAR A215
- Tiras medidoras de pH

Procedimiento

El potenciómetro debe ser calibrado en cada uso con las soluciones buffer de 4, 7 y 10.

Introducir el electrodo del potenciómetro en el vaso con agua residual.

Las lecturas de pH aparecen cuando el indicador (parpadeante) se detiene en la pantalla.

3.8.3. Determinación de Sulfatos

El ion sulfato precipita con cloruro de bario, en un medio ácido (HCl), formando cristales de sulfato de bario de tamaño uniforme. La absorción espectral de la suspensión del sulfato de bario se mide con un nefelómetro o fotómetro de transmisión. [24]

La concentración de ion sulfato se determina por comparación de la lectura con una curva patrón.

Materiales y equipo

- Tubos hach
- Espectrofotómetro HACH DR/2010
- Micropipetas LABMATE SOFT (1/5000) (100/1000) ml
- Centrifuga SOLBAT J600
- Parrilla de agitación magnética
- Magnetos
- Solución acondicionadora
- Matraces Erlenmeyer
- Cloruro de bario
- Cronometro

Preparación de solución acondicionadora

Mezclar en un matraz de aforación con agitación magnética 75 ml de glicerol con una solución que contenga 45 ml de ácido clorhídrico concentrado, 450 ml de agua destilada, 150 ml de alcohol etílico o isopropílico al 95% y 112.5 gramos de cloruro de sodio. Pasar esta solución a un frasco ámbar.

Procedimiento

Transferir a un matraz Erlenmeyer 45 ml de agua destilada y 5 ml de muestra, es necesario realizar un blanco de referencia (agua destilada) colocar magneto y encender la parrilla, agregar 2.5 ml de solución acondicionadora, agregar 0.15 gramos de cloruro de bario y cronometrar a 1 minuto a una velocidad constante, Inmediatamente después de terminar el minuto de agitación verter algo de la solución a un tubo hach y leer en el espectro a 420 nm.

3.8.4. Determinación de Nitratos

El nitrato es una de las formas de nitrógeno de mayor interés en las aguas naturales, residuales y residuales tratadas, se presenta generalmente a nivel de

trazas en el agua de superficie, pero puede alcanzar niveles elevados en las subterráneas. [25]

El nitrato se encuentra sólo en pequeñas cantidades en las aguas residuales domésticas, pero en el diluyente de las plantas de tratamiento biológico desnitrificante, el nitrato puede encontrarse en concentraciones de hasta 30 mg de nitrato.

Materiales y equipo

- Tubos hach
- Espectrofotómetro HACH DR/2010
- Micropipetas LABMATE SOFT (1/5000)ml (100/1000) ul (20/200) ul
- Centrifuga SOLBAT J600
- Hielo
- Tina
- Ácido sulfámico
- Ácido homotropico
- Ácido sulfúrico
- Agitador SCILOGEX MX-S

Procedimiento

Colocar 1 ml de muestra en un tubos hach, colocarlos en baño de hielo, agregar 0.04 ml de ácido sulfámico al 2 % (reposar por 4 minutos, y agitación), agregar 0.4 ml de ácido homotropico (reposar por 3 minutos y agitación), agregar 2.56 ml de ácido sulfúrico concentrado (agitación y reposo por 45 minutos), aclimatar y leer a 410 nm.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez puesto en el sistema de tratamiento anaerobio en reactores tipo batch, se procedió al monitoreo que se hizo cada 24 horas y al procesamiento de los datos obtenidos de las técnicas establecidas, los siguientes cuadros y figuras muestran los resultados obtenidos.

Cuadro 1. Cinética del comportamiento de la DQO en un sistema batch anaerobio

Tiempo h	mg DQO/l		
	0	168	%ER
E + B + H ₂ O R-Doméstica - TA	364	110	70
E + P + B + H ₂ O R-Doméstica - TA	383	100	74
E + B + H ₂ O R-Doméstica - 35°C	343	130	62
E + P + B + H ₂ O R-Doméstica - 35°C	309	132	57

E= Espuma (poliuretano); B= Biopelícula; P= Polímero (polipirrol); R= Residual;
TA= Temperatura ambiente

En el cuadro 1 se puede apreciar que el comportamiento de la carga orgánica del agua residual doméstica (DQO inicial y final), a temperatura ambiente la biopelícula formada en la espuma recubierta con polipirrol supera un 4% a la biopelícula formada en la espuma sin recubrir, en cambio, a temperatura controlada de 35°C la biopelícula formada en la espuma recubierta con polipirrol es superada por 5% por la biopelícula de la espuma sin recubrir. Ambos tratamientos muestran un porcentaje de remoción de DQO entre 57-74 %. Estos resultados son similares a los obtenidos por Torres *et al* en el 2003 [35] quienes obtuvieron eficiencias de remoción de DQO de 70% usando cascara de coco como medio de soporte. Los resultados obtenidos a temperatura de 35°C son similares a los obtenidos por Ruiz *et al* en el 2002 [30] quienes obtuvieron eficiencias de depuración del 55-75% en la eliminación de DQO a temperaturas superiores a 20°C.

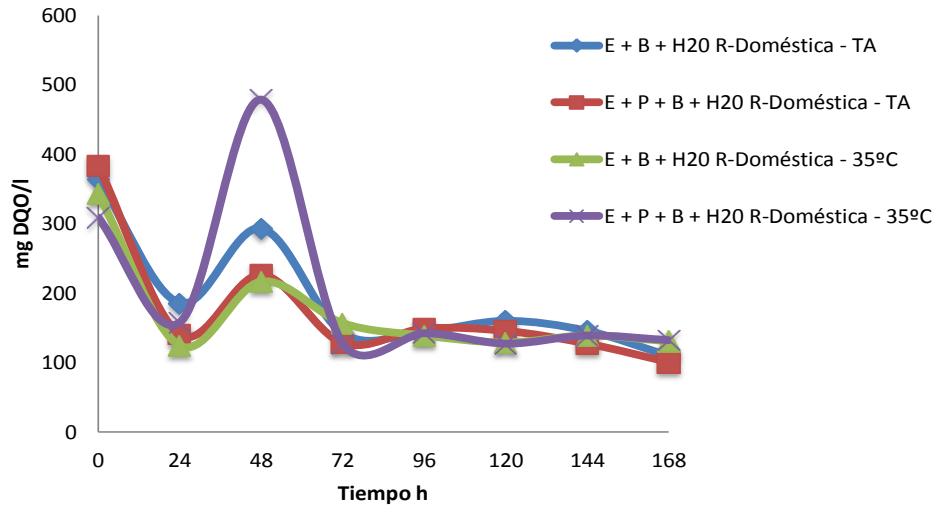


Figura 9. Cinética del comportamiento de la DQO en un sistema batch anaerobio, conteniendo espuma de poliuretano (E) como soporte; en uno de los casos la E se encuentra recubierta de polipirrol (P)

En la figura 9 se muestra la tendencia de la remoción de DQO de los tratamientos en cuestión, se observa un incremento muy drástico en el muestreo de 48 horas en comparación con los demás muestreos, la espuma recubierta con polipirrol a 35°C muestra un elevado nivel de mg de DQO/l a las 48 horas, la posible causa de tener ese aumento podría deberse a la presencia de partículas suspendidas coloidales (biomasa que se desprende del soporte), las cuales causan turbidez en el agua, y baja la eficacia del proceso.

Cuadro 2. Cinética del comportamiento de sulfatos en un sistema batch anaerobio

Tiempo h	mg SO ₄ ⁻² /l		%ER
	0	168	
E + B + H2O R-Doméstica - TA	162	147	9
E + P + B + H2O R-Doméstica - TA	161	164	-2
E + B + H2O R-Doméstica - 35°C	166	180	-8
E + P + B + H2O R-Doméstica -35°C	159	179	-13

E= Espuma (poliuretano); B= Biopelícula; P= Polímero (polipirrol); R= Residual;
TA= Temperatura ambiente

En el cuadro 2 se observa la concentración de los sulfatos inicial y final, además de la eficiencia de remoción de estos en los tratamientos, a temperatura ambiente la biopelícula formada en la espuma de poliuretano recubierta con polipirrol es superado un 11% por aquella biopelícula formada en la espuma de poliuretano sin recubrir; a temperatura controlada de 35°C ambos tratamientos no fueron eficientes ya que en vez de reducir los sulfatos hubo un incremento con respecto a los valores iniciales. Estos resultados son muy distintos a los encontrados por Martínez *et al* en el 2011 [16] quienes obtuvieron una reducción de sulfato de 11.5, 11.3, 4.8 g SO₄⁻² en sistemas Biofilm y Macerado anaerobia de lodos (BMAS), Biofilm formada por lodo anaeróbico macerada (B) y Macerado anaerobia de lodos (MAS) en agua residual sintética usando tallos secos de cactus para el crecimiento de la biopelícula.

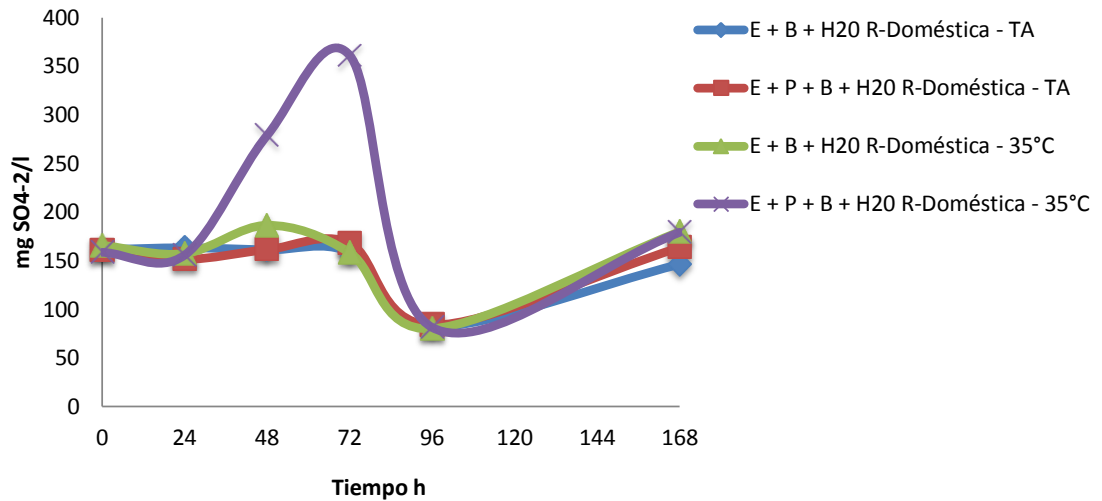


Figura 10. Cinética del comportamiento de sulfatos en un sistema batch anaerobio conteniendo espuma de poliuretano (E) como soporte; en uno de los casos la E se encuentra recubierta de polipirrol (P)

En la figura 10 se muestra el comportamiento de los sulfatos en un sistema batch anaerobio, se observa un incremento en el tratamiento donde se formó la biopelícula sobre la espuma de poliuretano recubierta con polipirrol a 35°C en los muestreos de 48 y 72 horas, esto pudiera deberse a que aún no hay un buen desarrollo de la biopelícula y las primeras 24 horas solo absorbe los sulfatos pero los libera los dos días siguientes.

En cuanto a la remoción de nitratos se analizaron las muestras de agua cruda antes de la puesta en marcha del experimento arrojando valores negativos una vez aplicando la fórmula para nitratos, lo que nos ratifica que el agua no contenía nitratos.

Con los resultados obtenidos en el monitoreo de cada 24 horas se obtuvo una baja remoción en los distintos parámetros evaluados por lo cual se decidió repetir el experimento dándole un rango mayor de tiempo entre muestreos el cual fue cada 48 horas, los resultados de la repetición del experimento se describen en los siguientes cuadros y figuras.

Cuadro 3. Cinética del comportamiento de la DQO en un sistema batch anaerobio

Tiempo h	mg DQO/l		% ER
	0	336	
E + B + H2O R-Doméstica - TA	330	86	74
E + P + B + H2O R-Doméstica - TA	359	86	76
E + B + H2O R-Doméstica - 35°C	345	73	79
E + P + B + H2O R-Doméstica - 35°C	509	52	90

E= Espuma (poliuretano); B= Biopelícula; P= Polímero (polipirrol); R= Residual;
TA= Temperatura ambiente

En el cuadro 3 se pueden observar que el comportamiento de la carga orgánica del agua residual doméstica (DQO inicial y final), a temperatura ambiente ambos tratamientos tuvieron un porcentaje de remoción similar siendo un 76% en la biopelícula formada en la espumarecubierta con polipirrol y de 74% en la biopelícula formada en la espuma sin recubrir. En los resultados obtenidos a temperatura controlada la biopelícula formada en la espuma recubierta con polipirrol muestra un porcentaje de remoción de 90% superando un 11% a la biopelícula formada en espuma sin recubrir. Los resultados obtenidos a temperatura ambiente son similares a los obtenidos por Mijaylova *et al* en el 2001[19] quienes obtuvieron una eficiencia de remoción de 78% de DQO usando un biofiltro con arena, y 82-90% usando carbón activado granular como medio de soporte. En los resultados obtenidos en la biopelícula formada en la espuma recubierta con polipirrol coinciden a los obtenidos por Rodríguez *et al* en el 2002 [29] quienes obtuvieron una eficiencia de remoción de la DQO superior al 80% en temperatura controlada de 38°C.

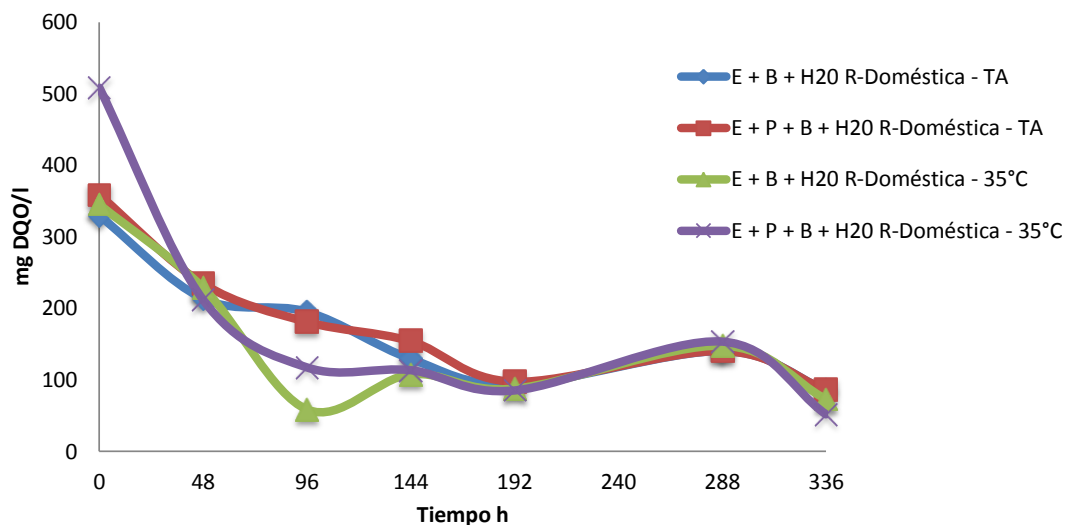


Figura 11. Cinética del comportamiento de la DQO en un sistema batch anaerobio conteniendo espuma de poliuretano (E) como soporte; en uno de los casos la E se encuentra recubierta de polipirrol (P)

En la figura 11 se observa que la remoción de DQO es eficiente ya que tiende a disminuir con el transcurso del tiempo, se observa que al inicio del experimento el tratamiento de la espuma de poliuretano recubierta con polipirrol a 35°C muestra un elevado contenido de DQO, pero al finalizar el experimento el mejor porcentaje de remoción lo obtiene el mismo tratamiento siendo de 90%.

Cuadro 4. Cinética del comportamiento de sulfatos en un sistema batch anaerobio

Tiempo h	mg SO ₄ ⁻² /l		%ER
	0	240	
E + B + H2O R-Doméstica - TA	128	0	100
E + P + B + H2O R-Doméstica - TA	106	0	100
E + B + H2O R-Doméstica - 35°C	172	4	98
E + P + B + H2O R-Doméstica - 35°C	233	34	85

E= Espuma (poliuretano); B= Biopelícula; P= Polímero (polipirrol); R= Residual; TA= Temperatura ambiente

En el cuadro 4 se puede observar el comportamiento de la remoción de sulfatos inicial y final, en un sistema batch anaerobio, a temperatura ambiente los dos tratamientos en cuestión obtienen excelentes resultados logrando una remoción del 100% en los 10 días que duró el experimento. A temperatura controlada de 35°C el mejor tratamiento fue el de la biopelícula formada en la espuma de sin recubrir, la cual logró una eficiencia de remoción de 98% superando un 13% a la biopelícula formada en la espuma recubierta con polipirrol. Estos resultados son similares a los obtenidos por Silva *et al* en el 2011 [32] quienes obtuvieron una remoción de sulfatos por encima del 90% utilizando como medio de soporte espuma de poliuretano y carbón de eucalipto respectivamente.

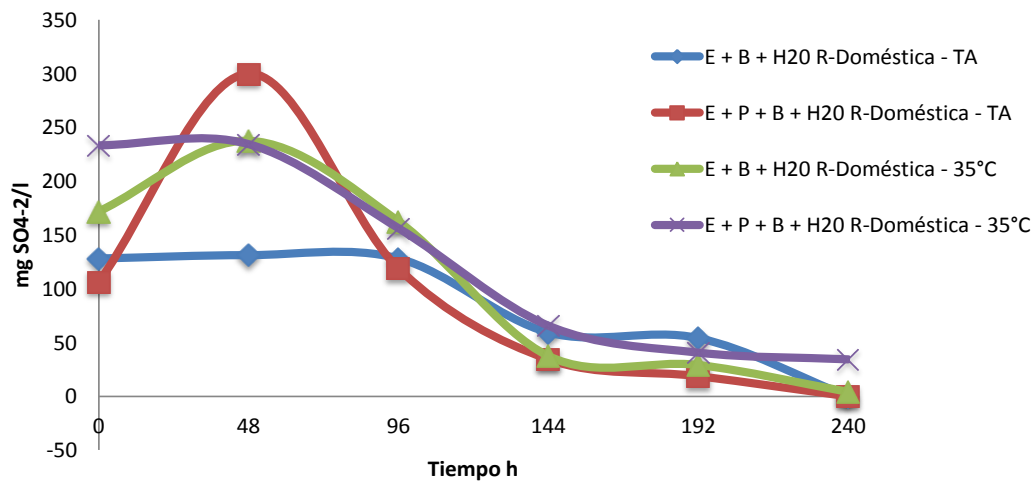


Figura 12. Cinética del comportamiento de sulfatos en un sistema batch anaerobio conteniendo espuma de poliuretano (E) como soporte; en uno de los casos la E se encuentra recubierta de polipirrol (P)

En la figura 12 se muestra el comportamiento de sulfatos en un sistema batch anaerobio, donde se observa que el tratamiento que obtuvo una remoción más baja es la espuma de poliuretano recubierta con polipirrol a 35°C.

Al inicio del experimento se analizó el agua para determinar el contenido de nitratos, pero se obtuvieron resultados muy bajos que una vez utilizando la fórmula para nitratos arrojaba resultados negativos.

Cuadro 5. Cinética del comportamiento del pH en un sistema batch anaerobio

Tiempo h	pH final
E + B + H2O R-Doméstica - TA	7.16
E + P + B + H2O R-Doméstica - TA	7.17
E + B + H2O R-Doméstica - 35°C	7.28
E + P + B + H2O R-Doméstica - 35°C	7.28

E= Espuma (poliuretano); B= Biopelícula; P= Polímero (polipirrol); R= Residual;
TA= Temperatura ambiente

El pH inicial de los sistemas fue de 8.52 y al finalizar se detectaron lecturas cercanas a un pH neutro. Esta disminución del pH puede deberse a que, al disminuir el metabolismo de la biopelícula cuando la temperatura es más baja, se favorece la acumulación de ácidos grasos volátiles (AGV), los cuales ocasionan que disminuya el pH (ver cuadro 5) [12]. Cuando la temperatura es más alta, la membrana citoplasmática incrementa la permeabilidad a protones, permitiendo que se dé un consumo superior de ATP, lo cual se ve reflejado en el incremento del metabolismo [8], el pH baja debido a la formación de AGV pero éstos son consumidos formando productos finales (gases).

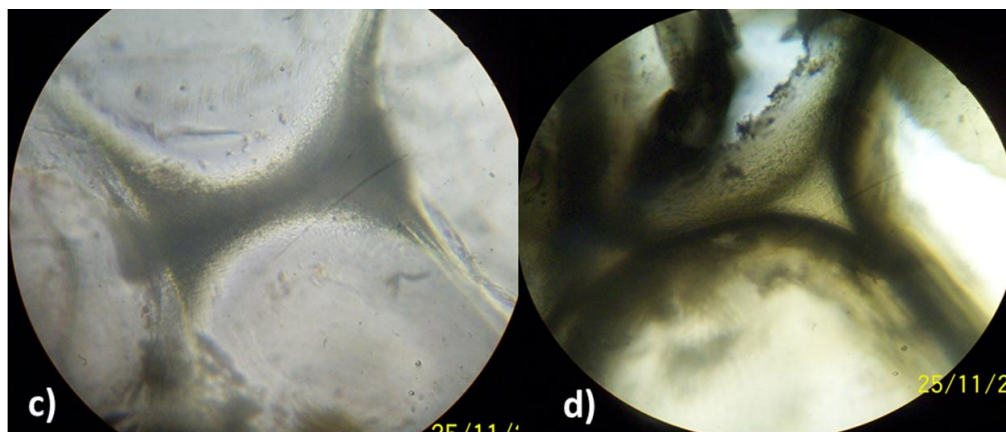


Figura 13. c) Espuma de poliuretano con biopelícula; d) Espuma de poliuretano recubierta con polipirrol con biopelícula vistas al microscopio 100x

En la figura 13 se observa la espuma de poliuretano con biopelícula c) y la espuma de poliuretano recubierta con polipirrol y con biopelícula d), para la toma de estas fotografías se hicieron cortes finos con una navaja simple al final del experimento y se observaron en un microscopio a 100x, se observa que en la espuma recubierta con polipirrol hay un mayor crecimiento de microorganismos formando la biopelícula ya que el polipirrol incrementa el área superficial, por lo tanto es mayor la cantidad de biomasa en el soporte.

V. CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos se concluye que el uso de espuma de poliuretano recubierta con polipirrol para la formación de biopelícula favorece la remoción de la DQO, debido a una mayor cantidad de microorganismos adheridos a este soporte, además hay una mejora en la remoción de DQO de 11% a una temperatura de 35°C, de igual forma la espuma recubierta con polipirrol a 35°C supera un 14% a la espuma recubierta con polipirrol a temperatura ambiente.

VI. GLOSARIO DE TÉRMINOS

Acidogénesis: Es un proceso microbiano anaerobio que genera ácidos orgánicos volátiles sin intervención de aceptores o donantes electrónicos externos.

Acetogénesis: Es el proceso a través del cual bacterias anaerobias producen acetato a partir de diversas fuentes de energía (por ejemplo, hidrógeno) y de carbono.

Biogás: Es un gas combustible que se genera en medios naturales o en dispositivos específicos, por las reacciones de biodegradación de la materia orgánica, mediante la acción de microorganismos y otros factores, en ausencia de oxígeno.

Copolímeros: Son polímeros compuestos por dos o más monómeros o unidades repetitivas distintas, que se pueden unir de diferentes formas por medio de enlaces químicos.

Composito: Es cualquier material constituido por más de un componente.

DQO (demanda química de oxígeno): Expresa la cantidad de oxígeno equivalente necesario para oxidar las sustancias presentes en las aguas residuales, mediante un agente químico fuertemente oxidante.

Hidrólisis: es una reacción química entre una molécula de agua y otra molécula, en la cual la molécula de agua se divide y sus átomos pasan a formar parte de otra especie química.

HDPE (polietileno de alta densidad): es un polímero resultado de la polimerización del etileno. Se produce normalmente con un peso molecular que se encuentra en el rango entre 200.000 y 500.000, pero puede ser mayor.

LDPC (polietileno de baja densidad): es un polímero de cadena ramificada, por lo que su densidad es más baja.

Metanogénesis: es un proceso metabólico microbiano en el cual se obtienen como producto metano.

NO₃ (nitratos): son sales o ésteres del ácido nítrico. Los nitratos son compuestos presentes en el medio ambiente de forma natural como

consecuencia del ciclo del nitrógeno, pero puede ser alterado por diversas actividades agrícolas e industriales.

NH_3 (amoníaco): es un compuesto químico cuya molécula consiste en un átomo de nitrógeno (N) y tres átomos de hidrógeno (H).

PVC (policloruro de vinilo): es el producto de la polimerización del monómero de cloruro de vinilo a policloruro de vinilo.

Polipirrol: compuesto químico que se forma por oxidación del monómero pirrol, mediante métodos químicos o electroquímicos.

pH (potencial hidrogeno): es una medida de acidez o alcalinidad de una disolución.

Espuma de poliuretano: es un material plástico poroso formado por una agregación de burbujas. Se forma básicamente por la reacción química de dos compuestos, un polioliol y un isocianato, aunque su formulación necesita y admite múltiples variantes y aditivos.

Poliestireno: es un polímero termoplástico que se obtiene de la polimerización del estireno.

Soporte: es algo, ya sea físico o simbólico, que sirve como sustento o puntal. Los soportes, por lo tanto, se utilizan para sostener o mantener una cosa.

SO_4 (sulfatos): son las sales o los ésteres del ácido sulfúrico. Contiene un átomo de azufre y cuatro átomos de oxígeno.

VII. BIBLIOGRAFÍA

1. Alvarado, A., A. 2011. Evaluación de materiales de desecho como medio filtrante en filtros anaerobios de flujo ascendente. Tesis de Licenciatura. Instituto Tecnológico de Costa Rica. pp. 71.
2. Besel, S., A. 2007. Biomasa-Digestores anaerobios. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. 1(1): 27-28.
3. Buswell, C., Herlihy, Y., M., Lawrence, L., M., James, T., M., Marsh, P., D., Keevil, C., W., L, each S., A. 1998. Extended survival and persistence of *Campylobacter spp.* in water and aquatic biofilms and their detection. *Applied and Environmental Microbiology*. 64(2): 733–741.
4. Camargo, S., A., R., Nour, E., A., A. 2001. Bamboo as an anaerobic medium: effect of filter column height. *Water Science and Technology*. 44(4), 63-70.
5. Costerton, J., W., Stewart, P., S., Greenberg, E., P. 1999. Bacterial biofilms: A common cause of persistent infections. *Science*, 284(5418):1318-22.
6. Chen, J., J., McCarty, D., Slack, D., Rundle, H. 2000. Full scale studies of a simplified aerated filter (BAF) for organics and nitrogen removal. *Water Science and Technology*. 41(4-5)1-4.
7. Fannin, K., F. 1987. Start-up, operation, stability, and control. En *Anaerobic digestion of biomass*. Editado por Chynoweth, D., Y., Isaacson, R. Elsevier Applied Science Ltd. Amsterdam, Holanda. pp. 171-196
8. Galazzo J, Bailey J. 1990. Growing *Saccharomyces cerevisiae* in calcium-alginate beads induces cell alterations, which accelerate glucose conversion to ethanol. *Biotechnology & Bioengineering*. 36: 417–426.
9. Kugelman, I., J., Chin, K., K. 1971. Toxicity, synergism, and antagonism in anaerobic waste treatment processes. *Advances in Chemistry Series*. vol. 105. 55-90.

10. Lay, J., J., Li, Y., Y., Noike, T. 1997. Influences of pH and moisture content on the methane production in high-solids sludge digestion. *Water research*. 31(10):1518-1524.
11. Lazarova, V., Manem, J. 2000. Innovative biofilm treatment technologies for water and wastewater treatment. In *Biofilms II: Process analysis and applications*. Edited by James D. Bryers. Wiley series in ecological and applied microbiology, 159-206.
12. Leitao, R., C., van Haandel, A., C., Zeeman, G., Lettinga, G. 2006 "The effects of operational and environmental variations on anaerobic wastewater treatment systems: A review", *Bioresource Technology*, Vol. 97, p. 1105 – 1118,.
13. Lewandowski, Z., Webb, D., Hamilton, M., Harkin, G. 1999. Quantifying biofilm structure. *Water Science and Technology*. 39, 71-76.
14. May, E., F., Ríos, G., L., J., Garza, G., Y., Rodríguez, M., J. 2008. Performance of a packed reactor with *Opuntia imbricata* for municipal wastewater treatment. *Environmental Research Journal*, 2(5), 238-245.
15. Madigan, M., Mertinko, J., Parker, J. 1997 *Biology of Microorganisms*. Prentice Hall. New Jersey. USA.
16. Martínez, A., S., Y., Garza, G., Y., Rodríguez, de la G., J., A., Rodríguez, M., J. 2011. Nitrate Reduction, Sulfate Reduction and Methanogenesis Interrelation in Fixed and Suspended Bed Batch Reactors. *Current Research Journal of Biological Sciences* 3(6): 591-596
17. Metcalf and Eddy. 2003. *Wastewater engineering: Treatment and reuse*. New York. McGraw-Hill. 1819 pp.
18. Miguel, P., O., Gonzáles, B., O., Gonzáles, M., S. 2006. Estructura de películas biológicas en tratamientos de aguas residuales. *Ingeniería ambiental*. Proyecto 7.2.8. Tratamiento de aguas en zonas industriales, urbanas y rurales. 172.
19. Mijaylova, N., P., Morales, G., F., Ramírez, C., E. 2001. *Biofiltración anaerobia de efluentes químico-farmacéuticos*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

20. Nicolella, C., van, L., M, C., M., Heijnen, S., J. 2000. Wastewater treatment with particulate biofilm reactors. *Journal of biotechnology*80: 1-33.
21. Noone, G., P. 1990. The treatment of domestic wasted. En anaerobic digestion: a waste treatment technology. Editadopor Wheatley, A Critical reports on Applied Chremistry. 31:139-170.
22. Norma Mexicana NMX-AA-030-SCFI-2001 Análisis de agua – Determinación de la Demanda Química de Oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – Método de prueba (Cancela a la NMX-AA-030-1981) Secretaría de Economía.
23. Norma Mexicana NMX-AA-008-SCFI-2011 Análisis de agua – Determinación del pH-método de prueba (Cancela a la NMX-AA-008-SCFI-2000) Secretaría de Economía. México
24. Norma Mexicana NMX-AA-074-1981 Análisis de agua – Determinación de ion sulfato. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. México.
25. Norma Mexicana NMX-AA-079-SCFI-2001 Análisis de aguas - Determinación de Nitratos en Aguas Naturales, Potables, Residuales y Residuales Tratadas - Método de prueba (Cancela a la NMX-AA-079-1986) Secretaria de Economía.
26. Ovando, M., V., M., Paola E. Díaz, F., P., E., Martínez, G., H., Moreno, R., L., A., Antonio, C., I., D., Hernandez, O., M. 2013. Composite of Cellulosic Agricultural Waste Coated with.SemiconductingPolypyrrole as Potential Dye Remover. *Polymercomposites*
27. Phillips, P., L., Wolcott, R., D., Fletcher, J., Schutz, G., S. 2010. Biofilms made easy. *Wounds International*. Vol.1 Tercera edition.
28. Rodríguez, F., A., A., Letón, G., P., Rosal, G., R., Dorado, V., M., Villar, F., S., Sanz, G., J., M. 2006. Informe de vigilancia tecnológica. Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales.
29. Rodríguez, J., Gerardo J, S., Garza, Y. 2002. Bioconversión anaerobia como una alternativa para la remoción de DQO contenido en aguas residuales del rastro municipal de la ciudad de Saltillo, Coahuila, México. *Revista de la Sociedad Química de México*. 46(2)185-188

30. Ruiz, I., Álvarez, J., A., Soto, M. 2002. El potencial de la digestión anaerobia en el tratamiento de aguas residuales urbanas y efluentes de baja carga orgánica. Universidade da Coruña. Facultade de Ciencias. Campus da Zapateira s/n, 15071 A Coruña
31. Sánchez, M., R. A. 2011. Tratamiento de agua residual municipal en reactores con Biopelículas aerobias. *Cienciacierto* N. 26.
32. Silva, A., J., Domingues, M., R., Hirasawa, J., S., Varesche, M., B., Foresti, E., Zaiat, M. 2011. Kinetic modeling and microbial assessment by fluorescent in situ hybridization in anaerobic sequencing batch biofilm reactors treating sulfate-rich wastewater. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. Vol. 28, No. 02, pp. 209 – 219
33. Solano, M., J., K., Rangel, U., M., P. 2006. Evaluación operacional de un sistema a escala laboratorio de Biopelícula anaerobia soportada para el tratamiento de aguas residuales domésticas. Tesis de licenciatura. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingeniería Físico Químicas. pp. 66.
34. Speece, R., E. 1985. Environmental requirements for anaerobic digestion of biomass. *Advances in solar energy* pp. 51-123.
35. Torres, P., Rodríguez, J., A., Uribe, I., E. 2003. Tratamiento de aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca en filtro anaerobio: influencia del medio de soporte. *Scientia et Technica*. 10(23):75-80
36. Troschinetz, A., Mihelcic, J. 2009. Sustainable recycling of municipal solid waste in developing countries. *Waste Management*. 29(2):915-923.
37. Urrutia, I., Serra, J., Llama, M. 1995. Nitrate removal from water by *Scenedesmusobliquus* immobilizes in polymeric foams. *Enzyme Microbiology Technology*. 17(3): 200–205.
38. van Haandel, A., Lettinga, G. 1994 *Tratamento Anaeróbico de Esgotos*. Editora EPGRAF. Campina Grande, Brasil.
39. Van Houten, R., T., Van Aelts, A., C., Letinga, G. 1995. Aggregation of sulphate-reducing bacteria and homo-acetogenic bacteria in lab-scale gas-lift Reactors. *Water Science and Technology*. 32(8):85-90.

40. Van Dun, M., Elmitwalli, T., A., Bruning, H., Zeeman G., Lettinga G. 2000. The role of filter media in removing suspended and colloidal particles in an anaerobic reactor treating domestic sewage. *Bioresource Technology* 72(3):235-242.
41. Villegas, G., J., D., Guerrero, E., J., Castaño, R., J.M., Paredes, C., D. 2006. Septic Tank (ST)-Up Flow Anaerobic Filter (UFAF)-Subsurface Flow Constructed Wetland (SSF-CW) systems aimed at wastewater treatment in small localities in Colombia. *Rev. Tec. Ing. Univ. Zulia*. 29(3)
42. Zeeman, G., Lettinga, G., Sklyar, V., Elmitwalli A.,T. 2001. Low temperature pre-treatment of domestic sewage in an anaerobic hybrid or an anaerobic filter reactor. *Bioresource Technology* 82(2002):233-239.