

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



EVALUACIÓN DE BIOFILTROS EMPACADOS CON COMPÓSITOS  
OBTENIDOS POR PLASMA-POLIMERIZACIÓN EN EL TRATAMIENTO DE  
AGUA RESIDUAL MUNICIPAL

Tesis

Que presenta José Ángel Gutiérrez Ramírez  
como requisito parcial para obtener el Diploma como ESPECIALISTA EN  
MANEJO SUSTENTABLE DE RECURSOS NATURALES DE ZONAS ÁRIDAS  
Y SEMIÁRIDAS

Saltillo, Coahuila

Agosto 2018


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO




EVALUACIÓN DE BIOFILTROS EMPACADOS CON COMPÓSITOS  
OBTENIDOS POR PLASMA-POLIMERIZACIÓN EN EL TRATAMIENTO DE  
AGUA RESIDUAL MUNICIPAL

**Tesis**

Que presenta José Ángel Gutiérrez Ramírez  
como requisito parcial para obtener el Diploma como ESPECIALISTA EN  
MANEJO SUSTENTABLE DE RECURSOS NATURALES DE ZONAS ÁRIDAS  
Y SEMIÁRIDAS

  
\_\_\_\_\_  
Dra. Silvia Yudith Martínez Amador  
Director (UAAAN)

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Víctor Manuel Ovando Medina  
Director Externo

Saltillo, Coahuila

Agosto 2018

EVALUACIÓN DE BIOFILTROS EMPACADOS CON COMPÓSITOS  
OBTENIDOS POR PLASMA-POLIMERIZACIÓN EN EL TRATAMIENTO DE  
AGUA RESIDUAL MUNICIPAL

**Tesis**

Elaborada por José Ángel Gutiérrez Ramírez como requisito parcial para obtener el diploma como Especialista en Manejo Sustentable de Recursos Naturales de Zonas Áridas y Semiáridas con la supervisión y aprobación del Comité de Asesoría



---

Dra. Silvia Yudith Martínez Amador  
Asesor Principal




---

Dr. Luis Samaniego Moreno  
Asesor




---

Dra. Rosa María Garza Quiñones  
Asesor



---

Dr. Víctor Manuel Ovando Medina  
Asesor Externo



---

Dra. Rosalinda Mendoza Villarreal  
Subdirectora de Postgrado  
UAAAN

## **Agradecimientos**

*Primeramente doy gracias a Dios por haberme permitido vivir hasta este día, haberme guiado a lo largo de mi vida, por haberme dado la fortaleza para seguir adelante en aquellos momentos de debilidad.*

### **A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro**

*A esta Honorable Institución que me dio la oportunidad para realizar mis estudios de especialidad y adquirir nuevos conocimientos que me servirán para enfrentarme a nuevos retos en un futuro.*

*Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (**CONACYT**), por extender la beca con la cual me fue posible llevar a cabo los estudios de posgrado.*

*A la **Dra. Silvia Yudith Martínez Amador**, que gracias al apoyo otorgado y la confianza pude realizar este trabajo de Tesis.*

*Al **Dr. Víctor Manuel Ovando Medina**, investigador de la Coordinación Académica Región altiplano COARA-UASLP, por haberme dado la oportunidad de realizar una estancia de investigación y por el apoyo brindado para llevar a cabo las actividades necesarias para alcanzar el objetivo de esta investigación.*

*Al **Dr. Luis Samaniego Moreno** por sus comentarios y observaciones que ayudaron a mejorar la calidad de este trabajo y por formar parte de mi comité de asesoría.*

*A la **Dra. Rosa María Garza Quiñones** por sus comentarios y observaciones que ayudaron a mejorar la calidad de este trabajo y por formar parte de mi comité de asesoría.*

*A la **Dra. María Guadalupe Neira Velázquez** investigador del Centro de Investigación en Química Aplicada CIQA, por haberme dado la oportunidad de realizar una estancia de investigación y por el apoyo brindado para llevar a cabo las actividades necesarias para alcanzar el objetivo de esta estancia.*

*Al **Dr. José Antonio Rodríguez de la Garza**, por haberme permitido realizar una estancia en la Universidad Autónoma de Coahuila.*

## Índice General

	Pág.
Agradecimientos.....	iv
Lista de cuadros.....	viii
Lista de figuras.....	ix
Resumen.....	x
Abstract.....	xii
INTRODUCCIÓN.....	1
Objetivo general.....	2
Objetivos específicos.....	2
Hipótesis.....	2
REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
GENERALIDADES.....	3
COMPOSICION DE AGUAS RESIDUALES.....	3
AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES.....	3
DIGESTIÓN ANAEROBIA.....	4
Etapas de la digestión anaerobia.....	4
Hidrólisis o licuefacción.....	4
Acidogénesis.....	4
Acetogénesis.....	5
Metanogénesis.....	5
TECNOLOGÍA DE LOS PROCESOS ANAEROBIOS.....	5
Procesos anaerobios.....	5
TIPOS DE REACTORES ANAEROBIOS.....	6
Reactores de biomasa adherida.....	6
Reactores de biomasa en suspensión.....	7
Reactores anaerobios de película fija.....	7
FILTRO ANAEROBIO.....	7
POLÍMEROS.....	8
ESPUMA DE POLIURETANO.....	8
POLIPIRROL.....	8

POLIANILINA.....	9
BIOPELÍCULA.....	10
Características de la biopelícula.....	11
Formación de la biopelícula.....	11
FASES DE FORMACIÓN DE UNA BIOPELÍCULA.....	12
Adhesión reversible a la superficie.....	12
Adhesión irreversible a la superficie.....	12
Sustancia protectora viscosa.....	12
Dispersión.....	13
CICLO DE VIDA DE LAS BIOPELÍCULAS.....	13
HISTORIA DE LA TECNOLOGÍA DE PLASMA.....	14
Plasma.....	14
Polimerización por plasma.....	14
Generación de un plasma.....	15
Tipos de plasma.....	16
Efectos superficiales del tratamiento con plasma.....	17
Beneficios del uso de plasma en tratamientos de superficies.....	17
MATERIALES Y MÉTODOS.....	18
Ubicación del experimento.....	18
Procedimiento polimerización por plasma.....	18
Tratamiento No.1.....	19
Tratamiento No.2.....	20
Descripción de los reactores de tratamiento de agua residual en flujo continuo.....	21
Formación de biopelícula y arranque de reactores.....	21
Variables monitoreadas.....	23
Determinación de la demanda química de oxígeno.....	23
Determinación de pH.....	24
Determinación de Sulfatos.....	25
Determinación de Nitratos.....	27
Determinación de Sólidos Totales.....	28

RESULTADOS Y DISCUSION.....	29
CONCLUSIONES.....	38
REFERENCIAS.....	39
Abreviaturas.....	45

## Lista de Cuadros

	<b>Pág.</b>
Cuadro 1. Porcentajes de remoción de la demanda química de oxígeno en la evaluación de diferentes soportes polimerizados por plasma.....	30
Cuadro 2. Comparación de la DQO de dos biofiltros anaerobio alimentados en flujo continuo.....	30
Cuadro 3. Porcentajes de la remoción de sólidos totales en la evaluación de diferentes soportes polimerizados por plasma.....	32
Cuadro 4. Comparación de sólidos totales de dos biofiltros anaerobio alimentados en flujo continuo.....	34
Cuadro 5. Comportamiento del pH de dos biofiltros anaerobio alimentados en flujo continuo.....	35
Cuadro 6. Comportamiento de la temperatura de dos biofiltros anaerobio alimentados en flujo continuo.....	36



## Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Posibles estructuras químicas del polipirrol.....	9
Figura 2. Posibles estructuras químicas de la polianilina.....	10
Figura 3. Representación esquemática de la biopelícula microbiana en formación.....	13
Figura 4. Reactor de plasma en funcionamiento.....	18
Figura 5. Espuma de poliuretano recubierta con polipirrol y polianilina mediante plasma.....	19
Figura 6. Espuma de poliuretano recubierta con polipirrol mediante plasma.....	20
Figura 7. Filtro anaerobio utilizado.....	21
Figura 8. Arranque del filtro anaerobio.....	22
Figura 9. Comportamiento de la DQO en dos biofiltros anaerobio alimentados en flujo continuo a un TRH de 54 horas.....	31
Figura 10. Agua obtenida por los dos biofiltros.....	33
Figura 11. Comportamiento de sólidos totales en dos biofiltros anaerobio alimentados en flujo continuo a un TRH de 54 horas.....	34
Figura 12. Análisis termogravimétrico (TGA) de las esponjas utilizadas.	37

## **Resumen**

**EVALUACIÓN DE BIOFILTROS EMPACADOS CON COMPÓSITOS  
OBTENIDOS POR PLASMA-POLIMERIZACIÓN EN EL TRATAMIENTO DE  
AGUA RESIDUAL MUNICIPAL**

**POR**

**JOSÉ ÁNGEL GUTIÉRREZ RAMÍREZ  
ESPECIALIDAD EN MANEJO SUSTENTABLE DE RECURSOS NATURALES  
DE ZONAS ÁRIDAS Y SEMIÁRIDAS**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO**

**DRA. SILVIA YUDITH MARTÍNEZ AMADOR – ASESOR**

**Saltillo, Coahuila**

**Agosto 2018**

## Resumen

Se realizó un experimento previo de 5 diferentes compositos en reactores batch de 540 mililitros, se observó que el composito que presentó mayor eficiencia en la remoción de la DQO fue PU-PPy-PANi a 50 watts por 30 minutos en plasma de aire con 61% de eficiencia, por lo que se decidió realizarlo a mayor escala y en flujo continuo. En este trabajo se evaluó la eficiencia de biofiltros empacados con espuma de poliuretano recubierta con polipirrol y polianilina y espuma de poliuretano recubierta con polipirrol como material de soporte sintetizadas por plasma polimerización en reactores anaerobios de flujo continuo. La experimentación se realizó en el Laboratorio de Biotecnología perteneciente al Departamento de Botánica de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Se establecieron dos tratamientos; T1 espuma de poliuretano + polipirrol + polianilina, T2 espuma de poliuretano + polipirrol. Se utilizó agua residual municipal que proporcionó la Planta de Tratamiento Bosque Urbano Ejército Mexicano, se estableció un tiempo de residencia hidráulica de 54 horas y la toma de muestras se realizó cada 24 horas. Las variables evaluadas fueron, DQO, Nitratos Sulfatos, Potencial de Hidrógeno, Temperatura y Sólidos Totales. Los biofiltros se estuvieron monitoreando durante 15 días, se logró un 73.7% de eficiencia de remoción de la DQO cuando la espuma de poliuretano estaba polimerizada con polipirrol y polianilina superando un 10% cuando la espuma de poliuretano sólo se polimerizó con polipirrol. Con respecto a los Sólidos Totales se obtuvieron mejores resultados en el tratamiento 2, superando un 9% al tratamiento 1.

**Palabras clave:** Biofiltros, Compositos, Plasma Polimerización, Polipirrol, Polianilina, Agua Residual.

**Abstract**

EVALUATION OF BIOFILTERS PACKED WITH COMPOSITES OBTAINED BY  
PLASMA-POLYMERIZATION IN THE TREATMENT OF MUNICIPAL  
WASTEWATER

**BY**

JOSÉ ÁNGEL GUTIÉRREZ RAMÍREZ  
SPECIALTY IN SUSTAINABLE MANAGEMENT OF NATURAL RESOURCES  
OF ARID AND SEMI-ARID ZONES

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
DRA. SILVIA YUDITH MARTÍNEZ AMADOR - ADVISER

Saltillo, Coahuila

August 2018

## Abstract

A previous experiment of 5 different composites in batch reactors of 540 milliliters was carried out, it was observed that the composite that presented the highest efficiency in the removal of the COD was PU-PPy-PANI at 50 watts for 30 minutes in plasma of air with 61% of efficiency, therefore it was decided to make it at bigger scale and in continuous flow. In this work, we evaluated the efficiency of packed biofilters with polyurethane foam coated with polypyrrole and polyaniline, and polyurethane foam coated with polypyrrole as supports synthesized by plasma polymerization in anaerobic continuous flow reactors. The experimentation was carried out in the Biotechnology Laboratory belonging to the Department of Botany of the Antonio Narro Autonomous Agrarian University. Two treatments were established; T1 polyurethane foam + polypyrrole + polyaniline, T2 polyurethane foam + polypyrrole. Municipal wastewater was used, which was provided by the Treatment Plant “Ejército Mexicano” at Saltillo, Coahuila. A hydraulic residence time of 54 hours was established with sampling every 24 hours. The evaluated variables were: COD, Sulfate Nitrates, Hydrogen Potential, Temperature and Total Solids. The biofilters were monitored for 15 days, achieving a 73.7% removal efficiency of the COD when the polyurethane foam was polymerized with polypyrrole and polyaniline exceeding 10% when the polyurethane foam was only polymerized with polypyrrole. With respect to Total Solids, better results were obtained in treatment 2, exceeding 9% to treatment 1.

**Keywords:** Biofilters, Composites, Plasma Polymerization, Polypyrrole, Polyaniline, Residual Water.

## INTRODUCCIÓN

Los procesos de tratamiento anaerobios de aguas residuales se clasifican en dos tipos de acuerdo a si la biomasa este libre o adherida a un soporte físico. Al respecto la biomasa que se adhiere a un soporte físico ya sea de origen natural o sintético se denomina película biológica o biopelícula. Existen varios criterios de clasificación de los reactores de biopelícula, por ejemplo, según el tipo de soporte (soporte fijo, giratorio o móvil) o su combinación con lodos activados denominados reactores híbridos o conocidos como reactores de biopelícula puros (Tejero *et al.*, 2012).

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 (Sánchez, 2011).

En la actualidad existe un gran interés para producir polímeros conjugados semiconductores como politiofileno, polipirrol, polianilina y poliacetileno. La conjugación de enlaces dobles y sencillos promueve el movimiento de cargas eléctricas en materiales amorfos o poco estructurados como son los polímeros. Los polímeros conjugados semiconductores pueden tener múltiples aplicaciones tecnológicas, como en sensores químicos y ópticos, baterías recargables, producción de películas delgadas, recubrimiento de superficies, diodos emisores de luz, capaz para evitar la corrosión (Morales *et al.*, 2000).

Las técnicas más comunes para sintetizar estos polímeros son procesos químicos y electroquímicos. Una alternativa diferente y muy viable es a través de la técnica de polimerización por plasma que a diferencia de las polimerizaciones

convencionales en fase líquida, se lleva a cabo en fase gaseosa y a baja presión donde sólo intervienen el monómero y las partículas energéticas producidas en el plasma, sin la adición de iniciadores de la polimerización o solventes que intervengan en la reacción (Morales *et al.*, 2000).

### **Objetivo general**

Determinar la eficiencia de biofiltros empacados con compósitos a base de PU-PPy-PANi obtenidos por plasma-polimerización en el tratamiento de agua residual municipal.

### **Objetivos específicos**

- Evaluar el desempeño de biofiltros batch empacados con diferentes compositos sintetizados por plasma.
- Evaluar el desempeño del biofiltro empacado con el composito más eficiente en reactores de flujo continuo.

### **Hipótesis**

La tecnología de polimerización por plasma mejorará la capacidad adhesiva de las moléculas de la espuma de poliuretano con el pirrol y la anilina, consecuentemente uno de los compositos evaluados promoverá la remoción de materia orgánica debido a un aumento en la afinidad entre los microorganismos y el composito.

## REVISION DE LITERATURA

### GENERALIDADES

Uno de los recursos más valiosos con los que cuenta el ser humano es el agua y ésta sin duda alguna constituye un elemento esencial para la vida en el planeta. Actualmente, la administración racional del agua ha alcanzado una importancia de dimensión mundial; sin embargo, este recurso cada vez es más escaso, ya que tanto en las ciudades como en las comunidades rurales se consumen grandes cantidades de agua potable y sólo una poca cantidad de agua residual es tratada. La protección de la salud pública es el propósito fundamental del tratamiento de residuos tanto sólidos como líquidos y le sigue en orden de importancia la protección del ambiente. Por tanto, es responsabilidad de los ingenieros proyectistas, investigadores y gestores públicos involucrados, asegurar que los sistemas de tratamiento logren esta meta (Gijzen, 2001).

### COMPOSICION DE AGUAS RESIDUALES

Conforme a la Ley de Aguas Nacionales (LAN), se define a las aguas residuales como las aguas de composición variada provenientes de las descargas de uso público urbano, doméstico, industrial, comercial, de servicios, agrícola, pecuario, de las plantas de tratamiento, y en general de cualquier uso, así como la mezcla de ellas (Riveros, 2013).

### AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES

Las aguas residuales municipales son aquellas procedentes de zonas residenciales, instalaciones públicas o de recreo e instalaciones comerciales o similares. El agua residual municipal fresca y recién generada presenta un color gris y olor a queroseno, pero al pasar el tiempo de ser generada se vuelve séptica y pestífera con un olor a sulfhídrico y un característico color negro (Riveros, 2013).



## DIGESTIÓN ANAEROBIA

La digestión anaerobia es una práctica de tratamiento de residuos atractivo en el que se pueden lograr tanto el control de la contaminación y la recuperación de energía (Chen *et al.*, 2007), 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 (Kelleher *et al.*, 2001). La digestión anaerobia es un proceso biológico en el que la materia orgánica, en ausencia de oxígeno y mediante la acción de un grupo de bacterias específicas, se descomponen en productos gaseosos o biogás (CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S), y en digestato, que es una mezcla de productos minerales (N, P, K, Ca, etc.) y compuestos de difícil degradación (Besel, 2007).

### Etapas de la digestión anaerobia

El proceso de degradación anaerobia se lleva a cabo en ausencia de oxígeno. Un gran número de microorganismos que trabajan en serie o en serie-paralelo, degradan la materia orgánica en sucesivas etapas. El mecanismo de digestión anaerobia se divide en cuatro etapas: definidos por Lorenzo *et al.*, (2005).

### Hidrólisis o licuefacción

En esta etapa los compuestos orgánicos son solubilizados por enzimas excretadas por bacterias hidrolíticas que actúan en el exterior celular por lo que se consideran exoenzimas. La hidrólisis es, por tanto, la conversión de los polímeros en sus respectivos monómeros.

### Acidogénesis

En esta etapa los compuestos orgánicos solubles que comprenden los productos de la hidrólisis son convertidos en ácidos orgánicos tales como acético, propiónico y butírico.

### Acetogénesis

Se le conoce también como acidogénesis intermediaria en la cual los productos correspondientes son convertidos en ácido acético, hidrógeno y CO<sub>2</sub>. 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).

### Metanogénesis

En esta etapa metabólica el CH<sub>4</sub> es producido a partir del ácido acético o de mezclas de H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>, pudiendo formarse también a partir de otros sustratos tales como ácido fórmico y metanol.

## TECNOLOGÍA DE LOS PROCESOS ANAEROBIOS

En las últimas décadas se han desarrollado reactores anaerobios de elevada capacidad de eliminación, que permiten aprovechar las principales ventajas de la fermentación anaerobia: coste energético bajo y baja producción de lodos en exceso (que además se encuentran ya parcialmente estabilizados). En muchas ocasiones estos sistemas no pueden producir efluentes con calidad suficiente para el vertido directo, requiriendo de su combinación con sistemas aerobios de afino (Espinosa, 2011).

### Procesos anaerobios

Son los procesos de tratamiento biológico que solo se dan en ausencia de oxígeno. Es un mecanismo de degradación de biomasa por el cual las moléculas orgánicas complejas son descompuestas en sus componentes energéticos individuales de forma espontánea (sin adición de energía) por la acción de microorganismos (Díaz *et al.*, 2002).

## TIPOS DE REACTORES ANAEROBIOS

Los reactores biológicos utilizados para el tratamiento de aguas residuales pueden dividirse en dos grandes grupos con base en el tipo de crecimiento bacteriano:

- 1.- De lecho fijo formando biopelículas
- 2.- De crecimiento libre o suspendido

En los primeros la biomasa está constituida por bacterias formando una película sobre un soporte inerte, mientras que los segundos dependen de que los microorganismos formen gránulos o flóculos en el reactor. Las bacterias que crecen en suspensión deben de formar estructuras que las permitan permanecer en el reactor y no ser lavadas con el efluente y la eficiencia del proceso depende en buena parte de la capacidad del inóculo (lodos/residuos) para formarlas (Márquez *et al.*, 2011).

### Reactores de biomasa adherida

En este tipo de reactores, la biomasa se retiene en forma de película biológica, adherida a un soporte inerte que puede ser móvil o fijo (Espinosa, 2011). En los reactores con biomasa adherida (biopelículas) los microorganismos crecen adheridos a un material inerte, ya sea sintético (como materiales plásticos, espumas, cerámicas, entre otros) o natural (principalmente rocas, carbón, basalto, entre otros). En este tipo de reactores las bacterias se adhieren a la superficie del material mediante la producción de sustancias poliméricas extracelulares (SPE) que actúan como pegamento y permiten el crecimiento de la biopelícula. Estos sistemas han demostrado su eficiencia y flexibilidad en el tratamiento de aguas residuales con carga orgánica alta debido a que se caracterizan por presentar una mayor concentración de biomasa en el reactor; actividad metabólica elevada atribuida a la alta concentración de nutrientes adheridos a la biopelícula y a las diferentes interacciones entre especies microbianas (Nava *et al.*, 2013).

### Reactores de biomasa en suspensión

En los reactores con biomasa en suspensión los microorganismos se asocian en flóculos, los cuales están suspendidos en el líquido gracias al mezclado. Los flóculos presentan un área superficial alta, que permite una buena penetración de nutrientes y oxígeno. Al final del proceso, se utiliza un tanque sedimentador para separar los microorganismos de la fase líquida y recircular una parte de la biomasa. Un claro ejemplo de este tipo de reactores es el conocido sistema de lodos activados (Nava *et al.*, 2013).

### Reactores anaerobios de película fija

La finalidad de retener en el reactor, durante el mayor tiempo posible, las células bacterianas, como en el caso del filtro anaerobio, llevó a desarrollar reactores en los que para que se diera la retención de biomasa, se les proporciona un medio de soporte en el que las bacterias se fijan, desarrollándose grandes colonias de ellas sobre la superficie del material de soporte.

Con los modelos de digestores de película fija el tiempo de retención de sólidos resulta muy prolongado, lo que favorece el proceso al tener una concentración de biomasa más elevada. Los reactores de película fija se han desarrollado, casi siempre para operar con flujo ascendente; en ellos el agua de desecho simplemente fluye a lo largo del tanque de reacción y el contacto de ella con las células bacterianas provoca las reacciones de degradación del material orgánico (Mejía, 1996).

### FILTRO ANAEROBIO

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 (Rodríguez *et al.*, 2006; Solano *et al.*, 2006).

## POLÍMEROS

Los polímeros son macromoléculas formadas por la unión repetida de varias moléculas unidas por enlaces covalentes. El término macromolécula significa molécula muy grande. Dependiendo de su origen, los polímeros pueden ser naturales o sintéticos. Los sintéticos contienen normalmente entre uno y tres diferentes tipos de unidades que se repiten, mientras que los naturales o biopolímeros (como la celulosa, el ADN o las proteínas) presentan estructuras mucho más complejas (Beltrán *et al.*, 2012). Las moléculas que se combinan para formar los polímeros se denominan monómeros y las reacciones a través de las cuales éstos se obtienen se conocen como reacciones de polimerización.

## ESPUMA DE POLIURETANO

La espuma de poliuretano es un material plástico poroso formado por una agregación de burbujas, conocido también por los nombres coloquiales de goma-espuma, goma-pluma, esponja, hule espuma.

Sistema de espuma de poliuretano: un material aislante formado por polioli e isocianato, que mediante reacción química entre ellos dan lugar a la espuma de poliuretano. Dicha reacción libera dióxido de carbono y gas que va formando las burbujas. El poliuretano al igual que el polivinil, son materiales ampliamente usados en la inmovilización de microorganismos gracias a su resistencia a condiciones ambientales diferentes (Cesvi, 2008).

## POLIPIRROL

Es un material polimérico cuyas moléculas son capaces de conducir la electricidad, la conductividad es una propiedad intrínseca del material, los polímeros conductores poseen una distribución de dobles enlaces C=C

alternándose con enlaces carbono-carbono sencillos a lo largo de la cadena (Fernández, 2003).

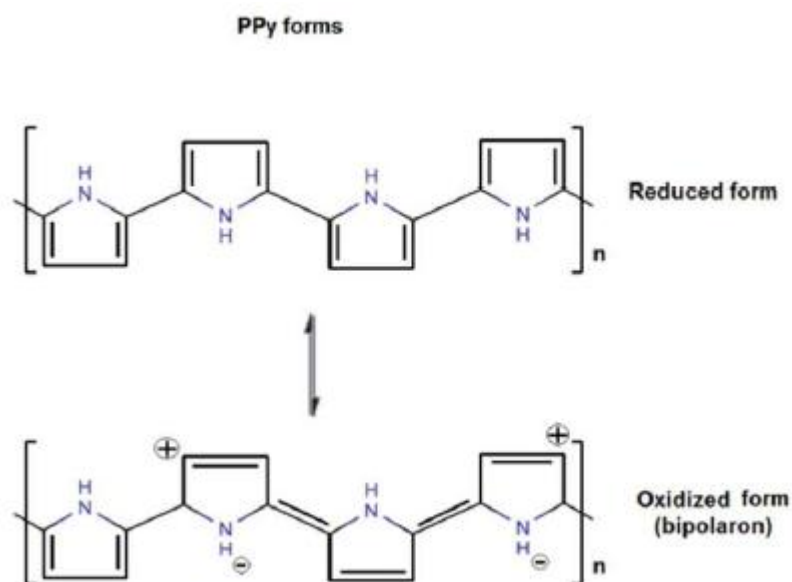


Figura 1. Posibles estructuras químicas del polipirrol  
(Antonio *et al.*, 2015)

## POLIANILINA

La polianilina y sus derivados han sido ampliamente estudiados en la última década con procesamiento mejorado y propiedades eléctricas intrínsecas. Han recibido gran atención debido a su facilidad de síntesis, buena estabilidad en presencia de oxígeno y poseer propiedades electroquímicas de mecanismo conductor único. Este polímero puede obtenerse por polimerización electroquímica y oxidativa química de anilina en disoluciones acuosas (Mahudeswaran *et al.*, 2015).

El desarrollo de los compósitos conductores de esponjas de poliuretano modificadas con polímeros conductores como el polipirrol y la polianilina, mediante la oxidación química de monómeros de pirrol y anilina para la inmovilización de microorganismos en el tratamiento de agua residual municipal.

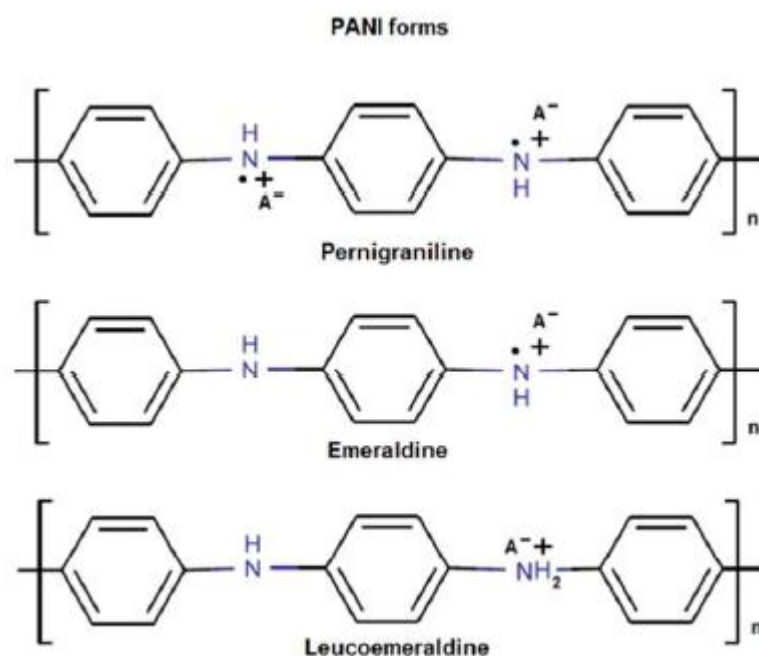


Figura 2. Posibles estructuras químicas de la polianilina  
(Antonio *et al.*, 2015)

## BIOPELÍCULA

La biopelícula son comunidades complejas de microorganismos adheridas a una superficie, rodeadas por una sustancia que secretan como medio de protección de las amenazas externas dado que viven en comunidades microbianas mixtas típicas de biopelículas, los microorganismos pueden compartir sus destrezas y habilidades individuales para la supervivencia del grupo manteniendo una comunicación permanente entre ellos en los diferentes ambientes o microambientes donde permanecen y conviven, por ello tienen muchas ventajas de protección (Stoodley *et al.*, 2002; Xavier, 2007; Hibbing, 2010).

La 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 (Nicoletta, 2000).

La aplicación de técnicas de inmovilización de células para los procesos de tratamiento de agua residual ha tenido mucha atención últimamente. Esto se ha conllevado a la evaluación de distintos tipos de inmovilización y una amplia variedad de soportes. La inmovilización por unión puede lograrse mediante la adhesión espontánea de la biomasa al soporte favoreciendo la remoción de materia orgánica (Sánchez, 2011).

#### 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 (Solano, 2006).

#### 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 (Pérez, 2006).

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 (Buswell, 1998).



## FASES DE FORMACIÓN DE UNA BIOPELÍCULA

Los procesos que conllevan a la formación de la biopelícula son similares para ambientes acuáticos naturales como para los desarrollados en aguas residuales (Phillips, 2010).

Múltiples autores enlistan el proceso de formación de una biopelícula en diferentes fases y está influenciada por parámetros ambientales e inherentes a la fijación de la célula. Además, la formación de biopelícula hace parte del ciclo de vida natural de las bacterias y juega un rol preponderante en los ciclos biogeoquímicos de los metales, en donde estas son las más eficientes recicladoras del ambiente (Priester, 2006; Martínez, 2006).

### Adhesión reversible a la superficie

Los microorganismos normalmente se perciben como seres solitarios que flotan libremente, es decir, en estado planctónico. Sin embargo, en condiciones naturales, la mayoría de microorganismos tiende a adherirse a superficies y finalmente conforman las biopelículas (Stoodley, 2002; Flemming, 2007).

### 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 (Donlan, 2002; Flemming, 2007). Esto suele ser el resultado de un tipo de comunicación bacteriana conocida como detección de quórum (autoinducción).

### Sustancia protectora viscosa

Una vez bien adheridas, las bacterias comienzan a segregar una sustancia circundante conocida como sustancia polimérica extracelular SPE (Sutherland, 2001). Se trata de una sustancia protectora.

La composición exacta de la SPE varía según los microorganismos presentes, pero por lo general, consta de polisacáridos, proteínas, glucolípidos y ADN bacteriano (Stoodley, 2009; Flemming, 2007; Sutherland, 2001). Se cree que el ADN bacteriano que liberan las bacterias vivas o muertas proporciona un

componente estructural importante para la sustancia de la SPE de la biopelícula (Rice *et al* 2007).

### Dispersión

Finalmente, luego que la biopelícula ha alcanzado la madurez, algunas células, ya sea aisladamente o en conglomerados bacterianos, se liberan de la matriz para poder colonizar nuevas superficies, cerrando el proceso de formación y desarrollo de la biopelícula (Post *et al*, 2004).

### CICLO DE VIDA DE LAS BIOPELÍCULAS

De acuerdo con Kung (2011), el ciclo de vida de la biopelícula se representa esquemáticamente en la figura 1.

Primero: las bacterias se adhieren reversiblemente a una superficie.

Segundo: el apego se convierte en permanente y la biopelícula comienza a crecer. A partir de una biopelícula madura, las bacterias pueden separarse y propagarse para colonizar nuevas superficies.

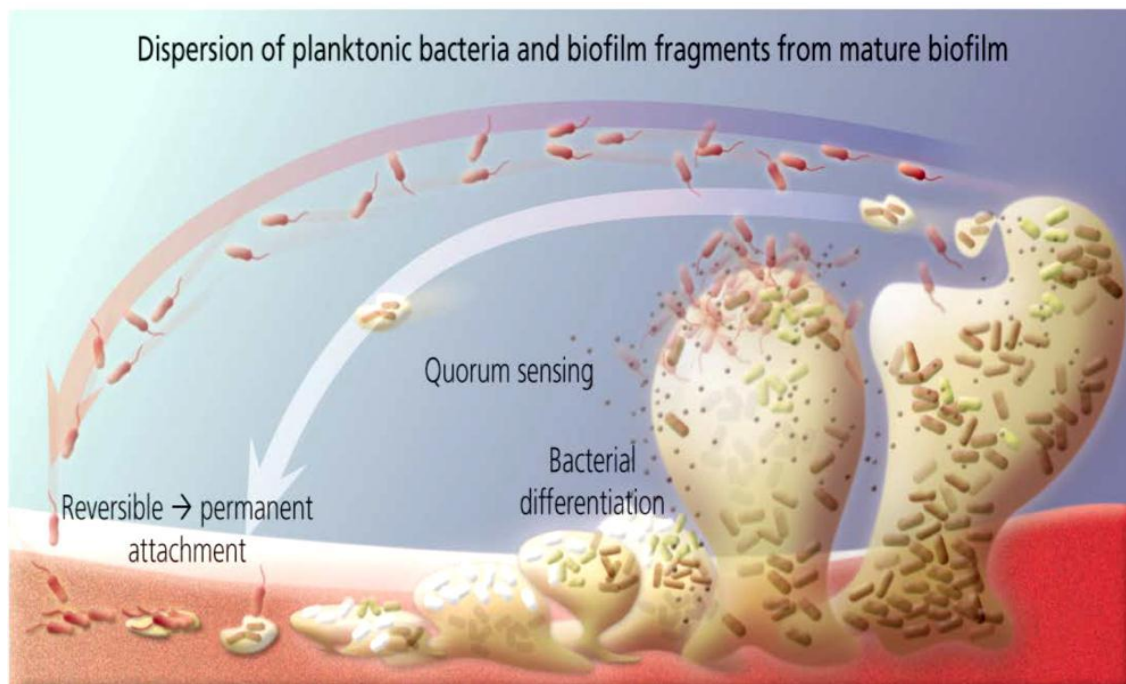


Figura 3. Representación esquemática de la biopelícula microbiana en formación (Küng, 2011).

## HISTORIA DE LA TECNOLOGÍA DE PLASMA

En 1808, Humphry Davy desarrolló la descarga de arco eléctrico en estado estable usando corriente directa. Por su parte, Michael Faraday, en 1830, desarrolló el tubo de descarga eléctrica de alto voltaje con corriente directa, lo que dio inicio al estudio de la sustancia que se obtenía como resultado de dichas descargas. Más tarde, en 1879, William Crookes identificó dicha sustancia como el cuarto estado de la materia. El término plasma fue introducido por Irving Langmuir en 1928. El plasma era conocido como una mezcla de electrones, iones, átomos y neutrones con la propiedad de casi neutralidad eléctrica y con una sensibilidad apreciable a la presencia de campos eléctricos y magnéticos (Pacheco, 2009).

### Plasma

Un plasma se define como el estado particular de un gas (o de una mezcla de gases) que ha sido sometido a un importante aporte de energía, y que está formado por especies cargadas y neutras (iones, electrones, átomos, radicales neutros y moléculas excitadas) (Rouette, 2001). El plasma se conoce también como el cuarto estado de la materia.

A diferencia de los tres primeros estados de la materia, el plasma no suele darse de forma natural y espontánea en nuestro espacio vital, dado que necesita condiciones de energía (presión y temperatura) que se encuentran más habitualmente en ciertas regiones del espacio exterior. Esta energía puede ser de tipo térmico (ej. calentamiento de las estrellas) o de tipo eléctrico (ej. en el laboratorio, mediante descargas de corriente continua). Dicha energía, comunicada al gas mediante colisión entre las especies, conducirá a la excitación, disociación e ionización de los átomos y moléculas presentes (Canal, 2005).

### Polimerización por plasma

El método de recubrimiento empleando plasma se denomina polimerización por plasma o plasma-Polimerización. Por medio de la polimerización asistida por plasma se pueden depositar, en la fase gaseosa, delgados estratos sobre el

sustrato base. La selección de los precursores a ser depositados y los parámetros operativos del plasma (potencia, flujo del precursor, flujo del gas), determinan las características específicas del recubrimiento obtenido, y por lo tanto, las características de la superficie modificada, la cual puede ser hidrófila hidrófoba, promotora de la adhesión, antiadherente (reducción de la fricción), anticorrosiva, favorecedora de la transmitancia o absorbancia de la luz (Yildirim *et al.*, 2008).

Cuando un vapor orgánico se introduce en un plasma se produce un polímero que se forma en las superficies interiores del contenedor y tiene propiedades muy diferentes a las de polímeros convencionales. Por las características de estos materiales resultantes, éstos pueden tener un papel importante en la tecnología moderna. Una forma de obtener polímeros semiconductores es por medio de esta técnica de polimerización, en donde se busca sintetizar una película delgada conductora (Olayo, 2003).

La primera aplicación práctica del plasma fue para realizar polimerización de estireno. Este hecho ocurrió en 1960 y fue llevado a cabo por Goodman, marcando una nueva área de investigación relacionada al plasma. En 1976, Holland utilizó el bombardeo de iones para lograr la polimerización de un monómero con plasma en el laboratorio. (D'Agostino, 1993).

#### Generación de un plasma

Los plasmas pueden ser producidos por descargas eléctricas entre electrodos, utilizando corriente continua, radiofrecuencia (RF) o microondas (UHF para ultra altas frecuencias o HF para altas frecuencias) (Canal, 2005).

La energía necesaria para generar un plasma puede suministrarse de varias maneras (Sainz, 2012).

- Mediante el calor originado en un proceso de combustión.
- Mediante la interacción entre radiación láser y un sólido, líquido o gas.
- Mediante descargas eléctricas en gases, en las que los electrones libres toman energía del campo eléctrico aplicado y la pierden en procesos de excitación e ionización de los átomos y moléculas del gas.

### Tipos de plasma

Clasificar la diversidad de tipos de plasmas que existen en la naturaleza o que se pueden generar de forma artificial no es fácil, ya que resulta arriesgado escoger parámetros aislados que sirvan de criterio para establecer las diferencias. Pese a tales dificultades, una primera clasificación de los tipos de plasmas, puede atender a su equilibrio térmico, es decir, a si la temperatura o energía media de las partículas que lo forman es o no la misma para cada tipo de partícula.

Todas las partículas tienen la misma temperatura (equilibrio térmico) en el caso del plasma de los interiores estelares o de sus análogos terrestres, los plasmas termonucleares de deuterio, tritio e impurezas de bajo número atómico (carbono) generados en los dispositivos experimentales de fusión nuclear controlada.

El plasma del interior estelar suele estar compuesto por una alta proporción de partículas ionizadas: el número de electrones, y de iones, es similar al de partículas neutras. Estos plasmas reciben también la denominación de plasmas calientes o térmicos, ya que la temperatura en su interior llega a alcanzar millones de grados ( $10^7$ - $10^9$  °C), lo mismo para electrones que para especies pesadas.

Existen otros tipos de plasmas térmicos, con ciertas aplicaciones industriales, que se generan a presiones altas, por encima de los 133 mbar, algo más de una décima de atmósfera, si bien sus temperaturas (104-105 °C) son mucho menores que las de los plasmas de fusión.

Los plasmas no térmicos, conocidos también por plasmas fríos, o plasmas no equilibrados se caracterizan por el hecho de que la temperatura de las especies pesadas (las partículas neutras y los iones) es cercana a la temperatura ambiente (25-100 °C). La temperatura electrónica es, en cambio, mucho mayor (entre 5000 y 105 °C). Los plasmas fríos suelen producirse a baja presión ( $p < 133$  mbar) en reactores con muy diversas geometrías (Sainz, 2012).

### Efectos superficiales del tratamiento con plasma

Los materiales tratados con plasma de baja temperatura pueden experimentar tres tipos principales de procesos (Mittal, 1999).

- Ablación o “etching”, que consiste en la eliminación en seco de material de la superficie a través de la formación de productos de reacción volátiles.
- Modificación química de la superficie, mediante la incorporación de nuevos grupos funcionales o modificación de los ya existentes, pudiéndose alterar drásticamente las propiedades superficiales, como la adhesión.
- Deposición de capas finas, por reacción química de uno o más componentes volátiles precursores que den lugar a la formación de productos de reacción sólidos.

En la superficie de los materiales tratados con plasma suele predominar uno de estos procesos sobre los otros en función de las condiciones del tratamiento y del material en sí.

### Beneficios del uso de plasma en tratamientos de superficies

El plasma presenta una gran cantidad de ventajas frente a los tratamientos tradicionales de superficies de diferentes materiales (García *et al.*, 2010).

- Mejor rendimiento. Al tratar un material con plasma se obtiene un rendimiento superior en el proceso. Existen, sin embargo, algunos procesos como grabación química, abrasión, llama y corona que no pueden entregar la calidad consistente de plasma.
- Costo conveniente. El plasma puede ser una alternativa para modificar una superficie con un costo moderado, ya que el costo en los sistemas operacionales es mínimo, y son eliminados costos asociados con procesos peligrosos, como la disposición final de desechos. En este proceso se evita la producción de efluentes, que constituyen una pérdida en reactivos, así como un costo en tratamientos posteriores.
- Medio ambiente y puesto de trabajo seguro. Al efectuar el proceso de plasma no se producen daños en el medio ambiente, además de presentar la ventaja que los operadores no están expuestos a procesos peligrosos.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Ubicación del experimento

El presente trabajo se realizó en el Laboratorio de Biotecnología en el Departamento de Botánica perteneciente a la “Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro” ubicada en Buenavista, Saltillo, Coahuila.

### Procedimiento polimerización por plasma

La polimerización por plasma se llevó a cabo durante una de las estancias realizadas en los meses de enero y febrero en el Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA), bajo la asesoría de la Dra. María Guadalupe Neira Velázquez.

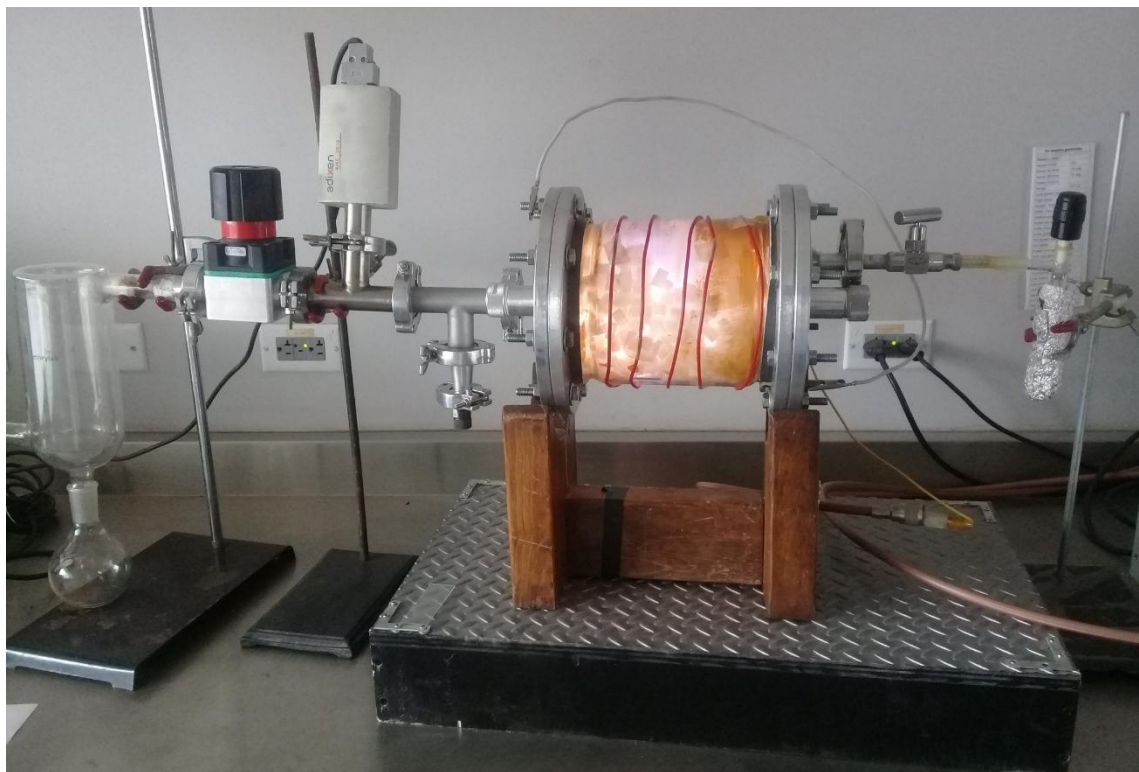


Figura 4. Reactor de plasma en funcionamiento

### Tratamiento No.1

La polimerización de los monómeros se realizó en un reactor de plasma de acero inoxidable con mirilla de cuarzo para la detección de especies formadas.

Previo a cada experimento, las muestras de espuma de poliuretano (cortadas en cubos de 1 cm por lado aproximadamente). Se pesó la espuma de poliuretano, el reactor plasma tiene una capacidad de 10 gramos de espuma de poliuretano aproximadamente, una vez que se introdujo la espuma en la cámara del reactor se le dio un pretratamiento de 15 minutos de plasma de aire a una potencia de 100 watts, se realizó una mezcla de pirrol/anilina 50:50, 20 ml de pirrol y 20 ml de anilina y se agito manualmente para homogenizar la mezcla. Una vez transcurridos los 15 minutos del pretratamiento se conectó el matraz al reactor con la mezcla de los monómeros y se le abrió a la válvula de flujo hasta donde permitiera la presión y así encendiera el plasma, el tratamiento de plasma pirrol/anilina fue de 2 horas a 100 watts de potencia. Estos pasos se repitieron hasta completar los 50 gramos de espuma requerida.



Figura 5. Espuma de poliuretano recubierta con polipirrol y polianilina mediante plasma



### Tratamiento No.2

La polimerización de los monómeros se realizó en un reactor de plasma de acero inoxidable con mirilla de cuarzo para la detección de especies formadas.

Previo a cada experimento, las muestras de espuma de poliuretano (cortadas en cubos de 1 cm por lado aproximadamente). Se pesó la espuma de poliuretano, el reactor tiene una capacidad de 10 gramos de espuma de poliuretano aproximadamente, una vez que se introdujo la espuma en la cámara del reactor se le dio un pretratamiento de 15 minutos de plasma de aire a una potencia de 100 watts, se realizó el segundo tratamiento donde solo se polimerizó con pirrol durante 2 horas a 100 watts de potencia. Se preparó una solución de agua al 2% con pirrol/anilina y una vez transcurrida las dos horas en el reactor de plasma, se extrajo la espuma e inmediatamente se introdujo en la solución y se dejó por 15 horas en dicha solución, ya pasadas las 15 horas se puso a secar en una campana de flujo laminar.



Figura 6. Espuma de poliuretano recubierta con polipirrol mediante plasma

Descripción de los reactores de tratamiento de agua residual en flujo continuo.

Se utilizaron reactores cilíndricos de acrílico con una capacidad de 1.8 litros, a cada reactor se le realizaron dos perforaciones una para la entrada (influyente) y otro para la salida (efluente), fueron alimentados mediante una bomba peristáltica que extraía agua residual municipal de un reservorio.



Figura 7. Filtro anaerobio utilizado

#### Formación de biopelícula y arranque de reactores

El día 9 de marzo de 2018 se inició con el proceso de formación de la biopelícula en los dos reactores cuya capacidad fue de 1.8 litros, se le adicionaron 14 gramos de esponja a cada reactor 1-espuma de poliuretano recubierta con polianilina y polipirrol por plasma polimerización 2-espuma de poliuretano recubierta con polipirrol por plasma polimerización.

Se les agregó 720 ml de lodo anaerobio recolectado de la planta de tratamiento de agua residual de la UAAAN ubicada a un costado del jardín botánico, además

se le agregó 700 ml de agua residual colectada en la misma planta, a los reactores se les agitaba a diario de forma manual para que hubiese mayor uniformidad y mezcla entre el lodo y las esponjas y así tener una mejor formación de biopelícula, se dejaron por 15 días, una vez transcurridos esos 15 días se recircularon con una solución de acetato de sodio.

El día 26 de marzo de 2018 se dio arranque con dichos reactores, se realizó un lavado de la esponja con agua corriente para eliminar el exceso de lodo y se le adicionó agua residual doméstica recién colectada del influente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Bosque Urbano Ejercito Mexicano y se procedió a sacar su TRH, el TRH que se manejó en los dos reactores fue de 54 horas, ya que se obtuvo el TRH de los reactores se monitoreó por 15 días tomando muestras cada 24 horas para realizar sus respectivos análisis de laboratorio, los reactores se mantuvieron a temperatura ambiente, se empezó a tomar muestra el día 29 de marzo de 2018.



Figura 8. Arranque del filtro anaerobio

## Variables monitoreadas

### Determinación de la demanda química de oxígeno

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.

La materia orgánica es oxidada por el dicromato de potasio en un medio fuertemente ácido en presencia del catalizador ( $\text{Ag}_2\text{SO}_4$  y  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). La coloración pasa de un color amarillo a verde-azul y se lee a una absorbancia de 620 nanómetros en un espectrofotómetro de UV/Vis. Ésta 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 (Norma Mexicana NMX-AA-030-SCFI-2012).

### Material y equipo

- 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, ( $\text{HgSO}_4$ )
- Ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ )
- Sulfato de plata ( $\text{Ag}_2\text{SO}_4$ )
- Biftalato de potasio ( $\text{C}_6\text{H}_4\text{COOHCOOK}$ )

### Solución de dicromato de potasio

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

deseCADador y pesar 10.216 gramos de dicromato, pasar este dicromato a un matraz de adoraci3n de un litro y a1adirle 500 ml de agua destilada, adicionar 33.3 gramos de sulfato merc3rico ( $\text{HgSO}_4$ ), adicionar 167 ml de 1cido sulf3rico concentrado lentamente por ser una reacci3n exot3rmica en ba1o de hielo, por 3ltimo aforar a un litro con agua destilada cuando la mezcla se haya enfriado, en el caso de que no todas las part3culas se hayan disuelto, se mezcla con agitaci3n magn3tica, para despu3s pasar esta mezcla a un frasco 1mbar, ya que puede sufrir una descomposici3n por la luz.

#### Soluci3n de 1cido sulf3rico plata

Pesar con precisi3n 15 gramos de sulfato de plata, pasar este compuesto a un matraz de aforaci3n de un litro, aforar a 1 litro con 1cido sulf3rico concentrado, dejarlo reposar durante dos d3as en un lugar seco y obscuro para su completa disoluci3n. Despu3s pasar esta soluci3n a un frasco 1mbar.

#### Procedimiento

1. En un tubo hach a1adir 3.5 ml de la soluci3n de 1cido plata y 1.5 ml de la soluci3n de dicromato de potasio.
2. Agregar 2.5 ml de la muestra problema, cerrar bien con el tap3n de rosca; es necesario realizar un blanco de referencia (agua destilada).
3. Agitar lentamente por inversi3n. Colocar los tubos en el Digestor durante 2 horas a  $150^\circ\text{C}$ .
4. Sacar los tubos y dejar enfriar a temperatura ambiente. Leer las absorbancia en el espectrof3tmetro a una longitud de onda de 620 nm.
5. Calcular la concentraci3n de la DQO con la curva est1andar.

#### Determinaci3n de pH

Es una medida de la concentraci3n de iones de hidr3geno en un medio. Esta concentraci3n est1 directamente relacionada al car1cter 1cido, neutro o b1sico 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 mayor3a

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, y en las plantas de tratamiento de agua. Este método determina el pH, midiendo el potencial generado (en milivolts) por un electrodo de vidrio que es sensible a la actividad del ión  $H^+$ , este potencial es comparado contra un electrodo de referencia, que genera un potencial constante e independiente del pH. El electrodo de referencia que se utiliza es el de calomel saturado con cloruro de potasio, el cual sirve como puente salino que permite el paso de los milivolts generados hacia el circuito de medición (Norma Mexicana NMX-AA-008-SCFI-2011).

#### Material y equipo

- Vasos de precipitado de 100 ml
- Agua residual
- Agua destilada
- pHmetro PHT - 026
- 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.

#### Determinación de Sulfatos

El ion sulfato precipita con cloruro de bario, en un medio ácido, 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.

La concentración de ion sulfato se determina por comparación de la lectura con una curva patrón (Norma Mexicana NMX-AA-074-2014).

#### Material 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
- Cronómetro

#### 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.

### 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. 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 (Norma Mexicana NMX-AA-079-SCFI-2001).

#### Material 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 homotrópico
- Ácido sulfúrico
- Agitador SCILOGEX MX-S

#### Procedimiento

Colocar 1 ml de muestra en un tubo 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 homotrópico (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.



### Determinación de Sólidos Totales

Es el residuo que permanece en una cápsula después de evaporar y secar una muestra a una temperatura de  $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

#### Material y equipo

- Horno de secado
- Balanza analítica
- Termómetro
- Crisol
- Pinzas para crisol
- Probeta
- Desecador

#### Procedimiento

Se recomienda seleccionar el volumen de muestra problema. Las muestras deben estar a temperatura ambiente al realizar el análisis. Agitar las muestras para asegurar la homogeneización. Meter el crisol vacío en el horno de secado a una temperatura de  $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  por 24 horas. Sacar el crisol con las pinzas y meterlo al desecador hasta que alcance temperatura ambiente después pesar el crisol en la balanza analítica y anotar su peso. Medir el volumen de muestra deseada con la probeta y ponerla en el crisol, meter el crisol con la muestra al horno de secado a una temperatura de  $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  por 24 horas. Ya que se haya evaporado el agua, sacar el crisol con la pinza y meterlo al desecador hasta tenerlo a temperatura ambiente. Al final pesamos el crisol en la balanza y sacamos la diferencia con el crisol vacío para obtener la cantidad de mg/l de sólidos (Norma Mexicana NMX-AA-034-SCFI-2015).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En los siguientes cuadros y figuras se presentan los resultados obtenidos de dos biofiltros anaerobio empacados con diferentes soportes polimerizados por plasma alimentados en flujo continuo y monitoreado por 14 días a un TRH de 54 horas.

Se realizaron mediciones de sulfatos y nitratos pero en todas las muestras los resultados fueron negativos.

En el cuadro 1 se observa el comportamiento de la DQO de dos biofiltros empacados con diferentes soportes polimerizados por plasma, como se puede apreciar en el tratamiento donde la espuma de poliuretano se polimerizó con pirrol y anilina a las 48 horas de haber iniciado el experimento se obtuvo una eficiencia de remoción de 64.6%, se obtuvo la mejor remoción el día 10 logrando una remoción de 76.4% y al final de la experimentación se obtuvo una eficiencia de remoción de 73.7%. En el segundo tratamiento donde la espuma de poliuretano fue polimerizada solo con pirrol al inicio de la experimentación el reactor logro muy buen desempeño obteniéndose una eficiencia de remoción de 60.7% a las 24 horas de haber arrancado, dicho reactor se mantuvo variable los siguientes días y el día 8 logró su mejor remoción siendo esta de 76.1%, al final de la experimentación se obtuvo una eficiencia de remoción de 63.5%. Estos resultados son parecidos a los obtenidos por Carmona *et al* (2015) alcanzando una eficiencia de remoción de 80%, usando espuma de poliuretano polimerizada con polipirrol y polianilina, también lograron una eficiencia de remoción de 69% usando espuma de poliuretano polimerizada con pirrol, en ambos casos la polimerización se realizó por oxidación química, en el tratamiento de agua residual municipal.

Cuadro 1. Porcentajes de remoción de la demanda química de oxígeno en la evaluación de diferentes soportes polimerizados por plasma

Día	PU+PPy+PANi	PU+PPy
	ER (%)	ER (%)
1	41.4	60.7
2	64.6	44.8
3	64.6	35.9
4	68.9	62.1
5	62.4	62.6
6	74.2	68.2
7	71.1	65.4
8	56.7	76.1
9	59.3	75.2
10	76.4	72.8
11	60.2	70
12	62.4	68.6
13	61.1	68.6
14	73.7	63.5

PU= Espuma de Poliuretano; PPy= Polipirrol; PANi= Polianilina; ER= Eficiencia de Remoción

En el cuadro 2 se puede apreciar la comparación de la DQO de los dos tratamientos utilizados durante la experimentación, se muestran los miligramos de DQO inicial y final de cada tratamiento, el tratamiento con mejor resultado fue el de la espuma de poliuretano polimerizada con polipirrol y polianilina, superando por 10% en eficiencia de remoción cuando la espuma de poliuretano solo se polimerizó con polipirrol.

Cuadro 2. Comparación de la DQO de dos biofiltros anaerobio alimentados en flujo continuo

Día	1	14	ER (%)
<b>PU+PPy+PANi</b>	286.50	75.25	73.73
<b>PU+PPy</b>	267.75	97.75	63.49

PU= Espuma de Poliuretano; PPy= Polipirrol; PANi= Polianilina; ER= Eficiencia de Remoción

En la figura 9 se muestra la tendencia de la remoción de la DQO de los dos tratamientos en cuestión, se puede observar que el tratamiento donde la espuma

de poliuretano se polimerizó con polipirrol y polianilina muestra alta variabilidad después del muestreo de 144 horas en comparación con la espuma de poliuretano polimerizada solo con polipirrol, además en el muestreo de 192 horas se observa una disminución de la eficiencia de remoción esto puede deberse a la presencia de partículas suspendidas coloidales las cuales causan turbidez en el agua y por ende disminuye la eficacia del proceso.

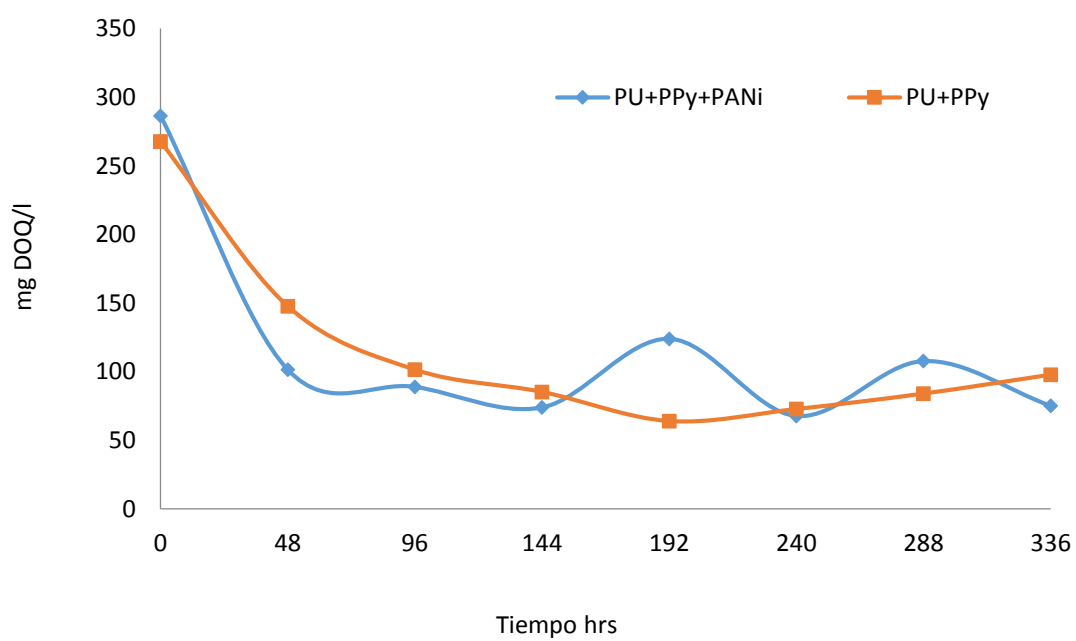


Figura 9. Comportamiento de la DQO en dos biofiltros anaerobio alimentados en flujo continuo a un TRH de 54 horas

El cuadro 3 muestra los porcentajes de remoción de sólidos totales en un sistema anaerobio de flujo continuo de dos biofiltros, el primero se empacó con espuma de poliuretano polimerizada con polipirrol y polianilina como soporte para el desarrollo de biopelícula, la eficiencia de remoción de sólidos totales se muestra variable durante todo el proceso y al final de la experimentación se logra obtener un 48.4% de eficiencia de remoción de sólidos totales con respecto al inicio del proceso.

El segundo biofiltro que se empaco con espuma de poliuretano polimerizada sólo con polipirrol como soporte para el desarrollo de biopelícula, a las 48 horas después del inicio de la experimentación se logró un 51.8% de eficiencia de remoción de sólidos totales y al final éste biofiltro alcanzó una remoción de sólidos totales de 57.1%, superando 9% al biofiltro que se empaco con espuma de poliuretano polimerizada con polipirrol y polianilina.

Cuadro 3. Porcentajes de remoción de sólidos totales en la evaluación de diferentes soportes polimerizados por plasma

Día	PU+PPy+PANi	PU+PPy
	ER (%)	ER (%)
2	43.5	51.8
4	25.8	44.6
6	35.5	5.4
8	45.2	35.7
10	41.9	55.4
12	37.1	37.5
14	48.4	57.1

PU= Espuma de Poliuretano; PPy= Polipirrol; PANi= Polianilina; ER= Eficiencia de Remoción

En la figura 10 se muestra el agua obtenida de los dos biofiltros después de los 14 días que duró la experimentación, se puede detectar la diferencia de la disminución de sólidos totales en los tratamientos en cuestión.

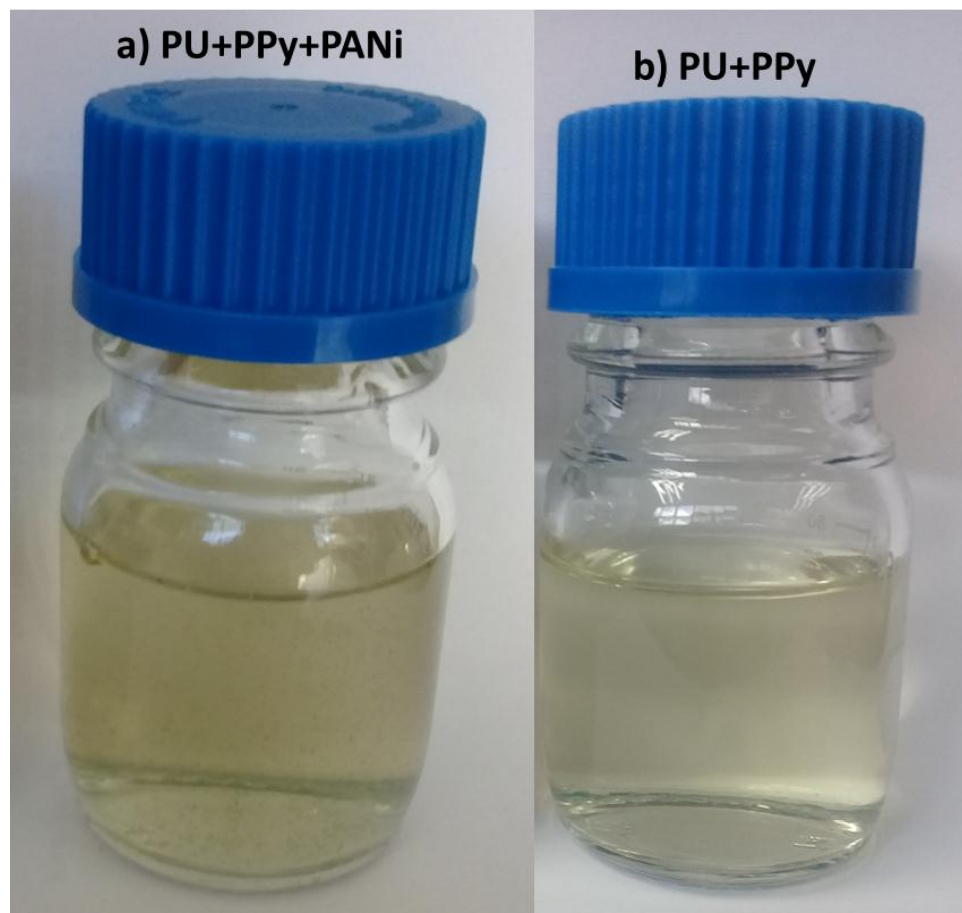


Figura 10. Agua obtenida por los dos biofiltros

En el cuadro 4 se muestran los resultados de la comparación de sólidos totales de los dos tratamientos evaluados, se observan los gramos de sólidos totales al inicio y al final del experimento donde el reactor que se empacó con espuma de poliuretano polimerizada solo con polipirrol obtuvo mejores resultados superando 9% al reactor que se empacó con espuma de poliuretano polimerizada con polipirrol y polianilina. Estos resultados difieren con los obtenidos por Chandravathanam *et al* (1999) quienes obtuvieron resultados de 95 a 98% usando espuma de poliuretano como soporte.

Cuadro 4. Comparación de sólidos totales de dos biofiltros anaerobio alimentados en flujo continuo

Día	1	14	ER (%)
<b>PU+PPy+PANi</b>	1.24	0.64	48
<b>PU+PPy</b>	1.12	0.48	57

PU= Espuma de Poliuretano; PPy= Polipirrol; PANi= Polianilina; ER= Eficiencia de Remoción

La figura 11 muestra el comportamiento de sólidos totales de los dos biofiltros ambos tratamientos muestran una tendencia muy variable con respecto al tiempo y al final el tratamiento que dio mejores resultados fue el reactor que contenía espuma de poliuretano polimerizada sólo con polipirrol.

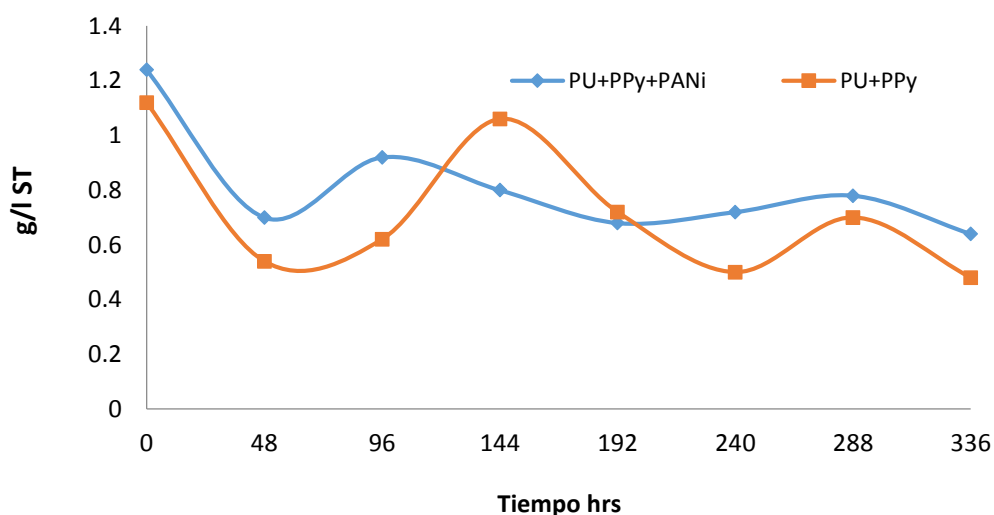


Figura 11. Comportamiento de sólidos totales en dos biofiltros anaerobio alimentados en flujo continuo a un TRH de 54 horas

En el cuadro 5 se puede apreciar el comportamiento del pH en un sistema anaerobio de flujo continuo, se muestran los resultados de los dos tratamientos en cuestión, en el reactor que contenía espuma de poliuretano polimerizada con polipirrol y polianilina el agua cruda tiene un pH neutro de 7.55 pero una vez que el agua entra en contacto con las espumas aumenta su pH a 8.2 con tendencia

hacia la alcalinidad, el pH al final de la experimentación de mantiene alcalino dando valores de 8.12.

En el reactor que contenía espuma de poliuretano polimerizada solo con polipirrol el agua cruda tenía tendencia de acidez con un pH de 6.92 y cuando el agua entra en contacto con las espumas aumenta su pH a 8.06 los siguientes días se mantuvo en valores neutros hasta el final del experimento donde se obtuvo como lectura final de 7.50. Estos resultados son similares a los obtenidos por González y Saldarriaga en el 2008 donde el pH permaneció en valores superiores a 7.2 usando espuma de poliuretano como material de soporte.

Cuadro 5. Comportamiento del pH de dos biofiltros anaerobio alimentados en flujo continuo

<b>Día</b>	<b>PU+PPy+PANi</b>	<b>PU+PPy</b>
Cruda	7.55	6.94
1	8.20	8.06
2	8.32	7.89
3	7.61	7.71
4	7.80	7.88
5	7.93	7.85
6	7.76	7.90
7	7.93	7.90
8	7.83	7.91
9	8.01	7.83
10	7.82	7.78
11	7.97	7.81
12	8.00	7.73
13	8.07	7.76
14	8.14	7.69
15	8.12	7.50

PU= Espuma de Poliuretano; PPy= Polipirrol; PANi= Polianilina



El cuadro 6 muestra el comportamiento de la temperatura en un sistema anaerobio de flujo continuo durante los días que duró la experimentación, se muestran los resultados de los dos tratamientos en cuestión, se puede observar que la temperatura se mantuvo similar en ambos tratamientos la cual estuvo en un rango de 20 a 30 °C.

Cuadro 6. Comportamiento de la temperatura de dos biofiltros anaerobio alimentado en flujo continuo

Día	PU+PPy+PANi	PU+PPy
1	21 °C	24 °C
2	23 °C	26 °C
3	25 °C	23 °C
4	26 °C	22 °C
5	27 °C	25 °C
6	28 °C	27 °C
7	23 °C	27 °C
8	24 °C	D25 °C
9	25 °C	25 °C
10	28 °C	27 °C
11	27 °C	27 °C
12	29 °C	25 °C
13	23 °C	24 °C
14	24 °C	25 °C
15	25 °C	26 °C

PU= Espuma de Poliuretano; PPy= Polipirrol; PANi= Polianilina

La figura 12 muestra el análisis termogravimétrico TGA de la espuma de poliuretano polimerizadas por plasma así como también un blanco sin polimerizar, la tendencia de las curvas presentó dos regiones de pérdida de peso, la primer región sucedió entre los 290 °C y los 300 °C, mientras que la segunda pérdida de peso sucedió entre los 350 °C y los 390 °C, cabe recalcar que la espuma de poliuretano que se polimerizó con polipirrol y polianilina soportó hasta los 390 °C y a los 400 °C donde presentó su segunda región de pérdida de peso.

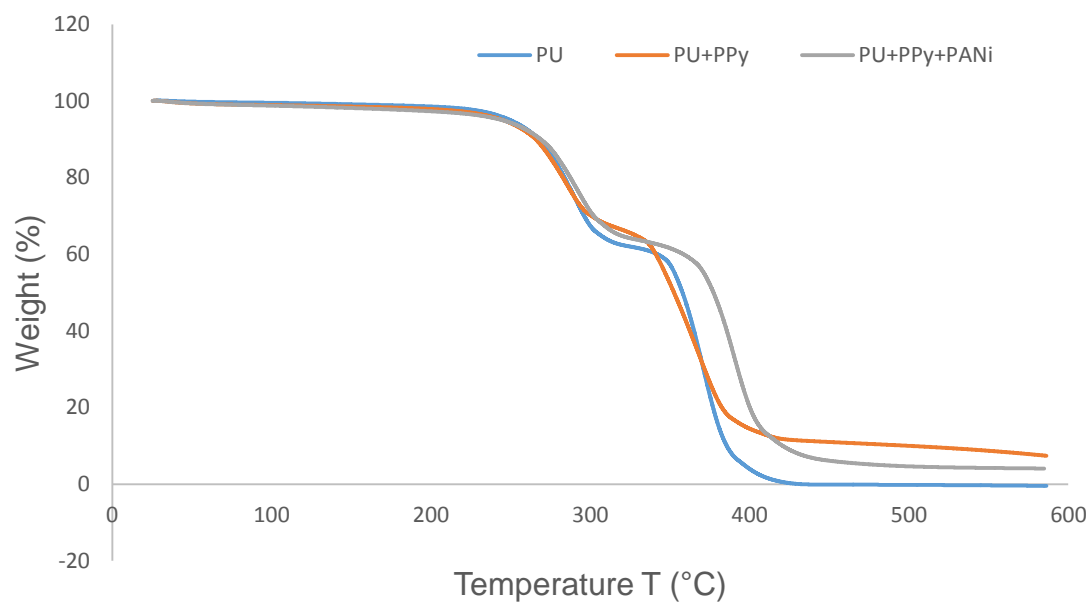


Figura 12. Análisis termogravimétrico (TGA) de las esponjas utilizadas

## CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos se concluye que la polimerización por plasma de espuma de poliuretano recubierta con polipirrol y polianilina es una opción muy viable para el tratamiento de agua residual debido a que se adhieren los microorganismos más afines a los sustratos y por ende aumenta la eficacia en la remoción de demanda química de oxígeno, la espuma de poliuretano polimerizada con polipirrol y polianilina superó un 10% a la espuma de poliuretano polimerizada sólo con polipirrol.

## REFERENCIAS

- Antonio, C., I., D., Martínez, A., S., Y., Martínez, G., H., Ovando, M., V. M., Gonzalez, O., O. 2015. Semiconducting polyurethane polypyrrole polyaniline for microorganism immobilization and wastewater treatment in anaerobic/aerobic sequential packed bed reactors. *Journal of Applied Polymer Science*. 132. (28). Pp. 8-12.
- Besel, S.,A. 2007. Biomasa digestores anaerobios. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. 1(1) Pp. 27-28.
- Beltrán, R., M., Marcilla, G., A. 2012. Tecnología de Polímeros Procesados y Propiedades. Universidad de Alicante. Diazotec, S.A. Pp.18-19.
- Buswell, C., M., Herlihy, Y., M., Lawrence, L., M., James, T., M., Marsh, P., D., Keevil, C., W., Leach, S., A. 1998. Extended survival and persistence of *Campylobacter spp.* in water and aquatic biofilms and their detection by immunofluorescent-antibody and -rRNA staining. *Applied and Environmental Microbiology*. 64(2). Pp. 735-737.
- Cesvi México. 2008. Fichas Técnicas de Reparación de Vehículos. Espuma de poliuretano. N° 33.
- Canal, B., C. 2005. Estudio de las propiedades superficiales y del post-suavizado de tejidos de lana y poliamida 6 tratados con plasma. Tesis doctoral. Departamento de Tecnología de Tensioactivos Instituto de Investigaciones Químicas y Ambientales de Barcelona. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Pp. 62-75.
- Chandravathanam, S., Murthy, D., V. S. 1999. Studies in nitrification of Municipal Sewage in an Upflow Biofilter. *Bioprocess Engineering*. Vol. 21 Pp. 117-122.
- Chen, Y., Cheng, J., J., Creamer, K., S. 2007. Inhibition of anaerobic digestion process: A review. *Bioresource Technology*. Vol. 99. Pp. 4044-4064. Díaz, B., M., Espitia, V., S. Molina, P., F. 2002. Digestión anaerobia una aproximación a la tecnología. Instituto de Biotecnología. Pp.164.

- Donlan, R., M. 2002. Biofilms: microbial life on surfaces. *Emerging Infectious Diseases*. 8 (9). Pp. 881-887.
- D'Agostino, R. 1993. Plasma deposition, treatment and etching of polymers. San Diego. Academic Press, Inc.
- Espinoza, A., J. 2011. Tratamiento de Aguas Residuales de Matadero con Elevado Contenido en Sangre Mediante la Combinación de procesos Anaerobio de Película fija (bapf) y Aerobio de membrana (mbr). Tesis Doctoral. Pp.55-64.
- Fernández, O., T. 2003. Polímeros conductores: Síntesis, propiedades y aplicaciones electroquímicas. *Revista Iberoamericana de polímeros*. 4 (4). Pp.32.
- Flemming, H., C., Neu T., R., Wozniak, D., J. 2007. The EPS matrix: the "house of biofilm cells". *Journal of Bacteriology*. 189 (22). Pp.7945-7947.
- García, T., M., Montero, J., Calle, W., Quinde, M., S., P. 2010. Plasma: una tecnología de gran potencial para la industria y la ciencia. *Ingenius Revista de Ciencia y Tecnología*. Pp.2-7.
- Gijzen, H., J. 2001. Low cost wastewater treatment and potentials for reuse. A cleaner production approach to wastewater management. International Institute for Hydraulic, Infrastructural and Environmental Engineering. Pp.211-224.
- González, M., Saldarriaga, J., C. 2008. Remoción biológica de materia orgánica, nitrógeno y fósforo en un sistema tipo anaerobio anóxico aerobio. *EIA*. 5(10). Pp.45-53.
- Hibbing, M., E., Fuqua, C., Parsek, M., R., Peterson, S., B. 2010. Bacterial competition: surviving and thriving in the microbial jungle. *Nature Reviews. Microbiology*. 8 (1). Pp.15-25.

- Kelleher, B., P., Leahy, J., J., Henihan, A., M., O'Dwyer, T., F., Sutton, D., Leahy, M., J. 2001. Advances in poultry litter disposal technology – a review. *Bioresource Technology*. Vol. 83. Pp. 27-33.
- Küng, E. 2011. The importance of pneumococcal capsule in innate immunity and biofilm formation. Institute for Infectious Diseases Faculty of Medicine, University of Bern. Pp. 38.
- Lorenzo, A., Y., Abreu, O., M. 2005. La digestión Anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA).39 (1). Pp.35-48.
- Márquez, V., M., Martínez, G., S. 2011. Reactores Anaerobios de Flujo Ascendente (RAFA's o UASB). Antología. Centro Tecnológico Aragón. Laboratorio de Ingeniería Ambiental. Pp.30.
- Martinez, R., J., Wang, Y., Raimondo, M., A., Coombs, J., M., Barkay, T., Sobecky P. 2006. Horizontal Gene transfer of PIB- Type ATPases among Bacteria Isolated from Radionucleotide- and Metal-Contaminated Subsurface Soils. *Applied and Environmental Microbiology*. 72 (5). Pp.3111-3118.
- Mahudeswaran, A., Manoharan, D., Chandrasekaran, J., Vivekanandan, J., Vijayanana, P. 2015. CSA Doped Poly(aniline-co-o-toluidine) and Dispersed Zinc Oxide Nanoparticles: a Promising Material for Photovoltaics. *Materials Research*. Department of Physical Sciences, Bannari Amman. Institute of Technology. 18 (3). Pp. 482-488.
- Mejia, S., G. 1996. Digestión anaerobia. Universidad Autónoma de Yucatán. México. Folleto técnico. Pp. 30-35.
- Mittal, K., L., Pizzi, A. 1999. *Adhesion Promotion Techniques*. Marcel Dekker, Inc. New York.
- Morales, J., Olayo, M., G., Cruz, G., J., Castillo, O., M., Olayo, R. 2000. *Journal of Polymer Science; Part B: Polymer Physics*.

- Nava, U., L., Gasperín, S., R, Durán, M., A. 2013. Comparación de un Reactor de Biomasa Suspendida y un Reactor de Biomasa Adherida para la Biodegradación de Compuestos Tóxicos Presentes en Aguas Residuales de Refinerías de Petróleo. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 30 (1). Pp. 101-112.
- Nicolella, C., Van, L., M., C., Heijnen, J., J. 2000. Wastewater treatment with particulate biofilm reactors. *Journal of biotechnology* Vol.80. Pp.1-33.
- Norma Mexicana NMX-AA-030-SCFI-2012. 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.
- 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.
- 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.
- Norma Mexicana NMX-AA-074-2014. Análisis de agua – Determinación de ion sulfato. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial.
- Norma Mexicana NMX-AA-034-SCFI-2015. Análisis de Agua - Medición de Sólidos y Sales Disueltas en Aguas Naturales, Residuales y Residuales Tratadas – Método de Prueba (Cancela a la NMX-AA-034-SCFI-2001).
- Olayo, M., G., Morales, J., Cruz, G. J., Barocio, R., Olayo R. 2003. *Journal of Polymer Science; Part B: Polymer Physics*.
- Pacheco, S., J. 2009. El plasma, ese universo de todos tan desconocido. Disponible en: [http://www.inin.mx/publicaciones/documentospdf/CONTACTO\\_28\\_PLASMA.pdf](http://www.inin.mx/publicaciones/documentospdf/CONTACTO_28_PLASMA.pdf).

- Pérez, O., M., González, B., O., González, 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. Pp.170.
- Phillips, P., L., Wolcott, R., D., Fletcher, J., Schutz, G., S. 2010. Biofilms Made Easy. Wounds International. 3 (1). Pp.1-6.
- Priester, J., H., Olson, S., G., Webb, S., M., Neu, M., P., Hersman, L., E., Holden, P., A. 2006. Enhanced Exopolymer Production and Chromium Stabilization in *Pseudomonas putida* Unsaturated Biofilms. Applied and Environmental Microbiology. 72 (3). Pp.1988-1996.
- Post, J., C., Stoodley, P., Hall-Stoodley, L., Ehrlich, G., D. 2004. The role of biofilms in otolaryngologic infections. Current Opinion Otolaryngology & Head and Neck Surgery. 12(3). Pp.185-190.
- Rice, K., C., Mann, E., E., Endres, J., L., Weiss, E., C., Cassat, J., E., Smeltzer, M., S., Bayles, K., W. 2007. The cida murein hydrolase regulator contributes to DNA release and biofilm development in *Staphylococcus aureus*. Proceedings of the National Academy of Sciences. 104 (19). Pp.8113-8118.
- Riveros, O., B. 2013. Tratamiento de aguas residuales municipales en la ciudad de México. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México. Pp.13-20.
- Rodríguez, F., A., Letón, G., P., Rosal, G., R., Dorado, V., M., Villar, F., S., Sanz, G., J. 2006. Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales. Informe de vigilancia tecnológica. Pp.137.
- Rouette, H., K. 2001. Encyclopedia of Textile Finishing. Springer Verlag (Berlin).
- Saíenz, G., E. 2012. Estudio de procesos de plasma polimerización de recubrimientos antifricción sobre materiales plásticos. Proyecto de fin de carrera. Pp.118.



- Sánchez, M., R. 2011. Tratamiento de agua residual municipal en reactores con Biopelículas aerobias. *Cienciacierta* N. 26.
- Solano, J., K., Rangel, M., P., Castillo, E., F. 2006. Evaluación operacional de un sistema a escala laboratorio de Biopelícula anaerobia soportada para el tratamiento de aguas residuales domésticas. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingeniería Físico Químicas. *Revista Investigación Organización y Nuevos Procesos en Ingeniería (ION)*. 19(1). Pp. 16-22.
- Stoodley, P., Sauer, K., Davies, D., G., Costerton, J., W. 2002. Biofilms as complex differentiated communities. *Annual Review of Microbiology*. Vol 56. Pp. 187-209.
- Stoodley, P., Debeer, D., Longwell, M., Nistico, L., Hall-Stoodley, L., Wenig, B., Krespi, Y., P. 2009. Tonsillolith: not just a stone but a living biofilm. *Otolaryngology Head and Neck Surgery*. 141 (3). Pp.316-321.
- Sutherland, I., W. 2001. The biofilm matrix – an immobilized but dynamic microbial environment. *Trends in Microbiology*. 9(5). Pp. 223-226.
- Tejero, M., J., Esteban, G., A., De Florio, L., Díez, M., R., García.,C., A., Rodríguez, H., L. 2012. Tecnologías de biopelícula innovadoras para la depuración de aguas residuales: veinticinco años de investigación del Grupo de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Cantabria. *Ingeniería civil*. Pp. 61-70.
- Xavier, J., B., Foster, K., R. 2007. Cooperation and conflict in microbial biofilms. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 104 (3). Pp. 876-871.
- Yildirim, E., D., Ayan H, Vasilets, V., Fridman, A., Guceri, S., Sun., W. 2008. Effect of Dielectric Barrier Discharge Plasma on the Attachment and Proliferation of Osteoblasts Cultured over Poly(e-caprolactone) Scaffolds. *Plasma Processes and Polymers*. 5(1). Pp. 58-66.

### Abreviaturas

CO<sub>2</sub>: Dióxido de Carbono

CH<sub>4</sub>: Metano

DQO: Demanda Química de Oxígeno

H<sub>2</sub>: Dihidrógeno

H<sub>2</sub>S: Sulfuro de Hidrógeno

K: Potasio

LAN: Ley de Aguas Nacionales

N: Nitrógeno

P: Fósforo

PPy: Polipirrol

PANi: Polianilina

PU: Poliuretano

PTAR: Planta de Tratamiento de Aguas Residuales

pH: Potencial de Hidrógeno

SPE: Sustancia Polimérica Extracelular

TGA: Termogravimétrico