



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE MACHALA**  
**“CALIDAD, PERTINENCIA Y CALIDEZ”**  
**UNIDAD ACADÉMICA DE CIENCIAS QUÍMICAS Y DE LA SALUD**  
**CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN AL TÍTULO DE**  
**INGENIERA QUÍMICA**

**TEMA:**

**UTILIZACION DE MATERIALES DE RECICLAJE COMO MEDIO DE**  
**SOPORTE EN REACTORES AEROBIOS DE BIOPELÍCULA PARA**  
**TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA**

**AUTORA:**

**PRISCILLA ALEJANDRA ROMERO GRANDA**

**TUTOR:**

**ING. BYRON LAPO CALDERÓN**

**MACHALA – EL ORO – ECUADOR**

**2015**

## **CERTIFICACIÓN**

Que he supervisado el siguiente trabajo de investigación titulado **“UTILIZACION DE MATERIALES DE RECICLAJE COMO MEDIO DE SOPORTE EN REACTORES AEROBIOS DE BIOPELÍCULA PARA TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA”**, desarrollado por la Srta. Priscilla Alejandra Romero Granda, el mismo que está de acuerdo con lo instituido por la carrera de Ingeniería Química de la Unidad Académica de Ciencias Químicas y de la Salud de la Universidad Técnica de Machala, por lo que autorizo su presentación.

---

**ING. QUÍMICO. BYRON LAPO CALDERÓN**  
**TUTOR**

## **CESIÓN DE DERECHOS DE AUTORÍA**

Yo, Priscilla Alejandra Romero Granda, con cédula de identidad 070499045-6, egresada de la carrera de Ingeniería Química de la Unidad Académica de Ciencias Químicas y de la Salud, de la Universidad Técnica de Machala responsable del presente Trabajo de Titulación titulado: “UTILIZACION DE MATERIALES DE RECICLAJE COMO MEDIO DE SOPORTE EN REACTORES AEROBIOS DE BIOPELÍCULA PARA TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA”. Certifico que la responsabilidad de la investigación, resultados y conclusiones del presente trabajo pertenecen exclusivamente a mi autoría; una vez que ha sido aprobada por mi tribunal de sustentación autorizando su presentación. Deslindo a la Universidad Técnica Machala de cualquier delito o plagio y cedo mis derechos de autora a la Universidad Técnica de Machala para que ella proceda a darle el uso que crea conveniente.

Priscilla Alejandra Romero Granda

C.I. 070499045-6

AUTORA

## **RESPONSABILIDAD**

Yo, Priscilla Alejandra Romero Granda, autora del presente trabajo de titulación cuyo tema es: **“UTILIZACION DE MATERIALES DE RECICLAJE COMO MEDIO DE SOPORTE EN REACTORES AEROBIOS DE BIOPELÍCULA PARA TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA”**, declaro que las investigaciones, resultados, conclusiones y recomendaciones expuestas es de mi exclusiva responsabilidad.

Priscilla Alejandra Romero Granda.

**AUTORA**

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios, por haberme permitido llegar hasta este momento tan importante de mi vida.

A mis padres y hermanos que fueron las personas que me supieron guiar con sus consejos y me brindaron su apoyo y me acompañaron en cada paso de la realización de mi tesis.

A mi tutor de tesis Ing. Químico. Byron Lapo Calderón, que con su guía y paciencia he culminado mi tesis.

## **DEDICATORIA**

La culminación de este proyecto está dedicada a mis padres, pilares fundamentales en mi vida. Sin ellos, no hubiese podido cumplir esta meta tan importante. Su tenacidad y lucha hacen que mis padres sean unos excelentes modelos a seguir en cualquier nueva meta que me proponga a seguir.

## ÍNDICE

CERTIFICACIÓN .....	II
CESIÓN DE DERECHOS DE AUTORÍA .....	III
RESPONSABILIDAD .....	IV
AGRADECIMIENTOS .....	V
DEDICATORIA .....	VI
ÍNDICE .....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS .....	IX
RESUMEN .....	XII
SUMMARY .....	XIII
INTRODUCCIÓN .....	1
PROBLEMA .....	2
JUSTIFICACIÓN .....	3
OBJETIVOS .....	4
OBJETIVO GENERAL .....	4
OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	4
VARIABLES .....	4
VARIABLE INDEPENDIENTE.....	4
VARIABLE DEPENDIENTE.....	4
HIPÓTESIS .....	5
1. REVISIÓN DE LITERATURA.....	6
1.1 AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS .....	6
1.1.1 COMPOSICIÓN TÍPICA .....	6
1.1.2 CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS.....	8
1.2 REACTOR BIOLÓGICO.....	9
1.2.1 TIPOS DE REACTORES BIOLÓGICOS AEROBIOS.....	10
1.2.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE LECHO MÓVIL.....	22
1.2.3 VENTAJAS FRENTE A PROCESOS BIOLÓGICOS CONVENCIONALES .....	24
1.3 BIOPELÍCULA .....	25
1.3.1 FORMACIÓN DE LA BIOPELÍCULA.....	26
1.3.2 MODELOS CONCEPTUALES DE LA ESTRUCTURA DE LA BIOPELÍCULA .....	28
1.3.3 ROL DE LA BIOPELÍCULA EN EL PROCESO DEL TRATAMIENTO.....	31
1.3.4 COMPOSICIÓN MICROBIOLÓGICA DE LA BIOPELÍCULA.....	32
1.3.5 INTERACCIONES ENTRE LOS MICROORGANISMOS EN LA BIOPELÍCULA.....	34
1.3.6 REACCIONES BIOLÓGICAS ESQUEMÁTICAS .....	34
1.3.7 CINÉTICA DEL CRECIMIENTO BACTERIANO .....	36
1.4 MATERIALES DE SOPORTE .....	39
1.4.1 CARACTERÍSTICA DE LOS MEDIOS DE SOPORTE .....	40
1.4.2 TIPOS DE MATERIALES DE SOPORTE .....	41

2. MATERIALES Y MÉTODOS .....	44
2.1 MATERIALES .....	44
2.1.1 MATERIALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LOS REACTORES DE BIOPELÍCULA .....	44
2.1.2 MATERIALES PARA LOS DISTINTOS TIPOS DE ANÁLISIS REALIZADOS .....	44
2.1.3 REACTIVOS.....	45
2.2 DIMENSIONES DE LOS REACTORES .....	45
2.3 MEDIOS DE SOPORTE.....	46
2.3.1 POLIETILENO TEREFALATO – PET.....	47
2.3.2. POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD – HDPE.....	48
2.3.3 POLIPROPILENO – PP .....	49
2.4 AGUA RESIDUAL.....	49
2.5 MONTAJE DEL EQUIPO .....	50
2.6 ANÁLISIS QUÍMICOS .....	52
2.6.1 DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO SOLUBLE (DQO <sub>s</sub> ).....	52
2.6.2 NITRÓGENO TOTAL .....	52
2.6.3 FÓSFORO TOTAL .....	53
2.7 ANÁLISIS FÍSICOS.....	54
2.7.1 SÓLIDOS SUSPENDIDOS VOLÁTILES (SSV) .....	54
2.7.2 SÓLIDOS SUSPENDIDOS VOLÁTILES INMOVILIZADOS (SSVi) .....	55
3. RESULTADOS Y DISCUSIONES .....	56
3.1 ESTUDIO DE CAMPO EN LAS RECICLADORAS.....	56
3.2 PARÁMETROS DEL AGUA RESIDUAL DEL CANAL EL MACHO .....	57
3.3 SUPERFICIE ESPECÍFICA DEL PLÁSTICO EN LOS REACTORES .....	57
3.4 COMPORTAMIENTO DE LA DQO.....	59
3.5 CARGA ORGÁNICA SUPERFICIAL.....	60
3.6 PORCENTAJE DE EFICIENCIA EN LA DEGRADACIÓN DE DQOs.....	60
3.7 SÓLIDOS SUSPENDIDOS VOLÁTILES .....	61
3.8 FORMACIÓN DE LA BIOMASA.....	63
4. CONCLUSIONES .....	64
5. RECOMENDACIONES .....	65
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	66
7. ANEXOS .....	69
ANEXO A: ENCUESTAS REALIZADAS A LAS RECICLADORAS EN LA CIUDAD DE MACHALA .....	69
ANEXO B: COMPARACIÓN ESTADÍSTICA SIGNIFICATIVA DE LOS DISTINTOS TIPOS DE REACTORES .....	73
ANEXO C: ANÁLISIS DE NITRÓGENO TOTAL REALIZADOS EN LA EMPRESA NEMALAB .....	74
ANEXO D: REGISTRO FOTOGRÁFICO DE EQUIPOS PARA ANALISIS QUÍMICOS.....	75
ANEXO E: REGISTRO FOTOGRÁFICO DE EQUIPOS PARA ANALISIS FÍSICOS.....	78
ANEXO F: BIOPELÍCULA ADHERIDA AL MATERIAL PLASTICO .....	81

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Tanque de lodos activados con aeración por difusión. ....	11
Figura 2. Diagrama de un sistema típico de lodos activados. ....	12
Figura 3. Diagrama de flujo de proceso completamente mezclado. ....	13
Figura 4. Diagrama de flujo de contacto-estabilización. ....	13
Figura 5. Diagrama de flujo de una zanja de oxidación. ....	14
Figura 6. Diagrama de flujo para aeración por etapas. ....	15
Figura 7. Alimentación escalonada. ....	15
Figura 8. Proceso por lotes. ....	16
Figura 9. Aeración a contracorriente. ....	17
Figura 10. Filtros percoladores. ....	19
Figura 11. Discos biológicos rotativos. ....	20
Figura 12. Nivel de sumersión de un disco biológico. ....	21
Figura 13. Discos de inyección de aire. ....	21
Figura 14. Arreglo de los discos. ....	22
Figura 15. Reactor MBBR. ....	22
Figura 16. Fases para la adhesión de la biopelícula. ....	26
Figura 17. Etapas de la formación de la biopelícula. ....	27
Figura 18. Formación de la Biopelícula. ....	28
Figura 19. Modelo del canal de agua. ....	29
Figura 20. Modelo del mosaico heterogéneo. ....	30
Figura 21. Modelo de película densa. ....	30
Figura 22. Microbiología de la biopelícula. ....	33
Figura 23. Curva de crecimiento bacteriano. ....	37
Figura 24. Polietileno de alta densidad (HDPE) poco ramificado. ....	43
Figura 25 y Figura 26. Material de Polietileno tereftalato. ....	47
Figura 27. Tiras de Polietileno tereftalato. ....	47
Figura 28. Material de Polietileno de alta densidad. ....	48
Figura 29. Tira de Polietileno de alta densidad. ....	48
Figura 30. Material de Polipropileno. ....	49
Figura 31. Toma del agua residual doméstica en el canal El Macho. ....	50
Figura 32. Reactores aerobios de lecho móvil (MBBR). ....	50

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición típica de las aguas residuales domésticas .....	7
Tabla 2. Requisitos que debe tener un medio de soporte. ....	40
Tabla 3. Características del material de soporte empleado en reactores aerobios .....	40
Tabla 4. Características físicas de los reactores aerobios.....	45
Tabla 5. Dimensiones de los medios de soporte para los reactores.....	46
Tabla 6. Variables de Operación sin Modificación.....	46
Tabla 7. Cantidad de material plástico reciclado en la ciudad de Machala .....	56
Tabla 8. Parámetros del agua obtenida del canal El Macho.....	57
Tabla 9. Superficie específica total de la cantidad de plástico introducida en cada de los reactores .....	58
Tabla 10. Cantidad promedio de plástico introducido en cada grupos de reactores.....	58

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Distribución del porcentaje de materiales plásticos reciclado en la ciudad de Machala .....	56
Gráfica 2. Promedio de la superficie específica del plástico en cada grupo de reactores.....	58
Gráfica 3. Variación de la DQO con respecto al tiempo.....	59
Gráfica 4. Carga Orgánica Superficial .....	60
Gráfica 5. Porcentaje de Eficiencia en la degradación de DQOs .....	61
Gráfica 6. Incremento de los Sólidos Suspendidos Volátiles.....	62
Gráfica 7. Biomasa Formada en los Medios de Soporte.....	63

## RESUMEN

La presente investigación se la realizó para establecer si los materiales plásticos reciclables usados durante la experimentación son útiles para el crecimiento de la biopelícula, debido a que estos plásticos son fáciles de conseguir y además son de bajo costo.

De acuerdo con las encuestas realizadas en diferentes empresas recicladoras de la ciudad de Machala, se determinó que los materiales plásticos con mayor demanda fueron las tapas y botellas plásticas, ya que las tapas representan el 46,12% del material reciclado al igual que las botellas plásticas.

Durante los 3 meses estos materiales plásticos: PET (botellas plásticas), HDPE (botellas de desinfectante) y PP (tapas plásticas) fueron evaluados en reactores aerobios de lecho móvil de 4 L tipo laboratorio, rellenándose así dos recipientes con tiras de plástico PET de 6 cm x 2 cm, dos recipientes con tiras de plástico HDPE de 6 cm x 2 cm y dos recipientes más con plástico PP de 131.04 cm<sup>2</sup> aproximadamente, de tal manera que el plástico ocupara un 70% del volumen del reactor.

El agua residual se la obtuvo del Canal El Macho de la ciudad de Machala cuya DQOs inicial fue de 1878 mg/L y el área específica del plástico PET fue de 626,31 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>, del HDPE fue de 235,70 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> y del PP fue de 479,86 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> respectivamente.

En los seis reactores la carga orgánica expresada en gr de DQOs durante todo el proceso de la experimentación fue de 30,57 g de DQOs.

La concentración de biomasa adherida a los medios de soporte fue mayor en el plástico HDPE con un valor de 0.227 g SSV/ml mientras que en el PET y en el plástico PP la biomasa adherida fue de 0.171 g SSV/ml y 0.169 g SSV/ml.

## SUMMARY

This research was conducted to determine whether the recyclable plastic materials used for experimentation are useful for the growth of the biofilm, because these plastics are easily available and are also inexpensive.

According to surveys conducted in different recycling companies in the city of Machala, it was determined that the plastic materials most in demand were the caps and plastic bottles as caps representing 46.12% of recycled material like bottles plastic.

For 3 months these plastic materials: PET (plastic bottles), HDPE (bottles disinfectant) and PP (plastic caps) were evaluated in aerobic moving bed reactors 4 L laboratory type and completely filling two containers with plastic strips PET 6 cm x 2 cm, two containers with HDPE plastic strips 6 cm x 2 cm and two plastic containers PP 131.04 cm<sup>2</sup>, so that the plastic occupy 70% of the reactor volume.

The wastewater was obtained from Canal El Macho city of Machala whose initial soluble COD was 1878 mg / L and the specific area of PET plastic was 626.31 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>, HDPE was 235.70 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> and the PP was 479.86 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> respectively.

In the six reactors the organic load expressed in grams of soluble COD during the entire process of experimentation was 30.57 g of SCOD.

The concentration of biomass attached to the support means was greater in the HDPE plastic with a value of 0.227 g SSV/ml while the PET and PP plastic adherent biomass SSV was g SSV/ml and 0.169g SSV/ml.

## INTRODUCCIÓN

Debido a que en nuestro país se desecha gran cantidad de materiales plásticos todos los días, es necesario buscar nuevas formas de reutilizar estos materiales, es por esto que se buscó en distintas empresas recicladoras de la ciudad de Machala el material plástico con mayor demanda en el mercado para así utilizarlo como medio de soporte para los nuevos métodos de tratamiento de aguas residuales que se están desarrollando hoy en día, además de esta manera también se estaría ayudando al ambiente a reducir la contaminación generada por los desechos plásticos que son arrojados al suelo por las personas.

Los métodos usados para el tratamiento de aguas residuales domesticas en nuestro país no son muy eficientes en comparación a nuevos métodos de tratamiento que se han desarrollado en los últimos tiempos.

Estas nuevas técnicas como por ejemplo el uso de reactores aerobios de lecho móvil y de lecho fijo son de uso común en países desarrollados ya que en estas técnicas de tratamiento de agua residual doméstica se usan las mismas bacterias las cuales se adhieren a los medios de soporte degradando así tanto la materia orgánica como la inorgánica y de esta manera poder tratar de forma más eficientes a estas aguas residuales.

Aunque en nuestro país, implementar estos nuevos tipos de tecnología son muy costosos debido a que es necesario exportar de otros países el material plástico o medios de soporte, por este motivo se está investigando el uso de otros tipos de materiales plásticos como por ejemplo plástico reciclado a los cuales se los puede conseguir de manera mucho más fácil en las plantas recicladoras, además de que no son costosos como comprar estos medios de soporte en empresas extranjeras.

## **PROBLEMA**

Las aguas residuales, son aguas de desecho producidas por las personas al realizar diferentes actividades diarias en los hogares como por ejemplo las aguas provenientes de los baños, lavanderías, cocinas, etc., las cuales son vertidas directamente en los canales de agua.

Estas aguas contienen una gran cantidad de materia orgánica, la cual al irse descomponiendo provoca la aparición de microorganismos dañinos, los cuales hacen que estas aguas sean peligrosas para la población.

Aunque los métodos convencionales que existen para tratar estas aguas en la mayoría de los casos generan residuos químicos, que al irse acumulando en el fondo de los equipos usados para tratar estas aguas, con el tiempo generan no solo daños en las maquinarias sino también al ambiente, ya que estos compuestos al no ser tratados no se los puede volver a reutilizar en los procesos de tratamiento de aguas residuales.

Existen otros métodos más eficientes para el proceso de depuración de estas aguas residuales sin el uso de compuestos químicos, como por ejemplo el uso de los reactores de lecho fijo o también conocidos como MBBF, donde los mismos microorganismos se adhieren a los materiales de soporte que se encuentra dentro del reactor formando las llamadas biopelículas o biofilms, las cuales se encargan de degradar la materia orgánica presente en las aguas residuales.

## **JUSTIFICACIÓN**

A lo largo del canal de El Macho se pueden observar asentamientos de personas que viven cerca al canal, ya que debido a que estas personas no poseen un sistema de alcantarillado, todos sus desechos son enviados directamente al canal, provocando así daños ambientales y a la salud de los pobladores.

Esta investigación es de carácter teórico debido a que es necesario tener los conocimientos apropiados sobre el tratamiento de aguas residuales. Y carácter práctico, debido a que se va a determinar si los materiales plásticos reciclables se los puede utilizar como medios de soporte para la formación de la biopelícula.

De acuerdo a los objetivos del Plan Nacional del Buen Vivir, este tema se relaciona con el Objetivo 3: Mejorar la calidad de vida de la población: Buscamos condiciones para la vida satisfactoria y saludable de todas las personas, familias y colectividades respetando su diversidad. Fortalecemos la capacidad pública y social para lograr una atención equilibrada, sustentable y creativa de las necesidades de ciudadanas y ciudadanos. Además también se relaciona con el Objetivo 4: Garantizar los derechos de la naturaleza y promover un ambiente sano y sustentable: Promovemos el respeto a los derechos de la naturaleza. La Pacha Mama nos da el sustento, nos da agua y aire puro. Debemos convivir con ella, respetando sus plantas, animales, ríos, mares y montañas para garantizar un buen vivir para las siguientes generaciones.

La constitución política de la República del Ecuador dispone en su artículo 23, numeral 6, que el Estado reconocerá y garantizará a las personas el derecho a vivir en un medio ambiente sano, ecológicamente equilibrado y libre de contaminación, reservándose la ley de prerrogativa de establecer restricciones al ejercicio de determinados derechos y libertades, con el objetivo de proteger el medio ambiente.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Determinar la efectividad de varios materiales reciclables para ser utilizados en reactores aerobios de biopelícula en el tratamiento de agua residual doméstica.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Determinar cuáles son los materiales reciclables con más oferta en la ciudad de Machala.
- Evaluar tres materiales reciclables como medio de soporte.
- Determinar la cantidad de biomasa adherida en cada material residual.

## **VARIABLES**

### **VARIABLE INDEPENDIENTE**

- Tipo y cantidad de Material de soporte utilizado
- Carga orgánica suministrada
- Área total del medio de soporte en el bioreactor

### **VARIABLE DEPENDIENTE**

- Cantidad de biomasa activa (adherida en el medio de soporte)
- Eficiencia lograda (% de DQO removida)

## **HIPÓTESIS**

Se pueden usar plásticos reciclados como medio de soporte para el desarrollo y crecimiento de la biopelícula para que esta cumpla la función de depuración del agua residual domestica logrando así la disminución de la DQOs en la misma.

## **1. REVISIÓN DE LITERATURA**

### **1.1 AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS**

Este es el nombre dado al agua de desecho generada en los hogares. Presenta variaciones y fluctuaciones en el gasto y la composición a lo largo del día y del año, debido a las actividades hogareñas. Es frecuente que el flujo que llega a las plantas de tratamiento (influentes) contenga agua residual doméstica, industrial y pluvial. El agua residual urbana o doméstica, frecuentemente, es de color gris, tiene turbiedad y material flotante. Cabe destacar que, comúnmente, la contaminación la constituye un pequeño porcentaje de sólidos, del orden del 0.1 % (1,000 mg/L) (Jiménez, 2001).

#### **1.1.1 COMPOSICIÓN TÍPICA**

Las aguas residuales domésticas son peligrosas debido a la posible presencia de una alta población de microorganismos patógenos. Contienen, sobretodo, bacterias Escherichia coli, las que generalmente son inocuas y suelen estar presentes en los intestinos del hombre y de los animales de sangre caliente, agrupándose en colonias. Estas sirven como indicadores de contaminación fecal. Aproximadamente entre  $10^{11}$  y  $10^{13}$  bacterias coli son evacuadas en las aguas residuales diariamente por una persona. El número total de bacterias, incluidos los grupos que se consideran inofensivos, es casi  $10^3$  veces mayor (Mackenzie, 2005).

Los microorganismos están presentes en las aguas residuales en forma de virus y bacterias (como las salmonellas causantes de la tifoidea o paratifoideas) y en forma de parásitos como por ejemplo huevos de helmintos. Estos microorganismos provienen de hospitales, de viviendas de personas infectadas, de portadores de enfermedades, etc. El agua residual tratada no es bacteriológicamente pura y, en algunos casos, es necesario esterilizarla, además de aplicarle un tratamiento mecánico-biológico (Mackenzie, 2005).

Aparte de organismos patógenos, en las aguas residuales domésticas están presentes bacterias no patógenas que descomponen la materia orgánica mediante procesos de

hidrólisis, reducción y oxidación. En esta descomposición también participan fermentadores y enzimas. Finalmente, esta agua contiene también hormonas, estimulantes y vitaminas provenientes de las excretas de personas y animales (Mackenzie, 2005).

Los valores de carga de las aguas residuales domésticas no suelen ser utilizadas al diseñar las plantas de tratamiento de aguas residuales. Su cálculo puede ser necesario sólo en casos específicos como el de edificaciones aisladas o plantas de tratamiento muy pequeñas (Mackenzie, 2005).

En la Tabla 1 podemos observar la composición del agua residual domestica sin tratamiento previo:

**Tabla 1.** Composición típica de las aguas residuales domésticas

PARÁMETROS	CONCENTRACIÓN (mg/Lt)		
	FUERTE	MEDIO	DÉBIL
<b>Sólidos Totales</b>	1200	720	350
<b>Sólidos disueltos totales</b>	850	500	250
<b>Fijos</b>	525	300	145
<b>Volátiles</b>	352	200	105
<b>Sólidos suspendidos totales</b>	350	220	100
<b>Fijos</b>	75	55	20
<b>Volátiles</b>	275	165	80
<b>Sólidos Sedimentables</b>	20	10	5
<b>Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>) A 20°C</b>	400	220	110
<b>Carbono Orgánico Total (COT)</b>	290	160	80
<b>Demanda Química de Oxígeno (DQO)</b>	1000	500	250
<b>Nitrógeno (total como N)</b>	85	40	20
<b>Orgánico</b>	35	15	8
<b>Amoniaco libre</b>	50	25	12
<b>Nitritos</b>	0	0	0
<b>Nitratos</b>	0	0	0
<b>Fósforo (total como N)</b>	15	8	4
<b>Orgánico</b>	5	3	1
<b>Inorgánico</b>	10	5	3
<b>Fósforo (total como N)</b>	200	100	50
<b>Grasa y aceites</b>	150	100	50

Fuente: Metcalf & Eddy, 1991

## **1.1.2 CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS**

### **1.1.2.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS**

El agua residual domestica fresca y aeróbica tiene el olor del queroseno o de tierra recién revuelta. Las aguas residuales envejecidas y sépticas son bastante más ofensivas al sentido del olfato. Las frescas tienen un color gris característico. Las sépticas son de color negro. Este color se debe a la precipitación de sulfuro de hierro.

Las temperaturas de las aguas residuales oscilan, normalmente, entre 10 y 20°. En general, la temperatura del agua residual será mayor que la del suministro de agua, debido a la adición de agua tibia de los hogares y al alcantarillado dentro del sistema de drenaje de la estructura (Mackenzie, 2005).

### **1.1.2.2 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS**

Como la cantidad de sustancias químicas presentes en las aguas residuales es así ilimitada, normalmente se limitara la descripción a unos cuantos tipos generales. Con frecuencia, estos tipos de sustancias se conocen mejor por el nombre de la prueba que se usa para medirlos, la cual incluye a los compuestos orgánicos volátiles (Mackenzie, 2005).

Los COVs son sustancias químicas orgánicas cuya base es el carbono y se evaporan a temperatura y presión ambiental generando vapores, que pueden ser precursores del ozono en la atmosfera. Además del carbono es posible hallar en su composición hidrogeno, flúor, oxigeno, cloro, bromo, nitrógeno o azufre (Mackenzie, 2005).

### **1.1.2.3 CARACTERÍSTICAS BIOLÓGICAS**

Fundamentalmente, en las aguas residuales domesticas predominan las bacterias. De todas ellas, las que más llaman la atención son las enterobacterias responsables de enfermedades, como gastroenteritis, fiebres tíficas y paratíficas, cólera, etc. (Bódalo Santoyo, Gómez, & Fuensanta Máximo, 2002).

El control de estas bacterias es verdaderamente riguroso en todas las legislaciones sanitarias, usándose la presencia de *Escherichia coli* como indicador de contaminación fecal. Esta indicación es importante por existir una coincidencia con el recuento de bacterias en el suelo, ya que las cifras se dan, en valor, como total de coliformes (Bódalo Santoyo, Gómez, & Fuensanta Máximo, 2002).

Está claro que, el componente orgánico de las aguas residuales, es un medio de cultivo que permite el desarrollo de los microorganismos que cierran los ciclos biogeoquímicos de elementos como el azufre, el carbono, el nitrógeno y el fosforo, entrando frecuentemente en competencia, y eliminando los elementos microbianos patógenos que se encuentran en el medio (Bódalo Santoyo, Gómez, & Fuensanta Máximo, 2002).

## **1.2 REACTOR BIOLÓGICO**

Por definición un bioreactor es un sistema en el que una conversión biológica se lleva a cabo, y puede aplicarse a cualquier conversión realizada por enzimas, microorganismos, células animales o vegetales (Sinclair, 2008).

En cuanto a los reactores biológicos y partiendo de la base cabe indicar que hay dos tipos de reactores biológicos: aerobios y anaerobios. Son dos tipos puros que existen pero también hay combinaciones de anaerobio y aerobio como ya se ha visto (Aguirre, 2013).

Loas anaerobios son aquellos que tienen ausencia estricta de oxígeno, es decir que no solo no se les introduce oxígeno de manera exógena (por soplantes por ejemplo) sino que tampoco de manera indirecta, como pueda ser recirculando corrientes que tienen

alta oxigenación (en ese caso sería un reactor anóxico). No depuran tanto como el aerobio pero necesitan un coste de mantenimiento muy bajo y sacan muy pocos fangos y además producen metano que se puede usar para calentar casas o comidas o como energía (Aguirre, 2013).

Los reactores aerobios son más caros porque necesitan aporte constante de oxígeno, pero consiguen altas reducciones de materia orgánica. Hay muchas combinaciones y tipos como los MBR, MBBR, SBR, fangos activos convencionales, etc., depuran más, son más caros de mantener y estos reactores son comunes en Norteamérica y Europa (Aguirre, 2013).

### **1.2.1 TIPOS DE REACTORES BIOLÓGICOS AEROBIOS**

Los reactores biológicos se clasifican con base en la forma en que la población microbiana se encuentra dentro del reactor. Se conoce como biomasa suspendida a aquellos reactores que no utilizan un medio de soporte y los microorganismos forman agregados conocidos como flóculos (Calderón Mólgora, 2005).

Cuando el reactor cuenta con un medio, ya sea natural o sintético, que sirve de soporte para que se desarrolle la comunidad microbiana en forma de “lama” o película, se dice que es un reactor de biomasa fija (Calderón Mólgora, 2005).

Los lodos activados y los filtros percoladores son de uso frecuente en México, otros reactores como los anaerobios de lechos expandidos o los lodos activados con aeración a contracorriente son incipientes en el país. Asimismo, hay otros sistemas que no se utilizan en México o, en su defecto, su uso principal no es el tratamiento del agua residual sino el tratamiento de los lodos de desecho (Calderón Mólgora, 2005).

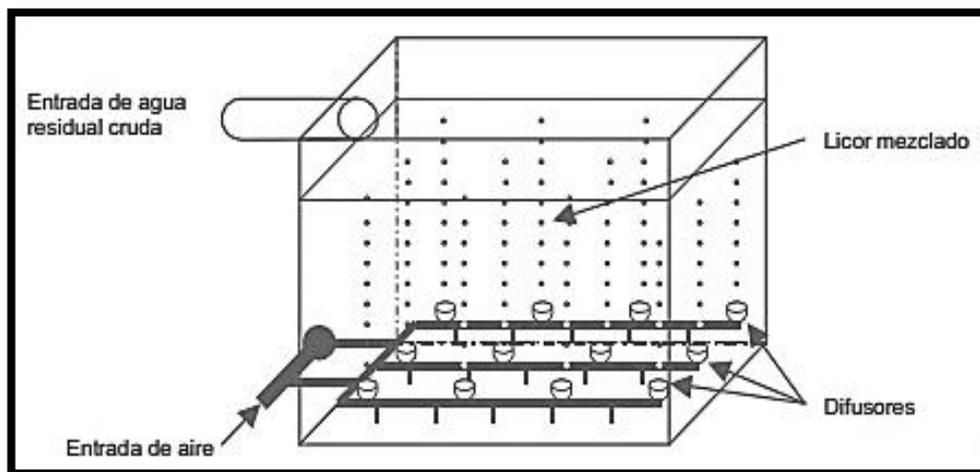
#### **1.2.1.1 REACTORES AEROBIOS DE BIOMASA EN SUSPENSIÓN**

Este grupo está representando por el sistema conocido como lodos activados. Los lodos activados están constituidos por cinco elementos (Figura 1 y Figura 2): el tanque

aeración, el sistema de aeración, el sedimentador, la línea de recirculación y la línea de purga.

En el tanque de aeración se mezclan la materia orgánica, los microorganismos y el oxígeno disuelto; esta mezcla se conoce como licor mezclado (Calderón Mólgora, 2005).

**Figura 1.** Tanque de lodos activados con aeración por difusión.

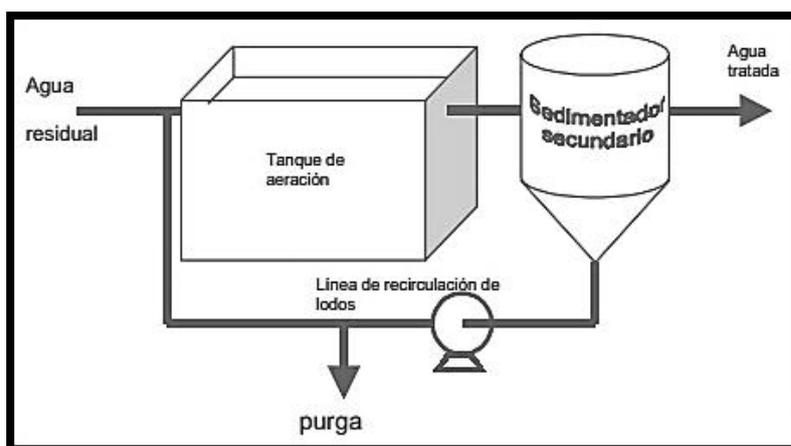


**Fuente:** Serie autodidáctica de la medición de la calidad del agua.

Una vez que la mezcla abandona el reactor entra en un sedimentador secundario, en el cual se separa la biomasa del agua; la biomasa o lodo precipita hacia el fondo del sedimentador (Calderón Mólgora, 2005).

Estos lodos se regresan al tanque de aeración para mantener una concentración determinada de microorganismos. Como la reproducción de microorganismos es muy alta, parte de ese lodo se tiene que desechar del sistema y tratarse para convertirlo en un residuo inocuo antes de su disposición final (Calderón Mólgora, 2005).

**Figura 2.** Diagrama de un sistema típico de lodos activados.



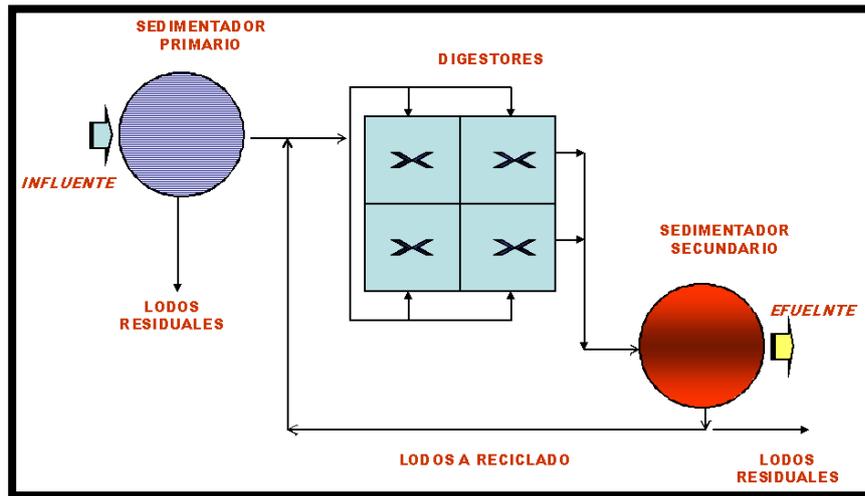
**Fuente:** Serie autodidáctica de la medición de la calidad del agua.

Existen muchas variantes de este proceso, pero en esencia todas contienen estos cinco elementos. Las diferencias están dadas por la forma en la que se alimenta el agua residual, la manera en que se suministra el aire y por los tiempos de retención hidráulico y celular (Calderón Mólgora, 2005). Las variantes más conocidas son las siguientes:

#### ▪ **Completamente mezclado o convencional**

Es un reactor completamente mezclado y por ello se puede esperar, en cualquier punto del tanque de aeración, la misma concentración de materia orgánica, de microorganismos y de oxígeno disuelto (Figura 3). El tiempo de retención hidráulico es de cuatro a ocho horas (Calderón Mólgora, 2005).

**Figura 3.** Diagrama de flujo de proceso completamente mezclado.



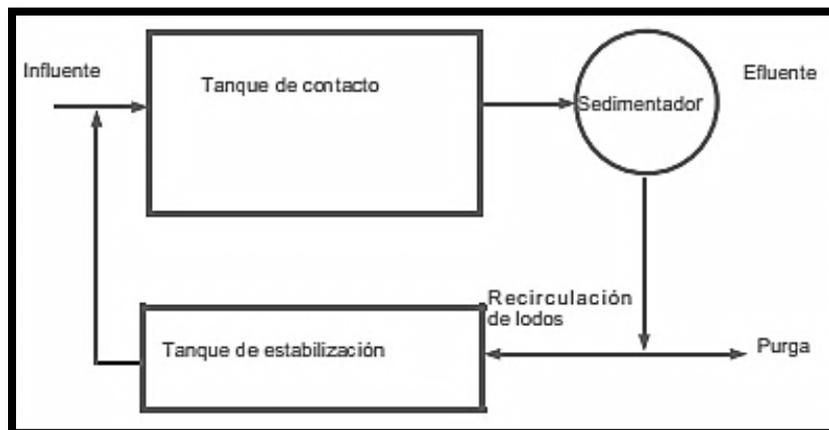
Fuente: OoCities.org

#### ▪ Contacto-estabilización

En esta variante el reactor está dividido en dos tanques (Figura 4). El agua cruda entra en contacto con los microorganismos y se aérea por un periodo corto (1 hora aproximadamente) (Calderón Mólgora, 2005).

Las bacterias adsorben la materia orgánica. El licor mezclado pasa al sedimentador y los lodos decantados se envían al tanque de estabilización, en este tanque se suministra aire y las bacterias digieren la materia orgánica (Calderón Mólgora, 2005).

**Figura 4.** Diagrama de flujo de contacto-estabilización.



Fuente: Serie autodidáctica de la medición de la calidad del agua.

### ■ Aeración extendida, zanja de oxidación y proceso carrusel

El tiempo de retención hidráulico es de 18 a 36 horas (de cuatro y media a nueve veces mayor que el proceso convencional). En este caso se tiene un flujo pistón y el tanque puede tener forma rectangular u oval (zanja de oxidación o proceso carrusel, ver (Figura 5). El suministro de aire puede ser por difusores, por el cepillo Pasveer o aeradores flotantes de flecha hueca tipo cañón. (Calderón Mólgora, 2005).

Por los tiempos de retención tan grandes suele generar efluentes nitrificados, pocos lodos de desecho y éstos se hallan parcialmente digeridos (Calderón Mólgora, 2005).

**Figura 5.** Diagrama de flujo de una zanja de oxidación.

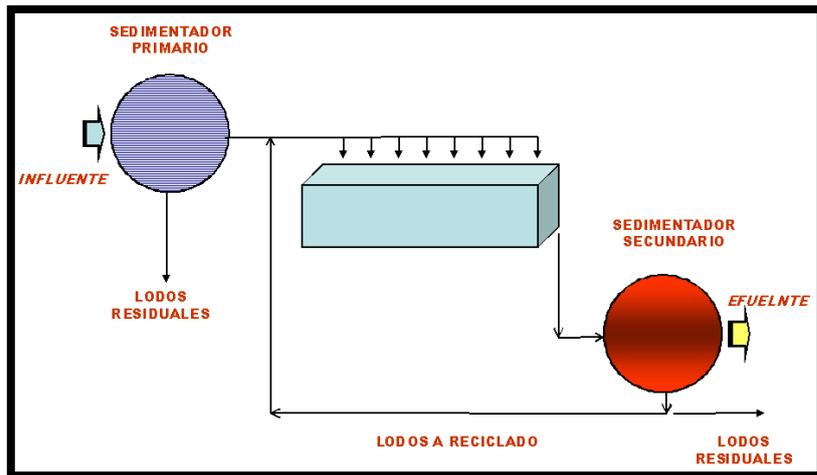


**Fuente:** OoCities.org

### ■ Aeración por etapas

Lo que hace esta variante es disminuir progresivamente la inyección del aire a lo largo del tanque. Opera bajo el principio del flujo pistón y en la medida en que el agua avanza, contiene menos materia orgánica, por lo mismo, requiere menos oxígeno y se inyecta menos aire (Figura 6) (Calderón Mólgora, 2005).

**Figura 6.** Diagrama de flujo para aeración por etapas.

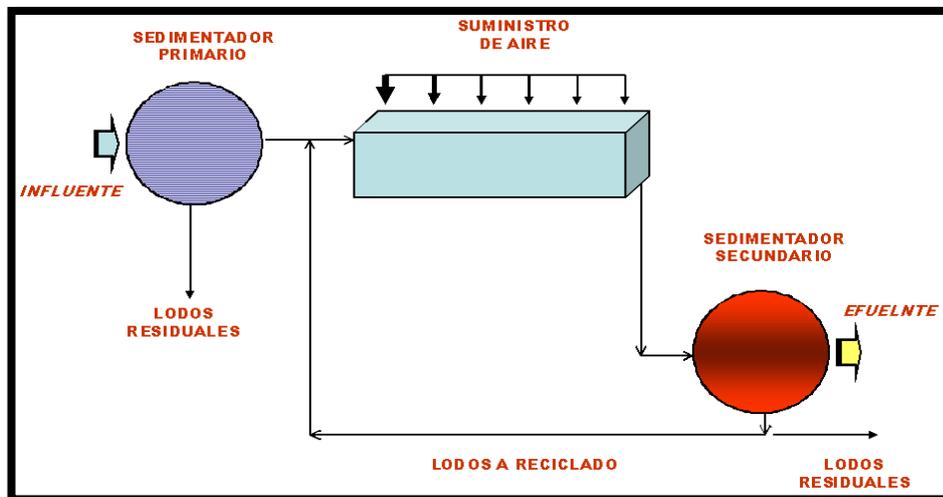


Fuente: OoCities.org

▪ **Alimentación escalonada**

En esta variante se introduce el agua residual en varios puntos a lo largo del tanque de aeración y se mantiene un nivel uniforme de materia orgánica, aire y microorganismos. (Calderón Mólgora, 2005). De esta forma se evitan demandas excesivas de aire en algún punto del reactor (Figura 7).

**Figura 7.** Alimentación escalonada.



Fuente: OoCities.org

## ■ Proceso por lotes o batch

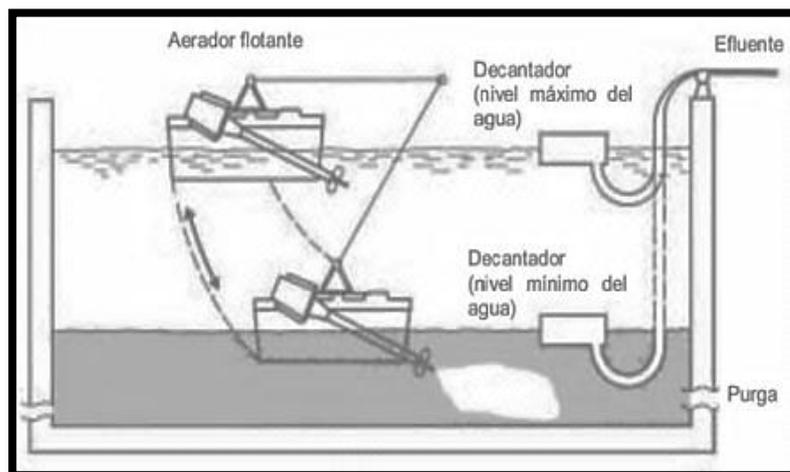
El proceso por lotes tiene la peculiaridad de que todo el tratamiento se realiza en un solo tanque. Para operar en forma continua se requiere de por lo menos dos tanques que trabajen desfasados, mientras uno trata el agua residual, el otro recibe el influente (Calderón Mólgora, 2005).

El reactor (Figura 8) se llena con agua residual, se aérea, se deja sedimentar, se extrae el agua y nuevamente se llena. Esta variante, fue la primera forma en que funcionaron los lodos activados, pero cayó en desuso (Calderón Mólgora, 2005).

Hacia 1990 se retomó el proceso ya que ofrece muchas ventajas, entre otras, el ser especialmente apto para tratar aguas difíciles, incluso, facilita el manejo de ciclos combinados (anaerobio-aerobio-anóxico) para la remoción de nutrientes (Calderón Mólgora, 2005).

En México, muchas empresas de servicio tales como clubes deportivos han optado por esta variante (Calderón Mólgora, 2005).

**Figura 8.** Proceso por lotes.

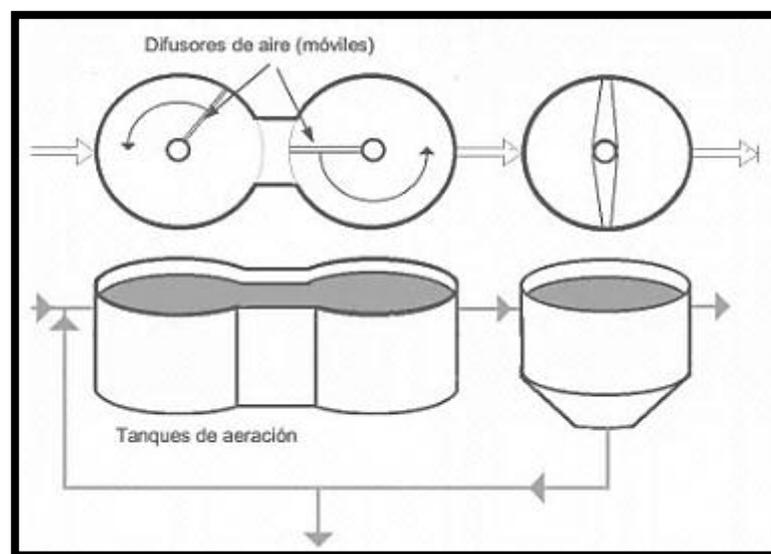


**Fuente:** Serie autodidáctica de la medición de la calidad del agua.

### ■ Aireación a contracorriente

Utiliza tanques circulares con profundidades de 2.5 a 5.2 m. Dependiendo del caudal y para dar tiempos de retención suficientes, se pueden conectar tanques circulares en serie (Figura 9). El sistema de inyección de aire consiste en tubos difusores, de burbuja fina, montados en un puente rotatorio de tracción lateral. El puente, además de llevar el difusor de aire, se encarga de mezclar el agua con los microorganismos. El tiempo de retención hidráulica es de 18 a 24 horas. En este caso, el aire no se utiliza para agitar el licor mezclado, sólo se usa para mantener los niveles necesarios de oxígeno disuelto. De esta forma el consumo de energía es más bajo que el de otras variantes y la tasa de transferencia de oxígeno es más alta (Calderón Mólgora, 2005).

**Figura 9.** Aeración a contracorriente.



**Fuente:** Serie autodidáctica de la medición de la calidad del agua.

### ■ Oxígeno puro

Este sistema inyecta una corriente de oxígeno en tanques cubiertos (Figura 10), para evitar que el oxígeno escape hacia la atmósfera. Logra niveles de actividad mayor y por lo mismo su tiempo de retención es de una a tres horas. Una de las plantas de

tratamiento de las aguas residuales de la ciudad de Monterrey (Dulces nombres) es un ejemplo de esta variante (Calderón Mólgora, 2005).

### **1.2.1.2 SISTEMAS AEROBIOS DE BIOMASA FIJA**

Este tipo de reactores se caracteriza por contar con un medio de soporte o empaque sobre el que se desarrolla una película biológica. Como empaque se utilizan piedras, madera y objetos plásticos de muchas formas. La película biológica está compuesta, principalmente, por bacterias y protozoarios (Calderón Mólgora, 2005).

El agua escurre sobre la película y de esta forma es que entra en contacto con los microorganismos y con el aire. Los sistemas aerobios de biomasa fija más comunes son los filtros percoladores y los discos biológicos rotativos (Calderón Mólgora, 2005).

Estos procesos, si bien suelen ser más estables y requieren menos operación que los sistemas de biomasa en suspensión, son más sensibles a la temperatura del ambiente y también a los fenómenos atmosféricos (Calderón Mólgora, 2005).

Así, en zonas de intensas precipitaciones pluviales y en zonas de inviernos muy fríos, es necesario que cuenten con cubiertas (Calderón Mólgora, 2005).

#### **■ Filtros percoladores**

Los filtros percoladores, generalmente, son de forma circular aunque en el práctica se encuentran rectangulares, hexagonales y octogonales; contienen un lecho empacado, el empaque descansa sobre un bajodren que permite el paso del agua hacia los canales colectores. El agua residual se distribuye mediante brazos giratorios, escurre por la película biológica y ocurre una adsorción y asimilación biológica de la materia contaminante. La (Figura 11) es un filtro percolador o rociador. La película biológica va engrosando y llega un momento en que se desprende del soporte; dicha película se separa del efluente en el sedimentador secundario. En el filtro rociador no es necesario

recircular los lodos captados en el sedimentador, y cuando el agua se recircula, es más bien para mantener húmedo el medio (Calderón Mólgora, 2005).

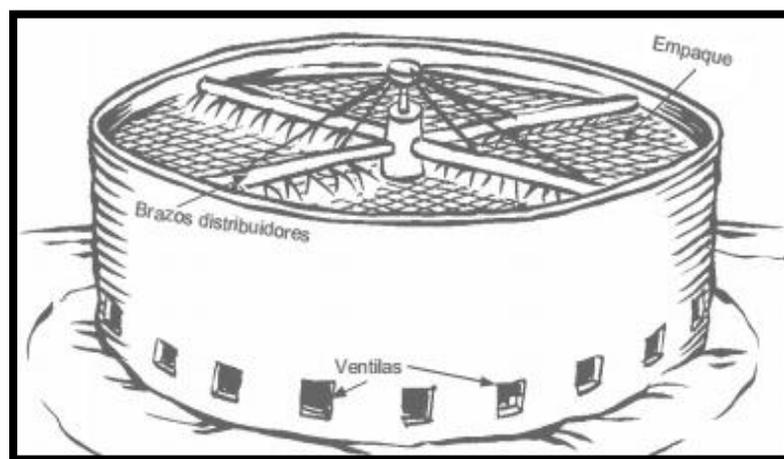
El medio de soporte puede ser natural, tal como piedras de río o plástico. La cantidad de materia orgánica que pueden remover los filtros percoladores está dada por la superficie de contacto. Los medios naturales son los que menor superficie de contacto por unidad de volumen ofrecen (de 40 a 70 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> de empaque), mientras que los medios plásticos pueden alcanzar hasta 280 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>. Al haber mayor superficie de contacto, hay mayor biomasa activa y pueden degradar más materia orgánica (Calderón Mólgora, 2005).

Es frecuente que los filtros percoladores se instalen en serie para lograr una buena remoción de materia carbonácea y también la nitrificación del efluente (Calderón Mólgora, 2005).

El peso del medio de empaque es un factor que determina la forma en la que se construyen los filtros rociadores. Las piedras son un empaque muy pesado y, por ello, los filtros se entierran parcialmente; el lecho suele tener una profundidad entre 1.5 y 2.5 metros (Calderón Mólgora, 2005).

Por su parte, los medios plásticos son empaques mucho más ligeros y requieren de estructuras menos resistentes, por ello, los filtros empacados con medios plásticos se construyen hacia arriba y la altura del lecho es de 3 hasta 12 metros (Calderón Mólgora, 2005).

**Figura 10.** Filtros percoladores.

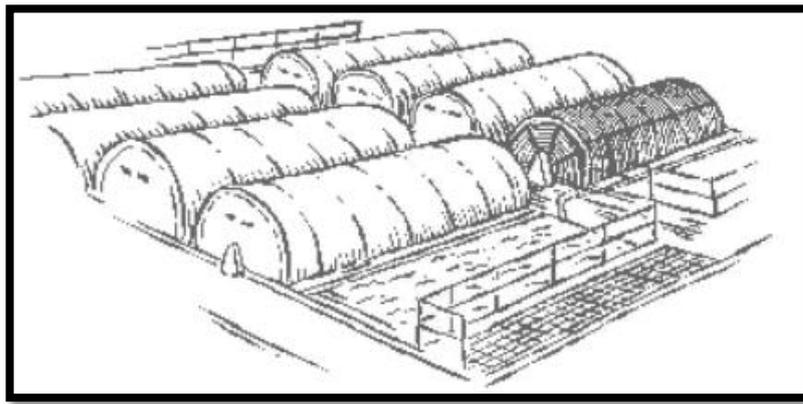


**Fuente:** Serie autodidáctica de la medición de la calidad del agua.

## ▪ Discos biológicos rotativos

Este proceso consta de una serie de discos montados sobre una flecha horizontal que gira. Los discos se sumergen parcialmente (Figura 12). En cada giro la superficie de los discos, sobre la que se desarrolla la biopelícula, entra en contacto con el agua residual y con el aire (Calderón Mólgora, 2005).

**Figura 11.** Discos biológicos rotativos.

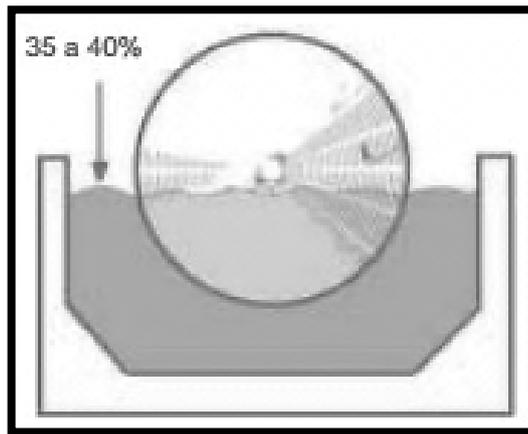


**Fuente:** Serie autodidáctica de la medición de la calidad del agua.

La película cuando se expone al aire, se oxigena, y al entrar en contacto con el agua residual pueden adsorber la materia orgánica; de esta forma se logra el tratamiento del agua. Los esfuerzos cortantes generados por la rotación del disco mantienen la película con un espesor casi constante, así, los excesos de biomasa se desprenden del disco, salen del reactor y se separan del agua residual en el sedimentador secundario (Calderón Mólgora, 2005).

Los discos se hacen de diferentes materiales tales como madera, plástico sólido y mallas plásticas. En este sistema es importante optimizar la relación superficie-volumen; los discos sólidos de plástico, con diseños especiales, son los que mayores superficies de contacto presentan. Los discos se sumergen de tal forma que sólo 40% del área esté bajo el agua (Figura 13) (Calderón Mólgora, 2005).

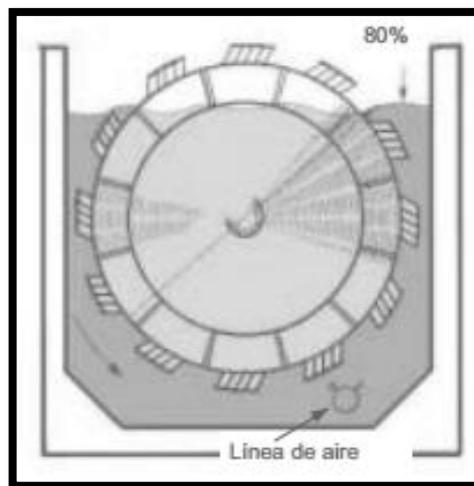
**Figura 12.** Nivel de sumersión de un disco biológico.



**Fuente:** Serie autodidáctica de la medición de la calidad del agua.

Hay otros diseños en los cuales el disco cuenta con cucharones que le permiten atrapar aire, en este caso, los discos se sumergen hasta en 80% y hay una línea de inyección de aire en el fondo del tanque, el aire se atrapa en los cucharones y sirve como auxiliar para el movimiento de los discos y para aerar a los microorganismos (Figura 14) (Calderón Mólgora, 2005).

**Figura 13.** Discos de inyección de aire.

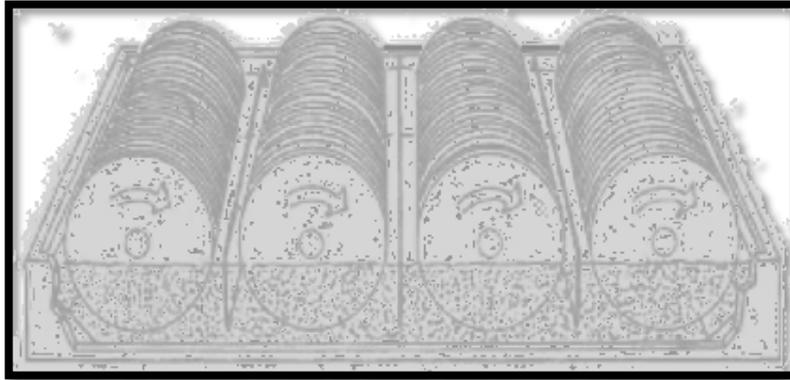


**Fuente:** Serie autodidáctica de la medición de la calidad del agua.

Se recomienda que los discos se coloquen en serie, dependiendo del caudal, puede ser un sólo módulo con flujo paralelo a la flecha (para caudales pequeños) o en varios

módulos secuenciales con el flujo perpendicular a la flecha para caudales grandes (Figura 15). Al colocar módulos en serie se logra una mayor remoción de contaminantes y la especialización de la biomasa, de tal forma que los microorganismos de la última etapa suelen nitrificar el agua (Calderón Mólgora, 2005).

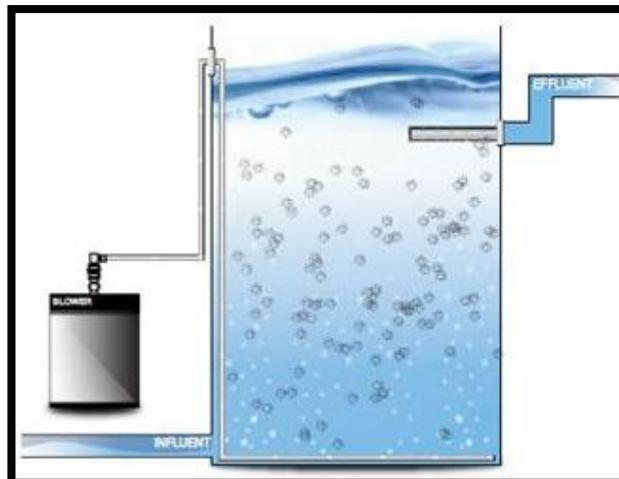
**Figura 14.** Arreglo de los discos.



**Fuente:** Serie autodidáctica de la medición de la calidad del agua.

### 1.2.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE LECHO MÓVIL

**Figura 15.** Reactor MBBR



**Fuente:** Headworks International (Westerling, 2008)

El principio básico del proceso de lecho móvil es el crecimiento de la biomasa en soportes plásticos que se mueven en el reactor biológico mediante la agitación generada por sistemas de aireación (reactores aerobios) o por sistemas mecánicos (en reactores anóxicos o anaerobios). Los soportes son de material plástico con densidad próxima a 1 g/cm<sup>3</sup> que les permite moverse fácilmente en el reactor incluso con porcentajes de llenado del 70% (Zalakain & Manterola, 2011).

Inicialmente se emplearon procesos de lecho fijo, sin embargo se ha observado que este tipo de procesos presenta una serie de inconvenientes operacionales como es el atascamiento del lecho por crecimiento excesivo de biomasa que obliga a la limpieza periódica del mismo. Estos inconvenientes han llevado a la necesidad de crear simples procesos de biofilm que los eliminen y que faciliten su operación tal como los procesos de lecho móvil (Zalakain & Manterola, 2011).

La biopelícula que se forma en las paredes del relleno se caracteriza por una mayor efectividad que los flóculos biológicos. A su vez, los soportes plásticos empleados contienen una elevada superficie específica por unidad de volumen. Estas dos particularidades hacen que los reactores de lecho móvil sean de volumen mucho menor que los de fangos activos (Zalakain & Manterola, 2011).

El crecimiento de la biopelícula en el soporte hace que las capas más internas entren en anaerobiosis haciendo que se desprenda parte de la misma de forma automática; este hecho hace que la formación de biopelícula necesaria según la carga, se de forma automática. A su vez estos sólidos desprendidos del soporte vienen a ser el exceso de fangos que hay que extraer del sistema (purga de fangos) y por tanto no requiere una recirculación de los mismos al reactor. La operación de la planta queda muy simplificada ya que la extracción del reactor de los fangos en exceso es automática y no se requiere de una recirculación (Zalakain & Manterola, 2011).

Respecto a la ingeniería del proceso, el sistema de aireación está formado por una parrilla de tubos perforados de acero inoxidable que evita problemas de pérdida de eficiencia, cambio de difusores etc. En cuanto al proceso de separación de la biomasa procedente del reactor biológico se emplean decantadores que se diseñan como decantadores primarios en cuanto a velocidades ascensionales (Zalakain & Manterola, 2011).

Los requerimientos de oxígeno, nutrientes y producción de fangos son similares a otros procesos biológicos de biomasa en suspensión, con lo que los costes de explotación de un proceso de lecho móvil vienen a ser similares a los convencionales de fangos activos. El ahorro en la reducción de volumen tanto del reactor como del sistema de separación de sólidos, y en el sistema de aireación, se compensan con el gasto en el soporte plástico haciendo que los costes de inversión sean también similares. Los costes de personal se ven reducidos debido a que el funcionamiento de la instalación es automático (Zalakain & Manterola, 2011).

### **1.2.3 VENTAJAS FRENTE A PROCESOS BIOLÓGICOS CONVENCIONALES**

De forma general, las principales ventajas que presenta el proceso de lecho móvil frente a los procesos biológicos convencionales son:

- Reducción de volumen del reactor biológico por empleo de un soporte que proporciona una superficie específica elevada (Zalakain & Manterola, 2011).
- Son procesos con gran flexibilidad ya que en función del porcentaje de soporte plástico empleado en el reactor, se recomienda no superior al 70%, se consigue modificar la superficie y en consecuencia la eficiencia del proceso (Zalakain & Manterola, 2011).
- No requiere recirculación de biomasa al reactor. Esto da lugar a que la biomasa no dependa de la separación final del fango y en consecuencia de problemas habituales encontrados en procesos convencionales de fangos activos relacionados con la sedimentabilidad del fango (bulking filamentoso, etc.) (Zalakain & Manterola, 2011).
- La operación y control de este tipo de procesos son sencillos. Por una parte, el proceso evita los problemas de atascamiento y consecuentemente periodos de limpieza continuados, además, no es necesario un control de la purga de fangos ya que el sistema mantiene la biomasa en el reactor hasta que es desprendida del soporte (Zalakain & Manterola, 2011).
- Permiten la generación de una biomasa característica de cada tipo de reactor (aerobio, anóxico o anaerobio) dando lugar a la obtención de un biofilm con una elevada actividad. Experimentalmente se ha constatado que las tasas de nitrificación y

desnitrificación en este tipo de procesos son superiores a las obtenidas en los procesos convencionales (Zalakain & Manterola, 2011).

- Recuperación rápida del proceso ante inhibiciones. La formación de biopelícula en el soporte plástico se hace de forma estratificada de forma que en presencia de inhibidores o posibles picos de carga excesiva, sean las primeras capas de la biopelícula las que se vean afectadas, produciéndose un decremento del rendimiento de eliminación, pero una muy rápida recuperación una vez pasado el inhibidor. A diferencia de los procesos de fangos activos la generación de la nueva biomasa y la recuperación total de la actividad biológica se ve reestablecida rápidamente tras el paso del inhibidor (Zalakain & Manterola, 2011).

### **1.3 BIOPELÍCULA**

A continuación se detallan algunos conceptos de biopelícula elaborados por diferentes autores:

- (Eighmy & Maratea, 1983), describen la biopelícula como un ensamblado de bacterias que está adosada por un pegamento a una superficie húmeda por medio de una matriz extracelular de polisacáridos fibrosos. Esta matriz, llamada cápsula o glicocálix, es sintetizada por las bacterias y su función principal es sujetar las células adsorbidas al soporte.

- (Waleed, 1993), describe el biofilm como un entramado complejo de microorganismos dotados de sustancias poliméricas extracelulares. La distribución espacial de estos componentes principales dentro de la matriz del biofilm, así como sus propiedades (físicas, químicas y biológicas) influyen la actividad en el mismo y su relación con el ambiente acuoso inmediato. Además el biofilm es muy dinámico; su composición y características cambian en el tiempo.

- Según (Costerton, Philip, & Greenberg, 1999), los biofilms 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.

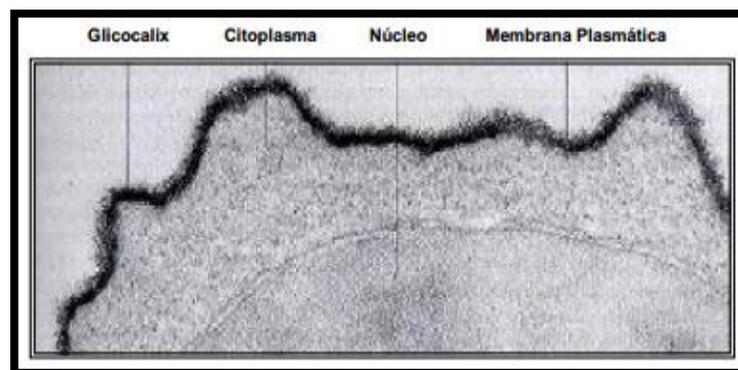
▪ (Lewandowski et al, (1994)), citado por (Gálvez Rodríguez, 2001), describe la biopelícula o biofilm, como una estructura compleja formada por agregados celulares (grupos de células densamente empaquetados) y huecos intersticiales, adherida a un material que puede ser de origen natural o sintético. Su estructura es morfológica y fisiológicamente distinta a la de bacterias libres, utilizándose incluso mediadores químicos intercelulares para desarrollar la película (Davies et al, 1998; de Beer et al, 1996).

### 1.3.1 FORMACIÓN DE LA BIOPELÍCULA

Existen varias teorías citadas (Barros de Macedo, 2000), para la formación de biopelícula. La primera fue descrita por Marshal, Stout, et al. (1971), y resalta que la adhesión es un proceso que ocurre en dos fases:

- La primer fase es reversible, en función del proceso de adhesión de los microorganismos a la superficie que ocurre por fuerzas Van der Waals y atracciones electrostáticas.
- La segunda fase, ocurre con la interacción física de las células a la superficie por medio de material extracelular de naturaleza polisacárida o proteica producida por las bacterias, esta se denomina matriz de glicocálix, y soporta la formación de la biopelícula. El glicocálix, (Figura 17) es producido después del proceso de adhesión superficial, y va a favorecer las condiciones de adhesión de los peptidoglicanos de las bacterias Gram positiva.

**Figura 16.** Fases para la adhesión de la biopelícula.

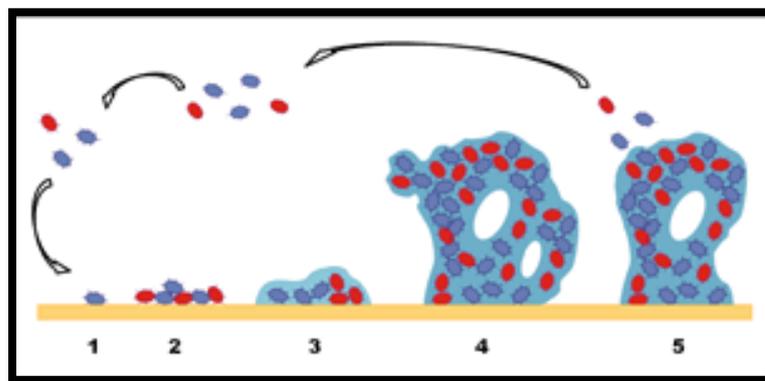


**Fuente:** Biopelícula en los procesos RBC

Otra teoría citada por el mismo autor, descrito por Duddridge – Pritchard, (1983) sugiere para la formación de biopelículas, 5 (cinco) etapas que esquemáticamente pueden ser colocadas en el siguiente orden (Figura 18):

- Acondicionamiento de la superficie por adsorción de materia orgánica.
- Transporte de células y nutrientes al sitio de adherencia.
- Inicio del proceso de adhesión bacteriana, todavía reversible, por atracción electrostática.
- Crecimiento celular, colonización y adhesión irreversible.
- La biopelícula presenta alta actividad metabólica y liberación de células localizadas en la periferia.

**Figura 17.** Etapas de la formación de la biopelícula.

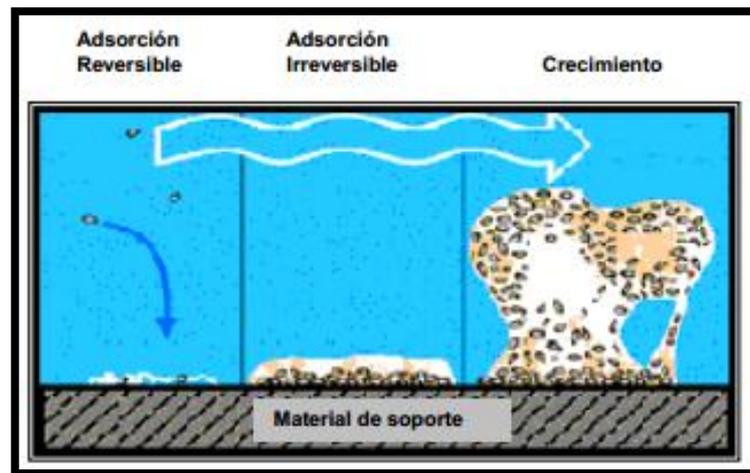


**Fuente:** Tomado de Revista VISAVET Divulgación

(Barros de Macedo, 2000), Cita además la teoría propuesta por Notermans, Dormans, et al (1991), que describe la formación de la biopelícula en 3 (tres) etapas, esquematizada en la (Figura 19).

- Fijación de las bacterias.
- Consolidación de las bacterias a la superficie.
- Colonización y crecimiento de las bacterias. En la etapa de consolidación, ocurre la producción de material extracelular que facilita la fijación de los microorganismos.

**Figura 18.** Formación de la Biopelícula.



**Fuente:** Biopelícula en los procesos RBC

Otros factores que incide en la adhesión de un microorganismo a determinada superficie, es la naturaleza del soporte, principalmente:

- Balance entre cargas eléctricas resultantes en la superficie.
- Rugosidad superficial.

### **1.3.2 MODELOS CONCEPTUALES DE LA ESTRUCTURA DE LA BIOPELÍCULA**

(Gálvez Rodríguez, 2001), Cita modelos conceptuales descritos por distintos investigadores a cerca del desarrollo y la estructura de la biopelícula.

#### **1.3.2.1 MODELO DEL CANAL DE AGUA**

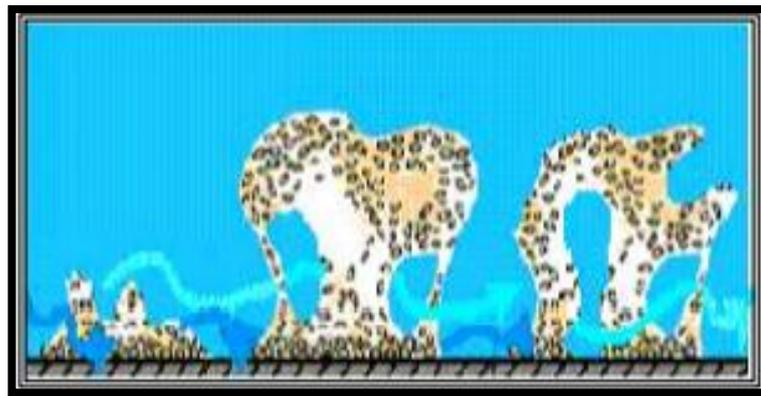
En este modelo, después del periodo de colonización en la superficie del soporte, las células sufren cambios fenotípicos y producen, entre otras moléculas estructurales, exopolisacáridos (EPS).

En determinados casos, algunas poblaciones bacterianas adheridas, constituyen estructuras en forma de cono formando una biomasa filamentosa que soporta multitud de microcolonias (Okabe et al, 1998).

Esta fusión microorganismo-EPS deja una red de canales de agua que llega hasta la base de la biopelícula (Figura 20).

La importancia de estos canales se ha llegado a comparar al sistema circulatorio de un organismo superior, por su estructura, grado de homeostasis, relación espacial óptima con los organismos que conviven y el intercambio de nutrientes y metabolitos entre la comunidad y la fase fluida (Wimpenny y Colasanti, 1997).

**Figura 19.** Modelo del canal de agua.



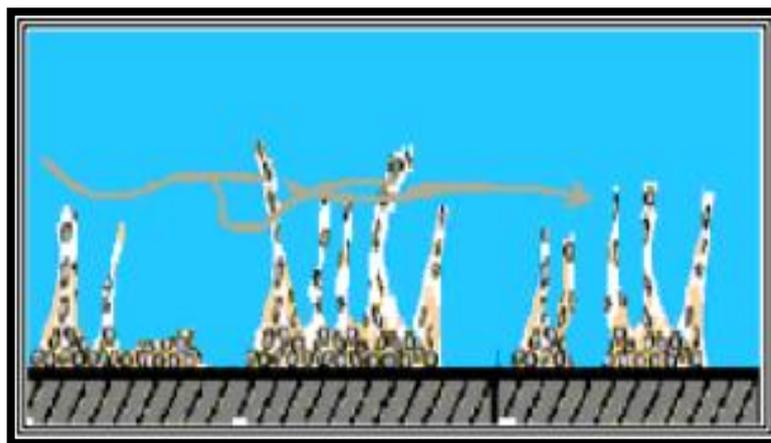
**Fuente:** Biopelícula en los procesos RBC

### 1.3.2.2 MODELO DE MOSAICO HETEROGÉNEO

Este modelo es típico de los sistemas de distribución de agua. Es un caso extremo del modelo del canal de agua. Consiste en microcolonias formando tallos unidos al soporte por la base pero generalmente bien separados de sus vecinos. Usualmente también puede haber una base muy fina de células individuales unidas a la superficie formando un film de 5µm de espesor (Gálvez Rodríguez, 2001).

La diferencia con el modelo de canales es que en este caso debido a la separación entre las torres microbianas no se llegan a formar los canales (Figura 21) (Gálvez Rodríguez, 2001).

**Figura 20.** Modelo del mosaico heterogéneo.



**Fuente:** La biopelícula en los procesos RBC

### 1.3.2.3 MODELO DE PELÍCULA DENSA

Su estructura no tiene canales de agua y presenta escasa organización estructural. Hay, sin embargo, alguna organización estructural. Incluye numerosas colonias del mismo tipo de bacteria. Además hay ejemplos de asociaciones específicas. (Figura 22) (Gálvez Rodríguez, 2001).

**Figura 21.** Modelo de película densa.



**Fuente:** Biopelícula en los procesos RBC

Según el mencionado autor, en estos modelos parece que hay alguna relación entre la estructura y la concentración de sustrato presente.

En el caso del mosaico heterogéneo la concentración de nutrientes es mínima (<1mg/l), mientras que para el modelo de película densa la concentración puede llegar a 15-20g/l.

Esta relación (tipo de estructura/concentración de sustrato) ha sido estudiada basándose en la formación de colonias por *Bacillus licheniformis* creciendo sobre distintas concentraciones de nutrientes. En medios ricos se observaron colonias redondeadas y mucosas (coincide con la estructura de la película densa). Por otro lado, los crecimientos en medios limitantes desarrollaban colonias arracimadas formando ramificaciones, ajustándose esta disposición canalizada a los modelos de biopelícula mosaico heterogéneo y canal de agua (Gálvez Rodríguez, 2001).

(Gálvez Rodríguez, 2001), Afirma que estos modelos no son simples hipótesis. En 1994 (Beeret al, Gjaltema et al, Masson-Deya et al y Stoodley et al), demostraron mediante ensayo de imágenes con Resonancia Magnética Nuclear la existencia de canales de agua. Corroborándose por Stoodley et al. En 1997, con el uso de un micro electrodo que permite determinar el coeficiente de transferencia de masa (K). Midiendo este parámetro en distintas localizaciones dentro de la biopelícula se ha encontrado distintos valores de K, concluyéndose que eran debidos a la heterogeneidad estructural de la película biológica.

Otros factores que pueden afectar la heterogeneidad estructural de las biopelículas según Grady et al 1999; Loosdrecht et al, 1995 y Lazarova et al 1992, pueden ser:

- Textura del material soporte
- Características hidrodinámicas del sistema
- Tipo de microorganismos que lo componen
- Naturaleza de la fase líquida
- Geometría del bioreactor

### **1.3.3 ROL DE LA BIOPELIÍCULA EN EL PROCESO DEL TRATAMIENTO**

El tratamiento biológico de líquidos residuales consiste principalmente en la estabilización (a veces mal llamada eliminación) de la materia orgánica por acción de los microorganismos que se alimentan de la misma, transformándola en productos más

oxidados y por lo tanto más estables (Welter, Romero, Grumelli, Sanchez, & Ascar, 2005).

Los microorganismos de la biopelícula adheridos al soporte, toman principalmente el oxígeno de la atmósfera, para la respiración y se alimentan de materia orgánica contenida en el líquido residual, la cual difunde a través de la biopelícula por diversos mecanismos. (Welter, Romero, Grumelli, Sanchez, & Ascar, 2005).

### **1.3.4 COMPOSICIÓN MICROBIOLÓGICA DE LA BIOPELÍCULA**

La composición de población microbiana varía a medida que el efluente fluye a través del reactor.

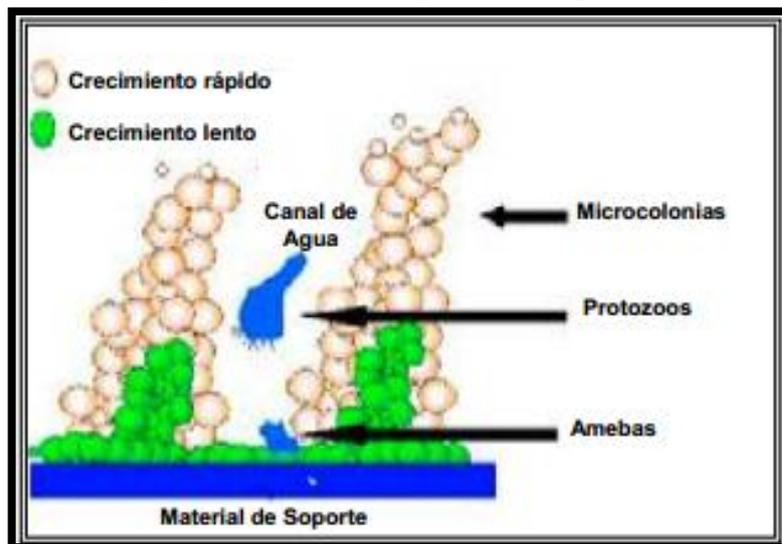
Las diferentes especies que crecen a lo largo del mismo contribuyen a la formación de un sistema mixto.

La variedad y proporción de las diferentes especies de microorganismos dependen de varios factores, como por ejemplo: características del líquido residual a tratar, carga hidráulica, carga orgánica y disponibilidad de oxígeno (Welter, Romero, Grumelli, Sanchez, & Ascar, 2005).

Debemos considerar también otros parámetros ambientales que si bien, para algunos autores son adicionales, contribuyen al éxito o fracaso del proceso, tales como: temperatura y pH (Welter, Romero, Grumelli, Sanchez, & Ascar, 2005).

En etapas iniciales del proceso se desarrollan poblaciones de bacterias del tipo filamentosas y no filamentosas, en etapas subsiguientes crecen poblaciones de mayor evolución, incluyendo, bacterias nitrificantes junto a protozoos, rotíferos y otros predadores que se vuelven dominantes (Figura 23) (Welter, Romero, Grumelli, Sanchez, & Ascar, 2005).

**Figura 22.** Microbiología de la biopelícula.



**Fuente:** Biopelícula en los procesos RBC

Cuando el afluente tiene una alta carga orgánica, la proporción entre las bacterias gram positivas y gram negativas es muy similar, sin embargo cuando la carga orgánica decrece las bacterias dominantes son menos diversas y predominan las gram negativas. Esto es atribuible a que las bacterias gram positiva no pueden competir con gram negativas cuando el sustrato orgánico es limitado (Welter, Romero, Grumelli, Sanchez, & Ascar, 2005).

En resumen, según (Kinner, Balkwill, & Bishop, 1982), la sucesión de microorganismos evoluciona de zooflagelados y amebas pequeñas a ciliados bacteriófagos capaces de nadar libremente y luego a ciliados carnívoros, rotíferos y amebas de mayor tamaño.

La tasa a la cual este patrón de sucesión se lleva a cabo es función de la tasa de carga orgánica o concentración por unidad de superficie de discos en el sistema de RBC.

### **1.3.5 INTERACCIONES ENTRE LOS MICROORGANISMOS EN LA BIOPELÍCULA**

En el tratamiento de un afluente, el objetivo fundamental es transformar la materia orgánica presente como tal, esto se logra facilitando el desarrollo, en condiciones naturales, de poblaciones microbianas heterogéneas que interactúan entre ellas y al alimentarse estabilizan la materia orgánica (Welter, Romero, Grumelli, Sanchez, & Ascar, 2005).

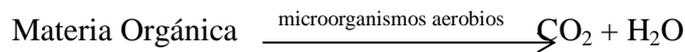
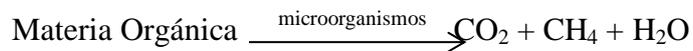
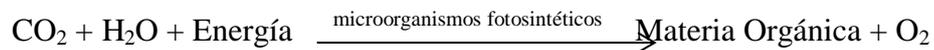
Las poblaciones microbianas son usualmente una mezcla muy compleja de diferentes géneros y especies de bacterias, hongos y protozoarios. La concentración de los componentes biológicos de estas poblaciones está lejos de ser constante, ya que hay fluctuaciones en las distintas etapas del proceso biodisco (Welter, Romero, Grumelli, Sanchez, & Ascar, 2005).

(Welter, Romero, Grumelli, Sanchez, & Ascar, 2005), Las principales interacciones que ocurren entre las diversas especies microbianas son:

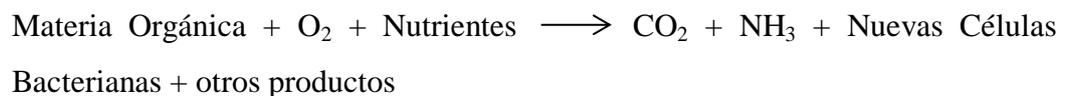
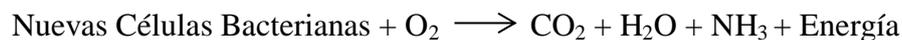
- Competición, que hace referencia al uso de un determinado nutriente.
- Predación, ocurre cuando un organismo se alimenta de otro.
- Parasitismo, cuando uno se aprovecha o vive a expensas de otro que generalmente muere.
- Comensalismo, cuando dos organismos viven simultáneamente sin beneficiarse ni perjudicarse.
- Mutualismo, cuando dos organismos se benefician mutuamente.

### **1.3.6 REACCIONES BIOLÓGICAS ESQUEMÁTICAS**

(Welter, Romero, Grumelli, Sanchez, & Ascar, 2005), Las reacciones biológicas más importantes que ocurren en la biopelícula son aerobias y anaerobias, siendo las fotosintéticas características del proceso de lagunas naturales de estabilización. Se representan a continuación en forma esquemática.

**Aerobias:****Anaerobias:****Fotosíntesis:**

Las actividades de síntesis y respiración que se producen se representan a continuación:

**Oxidación y síntesis:****Respiración Endógena:**

Estas reacciones ocurren simultáneamente.

Los elementos como carbono, hidrógeno, nitrógeno, azufre y fósforo, que junto con el oxígeno son componentes de la materia orgánica presente en el líquido residual a tratar, se encuentran inicialmente como carbohidratos, proteínas y grasas, sustancias estas que sirven de alimento a las bacterias para la producción de energía y la biosíntesis de nuevos microorganismos (Welter, Romero, Grumelli, Sanchez, & Ascar, 2005).

La energía debe suministrarse contenida en compuestos orgánicos o como energía radiante de la luz solar en el caso de fotosíntesis. Una fracción de la misma es utilizada para la biosíntesis de biomasa y la restante es dispersada como calor (Welter, Romero, Grumelli, Sanchez, & Ascar, 2005).

Los microorganismos generan también productos de desecho que dependen de las especies consideradas y las condiciones ambientales. Los productos más deseables son gases como  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$  y  $\text{CH}_4$ , que pueden ser fácilmente separados de la fase líquido, otros, indeseables, pero que se biosintetizan en el proceso son el  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{NH}_3$  y aminas (Welter, Romero, Grumelli, Sanchez, & Ascar, 2005).

Un requerimiento importante para la mayor parte de los procesos biológicos usados en el tratamiento de efluentes es la producción de microorganismos con propiedades floculantes, que pueden ser fácilmente separados por medios físicos como sedimentación por gravedad, centrifugación o filtración (Welter, Romero, Grumelli, Sanchez, & Ascar, 2005).

Dado que el tiempo de residencia de los organismos en los procesos biológicos puede resultar considerablemente largo es necesario tener en cuenta también una reacción de auto-oxidación o respiración endógena asociada a la fase de decaimiento y muerte de los microorganismos. Esto no ocurre normalmente en los biodiscos donde los tiempos de retención son muy cortos en relación a otros procesos (Welter, Romero, Grumelli, Sanchez, & Ascar, 2005).

Todas las reacciones son exotérmicas, permitiendo calcular el calor liberado por las reacciones netas o por la muerte de los organismos en base a los calores de combustión de los reactantes y productos. El cálculo del calor liberado es importante en los procesos de compostificación y digestión aerobia termofílica, en los cuales la concentración de materia destruida es suficientemente alta para que el calor liberado aumente la temperatura (Welter, Romero, Grumelli, Sanchez, & Ascar, 2005).

La aplicación de ecuaciones estequiométricas en tratamiento de efluentes se complica porque el sustrato es generalmente una mezcla compleja y variada de compuestos orgánicos solubles e insolubles y la concentración microbiana es difícil de medir. Por tal razón se mide la concentración de materia orgánica en términos de DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno), DQO (Demanda Química de Oxígeno), COT (Carbono Orgánico Total) y otros parámetros indirectos (Welter, Romero, Grumelli, Sanchez, & Ascar, 2005).

### **1.3.7 CINÉTICA DEL CRECIMIENTO BACTERIANO**

El crecimiento bacteriano no se caracteriza por un aumento del tamaño, sino por un aumento del número de bacterias.

En los organismos pluricelulares el crecimiento implica un aumento de tamaño. Como entre estos organismos cada especie tiene un tamaño más o menos estable, lo que se interpreta como crecimiento bacteriano en realidad es la división o multiplicación bacteriana. Este proceso se realiza por fisión simple o binaria la cual se inicia en la parte media de la célula (Negroni, 2009).

### 1.3.7.1 TIEMPO DE GENERACIÓN

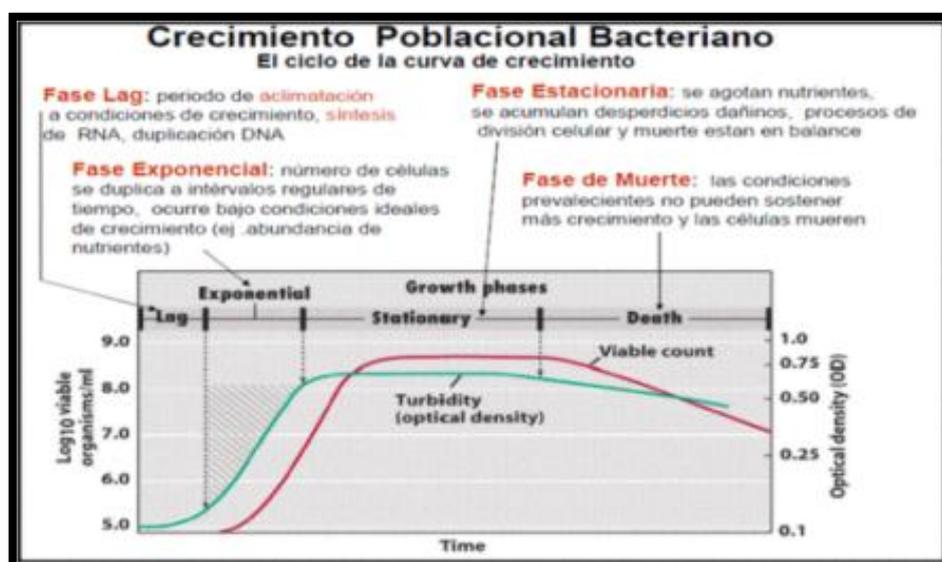
Es el tiempo en que se produce la duplicación de las células. Este proceso no alcanza la misma velocidad en todas las especies, sino que es distinto a cada una, aunque hay factores estimulantes que pueden influir (Negroni, 2009).

Los microorganismos de tiempo de generación corto son capaces de realizar la división en alrededor de 20 minutos, como la *Escherichia coli*, mientras que otras necesitan hasta 24 horas (Negroni, 2009).

### 1.3.7.2 CURVA DE CRECIMIENTO

Si se coloca una bacteria en un ambiente propicio para su desarrollo y se trata de esquematizar en un gráfico de coordenadas el número de bacterias presentes en un lapso determinado, se aprecia que el grafico describe una curva que no es igual para todas ellas, aunque en todas ellas puede distinguir distintas fases, como se aprecia en la (Figura 24) (Negroni, 2009).

**Figura 23.** Curva de crecimiento bacteriano.



**Fuente:** (Microorganismos de uso industrial, 2009)

### ▪ Fase de lactancia

Si se han contado las bacterias que se han colocado en el medio de cultivo y se las vuelve a contar durante este periodo, se advertirá que no hay variaciones en el número de microorganismos. Sin embargo, las células no están inactivas. Se están adaptando al medio, para lo cual sintetizan enzimas. Este periodo dura un tiempo variable y, según el microorganismo, puede ser de 1 hora o varios días (Negroni, 2009).

Si bien el número no varía, puede ser que estas aumenten algo de tamaño debido a que se va a producir la división (Negroni, 2009).

### ▪ Fase exponencial o de crecimiento logarítmico

Dado que las células se duplican, existe una relación lineal entre el tiempo y el número de elementos. La actividad metabólica se incrementa notablemente. Además, este período está sujeto al tiempo de generación del microorganismo. Esta es la etapa del crecimiento en la que los antimicrobianos son más efectivos (Negroni, 2009).

No obstante debe considerarse la posibilidad de que *in vivo* esta representación gráfica no es igual, porque hay factores físicos y químicos que influyen en el crecimiento de estos microorganismos (Negroni, 2009).

### ▪ Fase estacionaria

Una vez que ha llegado a determinado punto, el crecimiento disminuye. El número se estabiliza porque las células nuevas reemplazan a las que ya han muerto. La actividad metabólica de las que permanecen vivas es más lenta. O tal vez no haya células nuevas ni muertas, sino que solo se encontrarían en “animación suspendida”. En este momento existe una cantidad considerable de inclusiones de distinto tipo o almacenamiento de

polímeros intracelulares. Es el periodo en el que pueden producirse metabolitos secundarios, como antibióticos, toxinas u otros productos (Negroni, 2009).

#### ▪ **Fase de declinación o muerte**

El recuento de elementos disminuye sensiblemente. Aunque quedan células vivas, su número es sobrepasado por el de células muertas. Esto se debe a la acumulación de productos tóxicos y a la falta de nutrientes (Negroni, 2009).

### **1.4 MATERIALES DE SOPORTE**

El uso de medio de soporte en los reactores biológicos permite la retención de sólidos al interior del mismo, a través del biofilm formado en su superficie y, principalmente, en los intersticios del lecho. Este material generalmente ocupa entre 50 a 70% de la altura total del reactor. Las principales finalidades del medio de soporte (Torres, A. Rodríguez, & Eugenia Uribe, 2003), son:

- Mejorar el contacto entre el sustrato y los sólidos biológicos contenidos en el reactor.
- Facilitar un flujo uniforme en el reactor.
- Permitir la acumulación de gran cantidad de biomasa.
- Actuar como una barrera física, evitando que los sólidos sean arrastrados por fuera del sistema de tratamiento.
- Actuar como un dispositivo para separar los sólidos de los gases.

El medio de soporte puede estar constituido por materiales como piedras, bloques cerámicos, espumas, materiales plásticos, conchas de ostras y mejillones, bloques modulares de PVC, granito, esferas de polietileno y bambú (Torres, A. Rodríguez, & Eugenia Uribe, 2003).

En la tabla 2 se muestran los requisitos que debe tener un medio de soporte. (J.D. & C.A., 1996)

**Tabla 2.** Requisitos que debe tener un medio de soporte.

<b>REQUISITOS</b>	<b>OBJETIVOS</b>
<b>Ser estructuralmente resistente</b>	Soportar el propio peso, adicionado al peso de los sólidos biológicos adheridos a su superficie.
<b>Ser biológica y químicamente inerte</b>	Evitar reacciones entre el lecho y los microorganismos.
<b>Ser suficientemente liviano</b>	Evitar la necesidad de estructuras complejas, así como permitir la construcción de filtros más altos para reducir áreas de tratamiento.
<b>Poseer superficie específica y porosidad elevada</b>	Permitir la adherencia de microorganismos y reducir la posibilidad de colmatación.
<b>Permitir la rápida proliferación de microorganismos</b>	Disminuir el tiempo de arranque del reactor.
<b>Precio reducido</b>	Viabilizar económicamente el proceso

**Fuente:** Anais do III simposio Ítalo – Brasileiro de Engenharia Sanitaria e ambiental. 1996.

#### 1.4.1 CARACTERÍSTICA DE LOS MEDIOS DE SOPORTE

En la tabla 3 se proporcionan las características con que un medio de soporte debe contar para ser usado en reactores aerobios, según la empresa Anoxkaldnes en EEUU (Cesar Saldarriaga, Ángela Hoyos, & Correa, 2011).

**Tabla 3.** Características del material de soporte empleado en reactores aerobios

<b>CARACTERÍSTICAS</b>	<b>ANOXKALDNES K1</b>	<b>ANOXKALDNES K3</b>
<b>Diámetro nominal (mm)</b>	9.1	25.0
<b>Longitud nominal (mm)</b>	7.2	12.0
<b>Área superficial específica (m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>)</b>	500	500
<b>Gravedad específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>	0.96	0.96

**Fuente:** Datos proporcionados por la empresa AnoxKaldnes en EE.UU.

## **1.4.2 TIPOS DE MATERIALES DE SOPORTE**

### **1.4.2.1 POLIETILENO TEREFALATO – PET**

El PET es un polímero termoplástico producido por polimerización de etilenglicol con ácido tereftálico (Castells, 2012).

Su uso masivo en el sector del envase se inició en la década de los 90 debido a las facilidades que ofrecía para el envasado y embalaje por la variedad de formas y colores en que se podía procesar y las ventajas de su bajo peso (Castells, 2012).

Actualmente la mayoría del PET se recicla mecánicamente, con los inconvenientes propios de un material con impurezas como las botellas, que llevan adheridas pegatinas y pinturas. Para que el PET reciclado pueda ser utilizado de nuevo en aplicaciones en contacto directo con alimentos se utiliza la técnica de coextrusión, donde se sitúa una capa de PET reciclado entre dos capas de PET virgen. Este tipo de envase debe someterse a pruebas para asegurar que no se producen migraciones del reciclado hacia el alimento (Castells, 2012).

Al ser un polímero de adición es muy sencillo despolimerizar, por tal motivo se están estudiando otras alternativas de reciclaje químico:

#### **▪ Metanólisis**

Es la despolimerización del PET al reaccionar con metanol a presión y temperatura para obtener tereftalato de dimetilo (DMT) y etilenglicol (EG). El DMT y el EG se pueden purificar para la obtención de PET de nuevo u otras aplicaciones (Castells, 2012).

#### ▪ **Glicólisis**

Despolimerización por reacción con EG para reducir la larga cadena polimérica a oligómeros (Castells, 2012).

#### ▪ **Hidrólisis**

Despolimerización a ácido tereftálico y EG, que pueden usarse de nuevo para la producción de PET tras ser depurados. Se puede realizar mediante ácidos y bases.

El reciclaje químico consiste en tratar con sosa caustica la escama de PET e introducir las en un horno rotatorio para que la superficie con impurezas de la escama se elimine. Finalmente se lava, seca y separa de impurezas quedando una escama de alta calidad que se puede incorporar incluso hasta un 80 % en la fabricación de nuevas botellas y envases de alimentación (Castells, 2012).

### **1.4.2.2 POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD – HDPE**

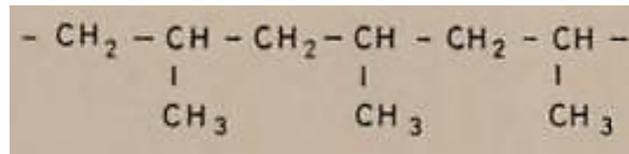
El polietileno de alta densidad se empezó a obtener en 1955, sometiendo el etileno a bajas presiones y en presencia de catalizadores estereoespecíficos (Bilurbina & Liesa, 1990).

Industrialmente hay que distinguir dos procesos: Proceso Phillips, que utiliza como catalizador óxido de cromo y el Proceso Ziegler que utiliza como catalizador tetracloruro de titanio o derivados organometálicos de titanio. (Bilurbina & Liesa, 1990)

En ambos casos se usan presiones inferiores a 30 atmósferas y temperaturas del orden de los 60 – 120° (Bilurbina & Liesa, 1990).

La presencia de estos catalizadores da lugar a cadenas lineales muy poco ramificadas, como se indica en (Figura 2.34). Contiene menos de una cadena lateral por cada 200 átomos de carbono de la cadena principal (Bilurbina & Liesa, 1990).

**Figura 24.** Polietileno de alta densidad (HDPE) poco ramificado.



**Fuente:** Materiales no metálicos resistentes a la corrosión

Funde a unos  $135^\circ$  y su peso molecular es del orden de 20,000 a 30,000. Es un polímero altamente cristalino, alrededor del 90 % (Bilurbina & Liesa, 1990).

Su densidad debido a su estructura empaquetada es superior a la del LDPE (Polietileno de baja densidad), es del orden de  $0,96 \text{ g/cm}^3$  (Bilurbina & Liesa, 1990).

Las temperaturas de uso están entre  $75 - 90^\circ$ . Su  $T_g = -120^\circ$  y su  $T_m = 127 - 135^\circ$ . El coeficiente de dilatación es  $1,5 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$  (Bilurbina & Liesa, 1990).

Sus resistencias químicas y eléctricas son semejantes a las del LDPE, pero tiene mayores resistencias a la tracción y mayor dureza (Bilurbina & Liesa, 1990).

En espesores de 60 micras es prácticamente opaco (Bilurbina & Liesa, 1990).

## **2. MATERIALES Y MÉTODOS**

Para el capítulo 2 se describe los materiales usados para la construcción de los reactores y los análisis que se utilizaron como parámetros para el desarrollo de la investigación.

### **2.1 MATERIALES**

#### **2.1.1 MATERIALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LOS REACTORES DE BIOPELÍCULA**

- 6 Frasco plásticos de 4 Lt de capacidad (reactores)
- 1 Compresor
- Tapas plásticas (PP)
- Botellas de agua (PET)
- Plástico grueso (HDPE)
- Difusores
- Mangueras de 5 mm y 3 mm de diámetro
- Agua residual domestica

#### **2.1.2 MATERIALES PARA LOS DISTINTOS TIPOS DE ANÁLISIS REALIZADOS**

- Tubos de ensayo
- Crisoles
- Vasos de precipitación (100 ml, 250 ml, 500 ml)
- Embudos buschner
- Varilla de agitación
- Pipetas graduadas (10 ml)
- Porta embudos

- Papel filtro y membranas de celulosa
- Desecador
- Mufla
- Balanza Analítica
- Espectrofotómetro

### 2.1.3 REACTIVOS

- Reactivo para el análisis de DQO (rango alto)
- Reactivo para análisis de fosforo (PhosVer 3)
- Agua destilada

### 2.2 DIMENSIONES DE LOS REACTORES

Para establecer las dimensiones de cada uno de los reactores se elaboró una tabla en donde se presentan las características físicas de los reactores sin la intervención del sustrato y los medios de soporte.

**Tabla 4.** Características físicas de los reactores aerobios

Características físicas	Simbología	Grupo A	Grupo B	Grupo C
<b>Altura total del reactor</b>	Ht	23.5 cm	23.5 cm	23.5 cm
<b>Altura útil</b>	Hu	16.3 cm	16.3 cm	16.3 cm
<b>Diámetro del reactor</b>	D	14.0 cm	14.0 cm	14.0 cm
<b>Volumen total del reactor</b>	Vt	3617.5 cm <sup>3</sup>	3617.5 cm <sup>3</sup>	3617.5 cm <sup>3</sup>
<b>Volumen útil del reactor</b>	Vu	2509.19 cm <sup>3</sup>	2509.19 cm <sup>3</sup>	2509.19 cm <sup>3</sup>
<b>Aireación</b>		Compresor	Compresor	Compresor

**Fuente: La autora**

En la siguiente tabla se puede observar el tamaño usado en cada uno de los medios de soporte introducidos en los reactores.

**Tabla 5.** Dimensiones de los medios de soporte para los reactores

Medios de soporte	Simbología	Dimensiones
<b>Polietileno de alta densidad</b>	HDPE	24 cm <sup>2</sup>
<b>Polietileno tereftalato</b>	PET	24 cm <sup>2</sup>
<b>Polipropileno</b>	PP	131.04 cm <sup>2</sup>

**Fuente: La autora**

En la siguiente tabla se muestran las variables de operación a la que fueron expuestos los reactores sin ningún tipo de modificación.

**Tabla 6.** Variables de Operación sin Modificación

Variables	Condición
<b>pH</b>	No se lo modifíco durante el tiempo de operación
<b>Temperatura</b>	Temperatura ambiental promedio de 20°C
<b>Flujo de aire</b>	Constante

**Fuente: La autora**

### 2.3 MEDIOS DE SOPORTE

Se seleccionaron tres tipos distintos de polímeros o plásticos reciclables los cuales fueron usados como medio de soporte en los reactores aerobios de biopelícula de lecho fijo, a los cuales se los pudo conseguir fácilmente en recicladoras ya que su costo no es excesivo, y debido a que estos plásticos son de materiales sintéticos no existió el riesgo de que se pueda producir una contaminación biológica ya que son químicamente inertes.

### 2.3.1 POLIETILENO TEREF TALATO – PET

Para el grupo A se procedió a usar botellas de bebidas no gaseosas de consumo humano previamente lavadas y secadas.

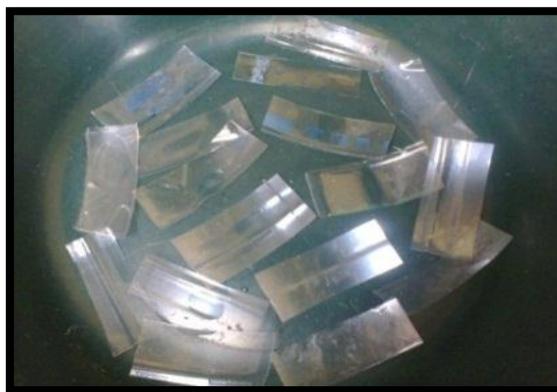
**Figura 25 y Figura 26.** Material de Polietileno tereftalato



**Fuente:** La autora

Para establecer la cantidad de material que se colocó en cada uno de los reactores, se realizó la medición del área superficial expresada en  $\text{cm}^2$ , esta se la obtuvo multiplicando por 2 el área medida en una de las caras del material, luego realizó el corte de dicho material con las dimensiones de 2 cm x 6 cm.

**Figura 27.** Tiras de Polietileno tereftalato.



**Fuente:** La autora

### 2.3.2. POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD – HDPE

Para el grupo B se procedió a usar botellas de desinfectantes previamente lavadas y secadas. Las mismas que posteriormente fueron cortadas en trozos más pequeños de 2 cm x 6 cm.

**Figura 28.** Material de Polietileno de alta densidad



**Fuente:** La autora

**Figura 29.** Tira de Polietileno de alta densidad



**Fuente:** La autora

### 2.3.3 POLIPROPILENO – PP

Para el grupo C de reactores se usaron tapas plásticas, las cuales fueron propiamente lavadas y secadas, procediéndose luego a realizar 4 perforaciones de 4 mm de diámetro a cada una de las tapas.

**Figura 30.** Material de Polipropileno



**Fuente:** La autora

### 2.4 AGUA RESIDUAL

El agua que se usó fue agua residual doméstica extraída del canal “El Macho” de la ciudad de Machala, a la cual se le realizaron las mediciones iniciales de DQO, Nitrógeno Total y Fósforo Total en el agua residual, ya que estos componentes son primordiales para el crecimiento de los microorganismos y por ende la formación del biofilm.

Estas mediciones se las realizó el mismo día en que se recogió el agua residual del canal “El Macho”.

**Figura 31.** Toma del agua residual doméstica en el canal El Macho.



**Fuente:** La autora

## 2.5 MONTAJE DEL EQUIPO

**Figura 32.** Reactores aerobios de lecho móvil (MBBR).



**Fuente:** La autora

Para el presente trabajo de investigación, se realizó la construcción de 6 reactores de biopelícula de lecho fijo (MBBF) a escala de laboratorio, en donde se colocaron diferentes tipos de materiales plásticos reciclables como medio de soporte para el crecimiento de la biopelícula.

El uso de los diferentes materiales plásticos fue para determinar en cuál de estos plásticos había mayor adherencia de biomasa para que se pudiera producir una mayor eficiencia en la remoción de materia orgánica presente en el agua residual. Para lo cual se procedió a realizar el experimento por duplicado, en donde cada grupo contenía un tipo diferente de plástico.

Debido a que estos reactores son de lecho fijo los medios de soporte no giraban dentro del reactor como lo hacen cuando son de lecho móvil, además como son reactores aerobios se procedió a la construcción de unos difusores para que con ayuda del compresor se pudiera suministrar el aire a través de todo el reactor y así la biomasa pueda adherirse a los medios de soporte.

El tiempo en que los reactores estuvieron en funcionamiento fue de 3 meses, y como se usaron reactores de lecho fijo tipo batch no fue necesario tomar en cuenta el valor del caudal para la estabilización de la biomasa para la degradación de la materia orgánica en el agua residual.

El agua que se empleó para el desarrollo de la tesis fue agua residual doméstica, la cual fue recogida en el canal del “Macho” en la ciudad de Machala.

Los parámetros a analizar fueron: Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV) y Sólidos Suspendidos Volátiles Inmovilizados (SSVi), el Nitrógeno Total y Fósforo Total (la medición de estos dos últimos parámetros se la realizó únicamente al inicio del experimento) son los nutrientes que la biomasa necesita para generar las reacciones bioquímicas necesarias dentro de los reactores.

En el fondo de cada uno de los reactores se colocó un difusor y encima una malla plástica y posteriormente el medio de soporte, el difusor estaba conectado al compresor a través de una manguera plástica por donde se suministró el aire al reactor y la cantidad de agua residual que se colocó en cada reactor fue de 3.550 L, para luego poner en marcha los compresores.

Este proceso de aireación se lo dejó durante toda la experimentación, debido a que aproximadamente cada dos semanas se agregaron nuevas cantidades de agua, las cuales proporcionaban nueva carga orgánica para que sea degradada por las bacterias que conformaban el biofilm en los medios de soporte.

## **2.6 ANÁLISIS QUÍMICOS**

Para los análisis de DQOs la toma de muestra se la realizó cada 5 días, mientras que para el análisis de Nitrógeno Total y Fósforo Total la toma de muestra se le realizó únicamente al agua residual que se recogió inicialmente en el Canal de El Macho.

### **2.6.1 DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO SOLUBLE (DQO<sub>s</sub>)**

Este parámetro se lo utilizó para medir la cantidad de sustancias susceptibles de ser oxidadas por medios químicos que hay disueltas o en suspensión en una muestra líquida. Para lo cual se utilizó el siguiente procedimiento en rangos de 20–1500 mg/L DQO (método 8000):

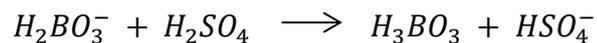
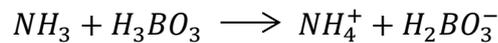
- Encender el reactor DRB200 y precalentar a 150°C.
- Filtrar la muestra.
- Colocar 2 ml de muestra en la cubeta. Tapar y limpiar la misma.
- Sujetar la cubeta por la tapa, voltearla varias veces para mezclar.
- Colocar la cubeta en el reactor y calentar por 2 horas.
- Encender el reactor. Esperar a que la cubeta se enfríe hasta 120°C o menos.
- Voltrear la cubeta varias veces mientras siga caliente.
- Enfriarla hasta temperatura ambiente.
- Limpiar el exterior de la cubeta y proceder a realizar la lectura en mg/L de DQOs

### **2.6.2 NITRÓGENO TOTAL**

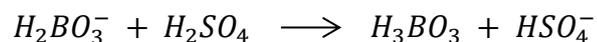
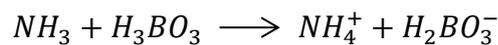
Los análisis de nitrógeno total en el agua se los realizó debido a que es un elemento importante y necesario para el crecimiento de los microorganismos.

Para determinar la cantidad inicial de nitrógeno total en el agua, los análisis de la muestra fueron realizados en la Empresa NEMALAB en donde se utilizó el método Kjeldahl que consiste:

- Con la primera destilación se pasa el nitrógeno amoniacal a  $NH_3$ , que se recoge en presencia de ácido bórico. Después se valora con  $H_2SO_4$ . Las reacciones son:



- Se sigue con la digestión (365-380°C), donde el nitrógeno amino de materiales orgánicos en presencia de  $H_2SO_4$ ,  $K_2SO_4$ ,  $Hg(SO_4)$  (cat.), forman  $(NH_4)_2 SO_4$ . Si no se realiza la primera destilación el amoníaco libre y el nitrógeno amoniacal, también se convierten en  $(NH_4)_2SO_4$ . Durante la digestión, se forma un complejo de mercurio amonio. Se continúa con la segunda destilación, donde el tiosulfato sódico se encarga de transformar el nitrógeno orgánico en amoniaco (rotura del complejo por el tiosulfato).



- Si no se realiza la primera destilación, el resultado de la digestión y la última destilación es lo que se denomina Nitrógeno kjeldahl (nitrógeno amoniacal + Nitrógeno orgánico) en mg/L NT.

### 2.6.3 FÓSFORO TOTAL

Los análisis de fósforo total en el agua se los realizó usando el test 490 Preact. PV, el cual consiste en:

- Se seleccionó el test 490 Preact. PV

- Se Llenó una cubeta cuadrada de una pulgada de 10 ml hasta la marca de 10 ml con muestra.
- Para la preparación de la muestra: se añadió el contenido de un sobre de reactivo PhosVer 3 en polvo. Tapar la cubeta inmediatamente y agitar por 30 segundos para mezclar.
- Seleccionar el temporizador y pulsar Ok. Comienza un periodo de reacción de 2 minutos.
- Preparación del blanco: llenar otra cubeta con 10 ml de agua destilada, una vez que suene el temporizador limpiar el exterior de la cubeta (blanco) y colocarlo en el soporte porta-cubetas. En la pantalla aparecerá 0.00 mg/L  $\text{PO}_4^{-3}$
- Limpiar el exterior de la cubeta con muestra, colocarla en el soporte porta-cubetas y proceder con la lectura en mg/L  $\text{PO}_4^{-3}$

## 2.7 ANÁLISIS FÍSICOS

Para los análisis de SSV la toma de muestra se la realizó cada 15 días, mientras que para el análisis de SSVi la toma de muestra se la realizó al final de la experimentación ya que para este tiempo los medios de soporte ya contaban con la suficiente biomasa adherida para realizar el análisis.

### 2.7.1 SÓLIDOS SUSPENDIDOS VOLÁTILES (SSV)

Mediante ensayos gravimétricos se realizó la determinación de sólidos suspendidos volátiles, para lo cual se sometió a peso constante la capsula de porcelana a una temperatura de 550°C por el lapso de 1 hora, después se la enfrió en la estufa a una temperatura de 105°C, se la colocó en el desecador y se procedió a pesarla.

Luego se procedió a filtrar las muestras con papel filtro teniendo en cuenta la lectura del volumen de cada muestra, para luego secarla en la estufa por 24 horas a una temperatura de 105°C. Después se la colocó en un desecador para enfriarla y proceder con el pesaje,

por último se llevó el residuo seco para incinerarlo en la mufla durante 15 minutos a una temperatura de 550°C para después colocarlo en un desecador para su enfriamiento y proceder a realizar el pesaje.

$$SST, \text{ mg/Lt} = \frac{(P_2 - P_1) \times 1000}{V}$$

$$SSF, \text{ mg/Lt} = \frac{(P_3 - P_1) \times 1000}{V}$$

$$SSV, \frac{\text{mg}}{\text{Lt}} = SST - SSF$$

Dónde:

**SST** = sólidos suspendidos totales en mg/L.

**SSF** = sólidos suspendidos fijos en mg/L.

**SSV** = sólidos suspendidos volátiles en mg/L.

**P<sub>1</sub>** = peso del filtro preparado en mg.

**P<sub>2</sub>** = peso del filtro más el residuo seco a 103-105°C en mg.

**P<sub>3</sub>** = peso del filtro más el residuo calcinado a 550 °C en mg.

**V** = volumen de muestra tomado en ml.

### **2.7.2 SÓLIDOS SUSPENDIDOS VOLÁTILES INMOVILIZADOS (SSVi)**

Los sólidos suspendidos volátiles inmovilizados (SSVi) en el soporte se obtuvieron para evidenciar la formación de la biopelícula en los reactores.

El primer paso correspondió al proceso de extraer del soporte la biopelícula y con abundante agua destilada colocarlos en un vaso de precipitación para posteriormente proceder a filtrar cada una de las muestras utilizando el procedimiento anterior. (2.7.1).

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

#### 3.1 ESTUDIO DE CAMPO EN LAS RECICLADORAS

A continuación en la tabla 7 se observa el porcentaje de cada uno de los plásticos reciclados por mes de 5 empresas en la ciudad de Machala.

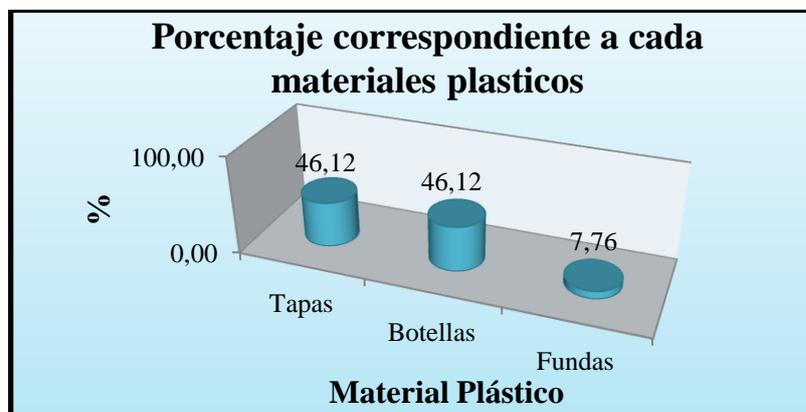
**Tabla 7.** Cantidad de material plástico reciclado en la ciudad de Machala

Plásticos	Porcentaje
Tapas	46.12
Botellas	46.12
Fundas	7.76
<b>Total</b>	<b>100.00</b>

**Fuente: La autora**

Mientras que en la gráfica 1 se puede observar la distribución del porcentaje que corresponde a cada material plástico reciclado en la ciudad de Machala.

**Gráfica 1.** Distribución del porcentaje de materiales plásticos reciclado en la ciudad de Machala.



**Fuente: La autora**

Lo que demuestra que los plásticos con mayor oferta en la ciudad de Machala son las tapas y botellas plásticas con valores correspondientes a 46,12 % para ambos plásticos, mientras que el porcentaje de fundas corresponde al 7,76 % de la demanda total de plásticos en la ciudad de Machala.

### 3.2 PARÁMETROS DEL AGUA RESIDUAL DEL CANAL EL MACHO

Los valores que se obtuvieron al analizar el agua residual antes de ser colocada en cada uno de los reactores, se pueden apreciar en la siguiente tabla 11.

**Tabla 8.** Parámetros del agua obtenida del canal El Macho

<b>Parámetros</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valores</b>
<b>DQOs</b>	mg/Lt	1878
<b>Nitrógeno Total</b>	mg/Lt	0.11
<b>Fósforo Total</b>	mg/Lt	1.53

**Fuente: La autora**

Para obtener los valores antes mencionados, los análisis fueron realizados en los laboratorios de la Unidad Académica de Ciencias Químicas y de la Salud de la Universidad Técnica de Machala, para así poder tener datos iniciales de cada uno de los parámetros del agua a analizar antes de ser colocada en cada uno de los reactores.

### 3.3 SUPERFICIE ESPECÍFICA DEL PLÁSTICO EN LOS REACTORES

Las tablas 9 y 10 muestran la superficie específica total y la cantidad promedio de plástico introducida en cada grupo de reactores.

**Tabla 9.** Superficie específica total de la cantidad de plástico introducida en cada de los reactores

Reactor	Tipo de plástico	Superficie específica total (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )
RA1	PET	626.314648
RA2	PET	626.314648
RB1	HDPE	235.700282
RB2	HDPE	235.700282
RC1	PP	479.864789
RC2	PP	479.864789

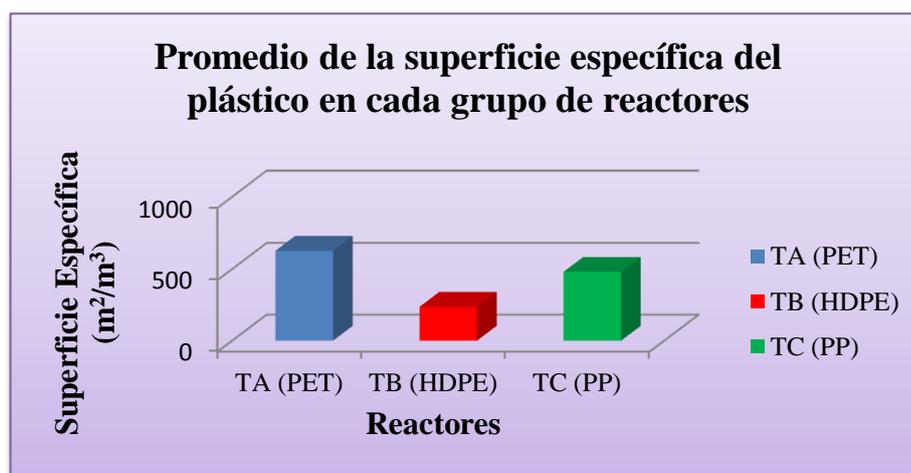
Fuente: La autora

**Tabla 10.** Cantidad promedio de plástico introducido en cada grupo de reactores

REACTOR	PROMEDIO (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )
TA	626.314648
TB	235.700282
TC	479.864789

Fuente: La autora

**Gráfica 2.** Promedio de la superficie específica del plástico en cada grupo de reactores



Fuente: La autora

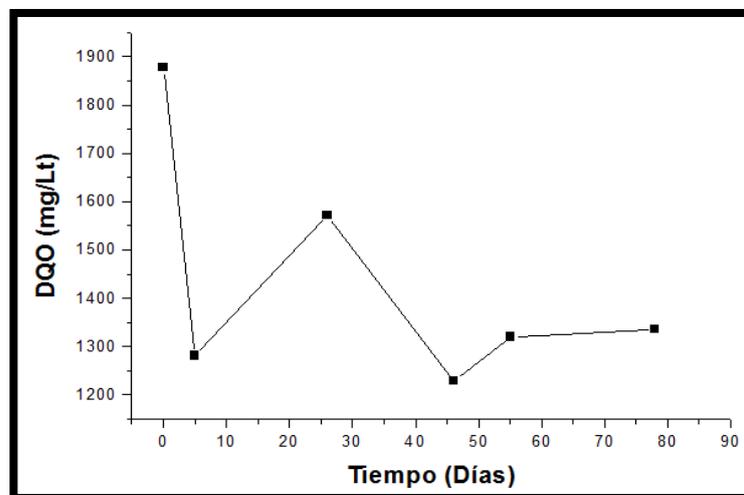
La Gráfica 2 muestra las superficies específicas encontradas, las mismas que son para mayores para el plástico PET, seguido de las tapas plásticas de PP y plástico HDPE con superficies específicas de 626,31, 479,86 y 235,7 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> respectivamente. Así aunque

existe mayor superficie específica en el plástico PET, lo que sugiere una mayor área disponible para el crecimiento de biofilm, por otro lado el plástico HDPE con menor superficie específica presentó mayor adherencia a la biomasa, lo que significa que otros factores como la rugosidad influyen en la adherencia bacteriana. Sin embargo, acorde al análisis de diferencias significativas los tres plásticos presentan iguales valores de retención de biofilm.

### 3.4 COMPORTAMIENTO DE LA DQO

Debido a que las muestras fueron tomadas en la estación húmeda podemos apreciar que en la gráfica 3 la concentración inicial de DQOs fue de 1878 mg/L en cada uno de los reactores para posteriormente ir disminuyendo hasta los 1335 mg/L valor en el cual logro estabilizarse para el día 78, pero en trabajos anteriores (Romero, Colín, & Sánchez, Agosto 2009), vemos que la concentración inicial de DQO es de 164 mg/L en la estación seca bajando hasta los 7 mg/L, lo que demuestra que en los humedales artificiales como en reactores aerobios se puede producir una remisión de DQO significativa.

**Gráfica 3.** Variación de la DQO con respecto al tiempo

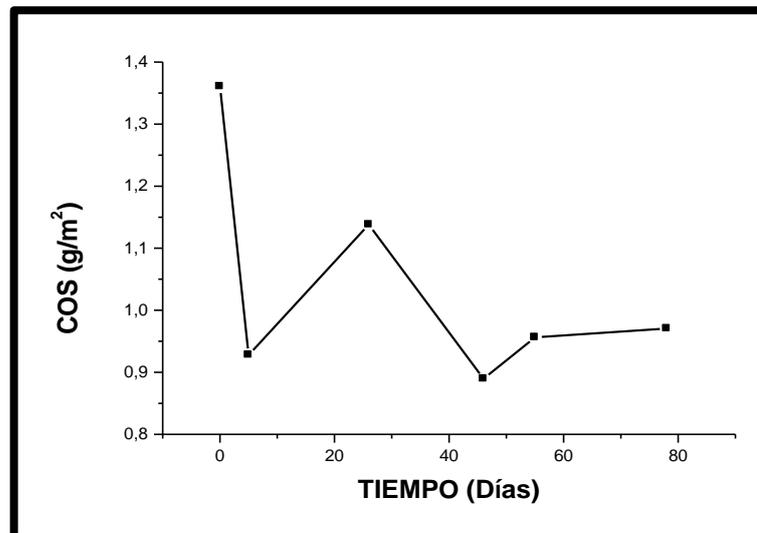


**Fuente:** La autora

### 3.5 CARGA ORGÁNICA SUPERFICIAL

En la Gráfica 4 se aprecia la variación de la carga orgánica superficial o la cantidad de sustrato suministrado a los microorganismos por unidad de área durante los días: 5, 26, 46, 55, 78; en los que fueron cargados los reactores con agua residual nueva, iniciándose con una carga de 1.360 g/m<sup>2</sup> para luego mantenerse en un rango de 0.85 a 1.2 g/m<sup>2</sup> estabilizándose en el día 78 con una carga de 0.9671 g/m<sup>2</sup>.

**Gráfica 4.** Carga Orgánica Superficial

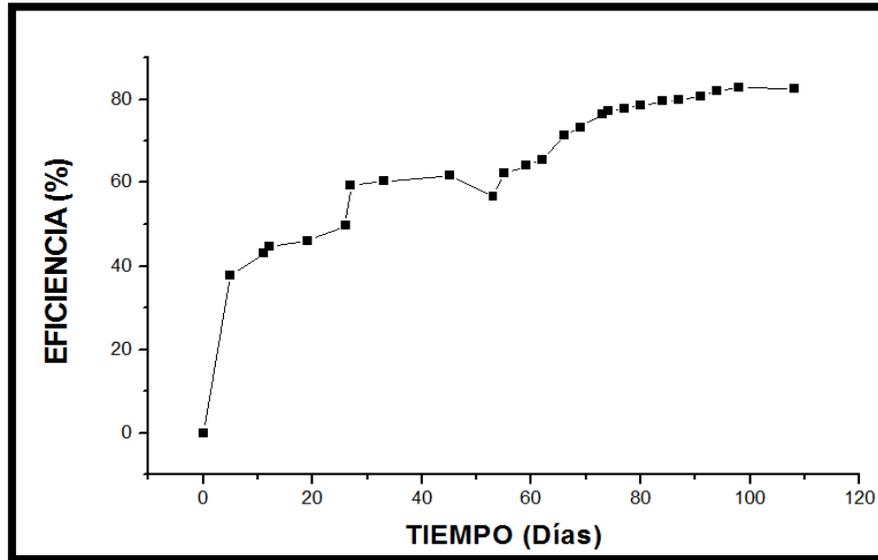


**Fuente:** La autora

### 3.6 PORCENTAJE DE EFICIENCIA EN LA DEGRADACIÓN DE DQOs

En las gráficas 5 se puede apreciar como la eficiencia en la degradación de DQOs desde el día 0 hasta el día 5 tuvo un incremento rápido de la eficiencia en la degradación de la DQOs llegando a un valor de 37.8 %, a partir del día 11 hasta el día 69 hubo una variación de la eficiencia ubicándose entre los rangos de 43 % hasta 73.3 %, a partir del día 73 hasta el día 108 la eficiencia se mantuvo en un rango de 76.5 % hasta 82.6 % lográndose estabilizarse en ese día.

**Gráfica 5.** Porcentaje de Eficiencia en la degradación de DQOs



Fuente: La autora

### 3.7 SÓLIDOS SUSPENDIDOS VOLÁTILES

Los análisis se los realizo cada 15 días, por tanto en la gráfica 6 se puede apreciar la concentración de los SSV con relación al tiempo en los tres grupos de reactores.

El reactor TA1 empezó con una concentración de 0.0091 g/ml de SSV llegando a un rango de concentración que va desde 0.015 g/ml de SSV hasta 0.2 g/ml de SSV, con una concentración máxima de 0.1614 g/ml de SSV finalizando con una concentración de 0.0555 g/ml de SSV.

El reactor TA2 empezó con una concentración de 0.0012 g/ml de SSV llegando a un rango de concentración que va desde 0.1 g/ml de SSV hasta 0.85 g/ml de SSV, con una concentración máxima de 0.0.8185 g/ml de SSV finalizando con una concentración de 0.122 g/ml de SSV.

El reactor TB1 empezó con una concentración de 0.0004 g/ml de SSV llegando a un rango de concentración que va desde 0.0003 g/ml de SSV hasta 0.4 g/ml de SSV, con una concentración máxima de 0.3062 g/ml de SSV finalizando con una concentración de 0.048 g/ml de SSV.

El reactor TB2 empezó con una concentración de 0.0108 g/ml de SSV llegando a un rango de concentración que va desde 0.1 g/ml de SSV hasta 0.2 g/ml de SSV, con una

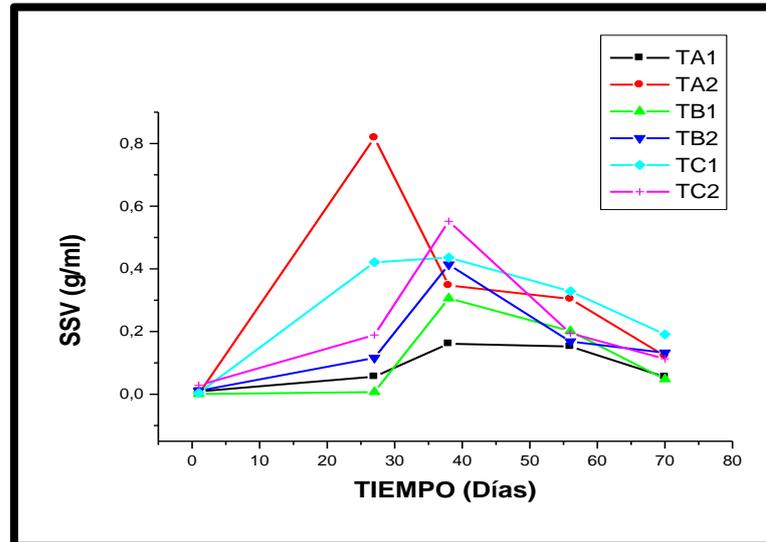
concentración máxima de 0.45 g/ml de SSV finalizando con una concentración de 0.1325 g/ml de SSV.

El reactor TC1 empezó con una concentración de 0.0044 g/ml de SSV llegando a un rango de concentración que va desde 0.15 g/ml de SSV hasta 0.45 g/ml de SSV, con una concentración máxima de 0.436 g/ml de SSV finalizando con una concentración de 0.191 g/ml de SSV.

El reactor TC2 empezó con una concentración de 0.0284 g/ml de SSV llegando a un rango de concentración que va desde 0.1 g/ml de SSV hasta 0.6 g/ml de SSV, con una concentración máxima de 0.552 g/ml de SSV finalizando con una concentración de 0.113 g/ml de SSV.

Como se puede observar las concentraciones de los SSV es irregular debido a que la materia orgánica que se encuentra adherida en los medios de soporte después de un tiempo va degradándose, es decir, van muriendo debido al ciclo de crecimiento que las bacterias poseen, por tanto estas son remplazadas por las nuevas bacterias presente en el agua residual nueva.

**Gráfica 6.** Incremento de los Sólidos Suspendidos Volátiles

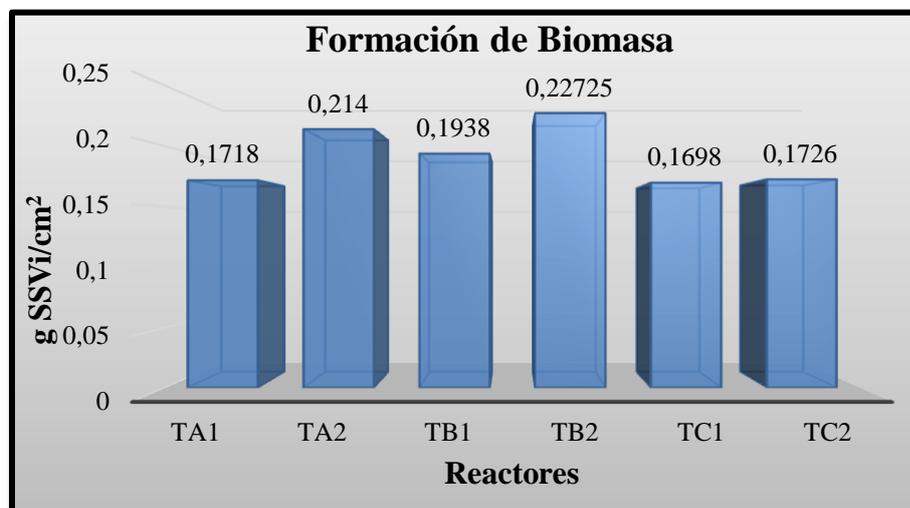


**Fuente:** La autora

### 3.8 FORMACIÓN DE LA BIOMASA

En la gráfica 7 se observa la cantidad de biofilm formado en cada uno de los medios de soporte usados durante el proceso de la experimentación, en los cuales en el reactor TA1 se produjo una adherencia de biomasa de  $0.1718 \text{ g/cm}^2$ , en el reactor TA2 se produjo una adherencia de biomasa de  $0.214 \text{ g/cm}^2$ , en el reactor TB1 se produjo una adherencia de biomasa de  $0.1938 \text{ g/cm}^2$ , en el reactor TB2 se produjo una adherencia de biomasa de  $0.2272 \text{ g/cm}^2$ , en el reactor TC1 se produjo una adherencia de biomasa de  $0.1698 \text{ g/cm}^2$ , en el reactor TC2 se produjo una adherencia de biomasa de  $0.1726 \text{ g/cm}^2$ ; demostrándose que en los reactores de grupo B hubo una mayor cantidad de biofilm formado en comparación a los otros dos grupos de reactores.

**Gráfica 7.** Biomasa Formada en los Medios de Soporte



**Fuente:** La autora

Con el fin de verificar diferencias significativas entre los grupos de reactores TA, T B y TC, se realizó un análisis de varianza de una vía, lo que resultó en un  $p = 0,33$  (Anexo B), lo que significa que para un nivel de confianza del 95% no existen diferencias entre grupos. Lo que supone que se podría utilizar cualquier tipo de plástico, o en su defecto una mezcla de los tres.

#### 4. CONCLUSIONES

- De acuerdo a las encuestas realizadas a distintas recicladoras el material plástico con mayor demanda son las tapas y botellas plásticas debido a que estos materiales son recolectados a diario, con cantidades aproximadas de 180,27 ton/mes que equivalen al 46,12 % respectivamente.
  
- Aunque el área específica del HDPE sea menor a la del PET, debido a los valores obtenidos de  $626,31 \text{ m}^2/\text{m}^3$  y  $479,86 \text{ m}^2/\text{m}^3$ , es muy probable que la rugosidad que el plástico HDPE posee sea el factor para que se adhiera mayor cantidad de masa microbiana en este tipo de plástico para la remisión de la DQOs.
  
- De acuerdo a la experimentación se estableció que de los 3 tipos de materiales plásticos el que era más eficiente para la depuración de las aguas residuales era el plástico HDPE debido que con este plástico se obtuvo una eficiencia del 82.6 %.
  
- De los tres tipos de materiales plásticos reciclables usados como medios de soporte, el que tuvo mayor cantidad de biopelícula adherida fue el grupo B o plástico de alta densidad (HDPE), con valores de  $0.1938 \text{ g SSVi}/\text{cm}^2$  y  $0.22725 \text{ g SSVi}/\text{cm}^2$  para los TB1 Y TB2 respectivamente, debido a que este tipo de plástico es mucho más liso en comparación con el plástico PET cuyos valores fueron para TA1 de  $0.1718 \text{ g SSVi}/\text{cm}^2$  y TA2 de  $0.214 \text{ g SSVi}/\text{cm}^2$  y para el PP los valores fueron de  $0.1698 \text{ g SSVi}/\text{cm}^2$  y  $0.1726 \text{ g SSVi}/\text{cm}^2$  para los TC1 y TC2 respectivamente, además de que su densidad era menor a la del agua lo que probablemente le favoreció para que se adhirieran mayor cantidad de microorganismos para la formación del biofilm.
  
- Al evaluar diferencias significativas entre los grupos de reactores, se obtuvo diferencias no significativas, lo que indica que es posible la aplicación en reactores de lecho fijo una mezcla de estos materiales plásticos reciclados.

## 5. RECOMENDACIONES

- Se recomienda probar con materiales plásticos reciclables de diferente espesor y con una densidad inferior a la del agua.
- Para análisis futuros sobre tratamientos de aguas residuales, se recomienda probar con reactores anaerobios a escala de laboratorio.
- Usar un compresor que suministre aire con la suficiente fuerza para que de esta manera mueva la mayor cantidad de medios de soporte colocados dentro de los reactores, o en su defecto un sistema de agitación mecánica para reactores de lecho móvil.
- Es recomendable usar un sistema de corriente auxiliar en casos de fallos prolongados del sistema eléctrico público.

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguirre, M. (2013). Reactores biológicos. *Agua y Depuración*.
- Barros de Macedo, J. (2000). “*Aguas&Aguas*”. Bello Horizonte: Brazil.
- Bilurbina, L., & Liesa, F. (1990). *Materiales no metálicos resistentes a la corrosión*. Barcelona: Marcocombo, S.A.
- Bódalo Santoyo, A., Gómez, E., & Fuensanta Máximo, M. (2002). *Química en Murcia*. España: Universidad de Murcia, Servicio de publicaciones.
- Calderón Mólgora, C. G. (2005). Identificación y descripción de los sistemas secundarios de tratamiento de aguas residuales. *Serie autodidáctica de medición de la calidad del agua*, [http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/Sistemas\\_secundarios.pdf](http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/Sistemas_secundarios.pdf), 8-15.
- Castells, X. E. (2012). *Los plásticos residuales y sus posibilidades de valoración*. Madrid.
- Cesar Saldarriaga, J., Ángela Hoyos, D., & Correa, M. A. (2011). Evaluación De Procesos Biológicos Unitarios En La Remoción Simultánea De Nutrientes Para Minimizar La Eutrofización. *Revista EIA*, 133.
- Costerton, J., Philip, S., & Greenberg, E. (1999). En *Bacterial biofilms: A common cause of persistent infections*. (págs. Science, 284.).
- Eighmy, T., & Maratea, D. P. (1983). Electron microscopic examination of wastewater biofilm formation and structural components. .
- Gálvez Rodríguez, J. (2001). *Tesis doctoral: Eliminación de la Materia Orgánica y del Nitrógeno en el Agua Residual Urbana Mediante Lechos Inundados*. Granada: España.
- J.D., P., & C.A., C. (1996). Escória de altoforno. Una nova alternativa de meio suporte para filtros anaeróbios. In *Anais do III simposio Ítalo – Brasileiro de Engenharia Sanitaria e ambiental.*, (pág. 76). Brasil.

- Jiménez, C. B. (2001). *La contaminación ambiental en México*. México D.F: Limusa S.A.
- Kingsley, J., & Roby, A. (01 de 11 de 1999). *INVENES*. Obtenido de Oficina Española de Patentes y Marcas: <http://invenes.oepm.es/InvenesWeb/detalle?referencia=E95107044>
- Kinner, N., Balkwill, D., & Bishop, P. (1982). *Film Biological Processes*. king's Island, Ohio.
- Mackenzie, D. (2005). *Ingeniería y Ciencias Ambientales*. México: MCGRAW-HILL / INTERAMERICANA DE MEXICO.
- Microorganismos de uso industrial. (2009). *wikispace*. Obtenido de wikispace: <http://microorganismosusoindustrial.wikispaces.com/H.+CINETICA+CRECIMIENTO>)
- Negrón, M. (2009). *Microbiología Estomatológica: Fundamentos y Guía práctica*. Buenos Aires: Panamericana.
- Romero, M., Colín, A., & Sánchez, E. (Agosto 2009). Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: evaluación de la remoción de la carga orgánica. *Revista internacional de contaminación ambiental vol.25 no.3*, [http://scielo.unam.mx/scielo.php?pid=S018849992009000300004&script=sci\\_arttext#f1](http://scielo.unam.mx/scielo.php?pid=S018849992009000300004&script=sci_arttext#f1).
- Sinclair, A. (2008). *Disposable Bioreactors: The Next Generation*. BioPharm International.
- Téllez Peña, S. (12 de Mayo de 2010). Los Biofilms y su repercusión en la Industria Alimentaria. *Revista VISAVET Divulgación*.
- Torres, P., A. Rodríguez, J., & Eugenia Uribe, I. (2003). Tratamiento De Aguas Residuales Del Proceso De Extracción De Almidón De Yuca En Filtro Anaerobio: Influencia Del Medio De Soporte. *Scientia et Technica*, 76.
- TRATAMIENTO BIOLÓGICO DE AGUAS RESIDUALES*. (Octubre de 2009). Obtenido de <http://www.oocities.org/edrochac/residuales/procesoslodos.htm>

- Waleed, M. K. (1993). *Tesis doctoral: Physical Properties of Rotating Biological Contactor Biofilms.*
- Welter, A. B., Romero, J. M., Grumelli, Y. A., Sanchez, J. A., & Ascar, G. I. (2005). *La biopelícula en los procesos RBC.* Camino a Alta Gracia Km 10 – 5000 – Córdoba.: Universidad Católica de Córdoba, Campus Universitario, Facultad de Ingeniería.
- Westerling, K. (2008). *Headworks INTERNATIONAL.* Obtenido de Water online: <http://www.wateronline.com/doc/moving-bed-biofilm-reactor-mbbr-technology-0001>
- Zalakain, G., & Manterola, G. (2011). Procesos avanzados de biomasa fija sobre lecho móvil para el tratamiento de aguas residuales en la industria farmacéutica. *Tecnología industrial*, 99-101.

## 7. ANEXOS

### ANEXO A: ENCUESTAS REALIZADAS A LAS RECICLADORAS EN LA CIUDAD DE MACHALA

UNIVERSIDAD TECNICA DE MACHALA  
UNIDAD ACADÉMICA DE CIENCIAS QUÍMICAS Y LA SALUD  
CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA

### ENCUESTA SOBRE EL RECICLAJE DE MATERIALES PLÁSTICOS DESECHADOS

**NOMBRE DE LA EMPRESA:** Recicladora Nick

**DIRECCION:** Sector 5 esquinas

**NOMBRE DEL ENCUESTADO:** Vicente San Martin

**CARGO QUE OCUPA:** Trabajador

**FECHA DE CONSULTA:**

#### 1.- ¿Qué tipo de materiales reciclan en la planta?

- a) Plástico ( x )
- b) Papel ( x )
- c) Metal ( x )
- d) Textiles ( )
- e) Vidrio ( )
- f) Otros:

#### PLÁSTICOS:

##### a.1.- ¿Qué tipo de plásticos reciclan?

- a) Tapas ( x )
- b) Botellas ( x )
- c) Fundas ( x )
- d) Tubos ( )
- e) Cubiertos ( )
- f) Vasos ( )
- g) Otros ( x ) Envases de yogurt, envases de desinfectantes

##### a.2.- ¿Con que frecuencia llega el material plástico para ser reciclado?

- a) Todos los días ( )
- b) 2 veces al día ( )
- c) 3 veces a la semana ( )
- d) Otros ( x ) Casi todos los días

##### a.3.- ¿En qué proporciones o cantidades reciclan este material?

- |  | <b>Cantidad</b> |
|--|-----------------|
|--|-----------------|

**UNIVERSIDAD TECNICA DE MACHALA**  
**UNIDAD ACADÉMICA DE CIENCIAS QUIMICAS Y LA SALUD**  
**CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**ENCUESTA SOBRE EL RECICLAJE DE MATERIALES PLÁSTICOS DESECHADOS**

**NOMBRE DE LA EMPRESA:** Recicladora Súper  
**DIRECCION:** Juan Palomino  
**NOMBRE DEL ENCUESTADO:** Jan Carlos Granda  
**CARGO QUE OCUPA:** Trabajador  
**FECHA DE CONSULTA:**

**1.- ¿Qué tipo de materiales reciclan en la planta?**

- a) Plástico ( x )
- b) Papel ( x )
- c) Metal ( x )
- d) Textiles ( )
- e) Vidrio ( )
- f) Otros:

**PLÁSTICOS:**

**a.1.- ¿Qué tipo de plásticos reciclan?**

- a) Tapas ( x )
- b) Botellas ( x )
- c) Fundas ( x )
- d) Tubos ( )
- e) Cubiertos ( )
- f) Vasos ( )
- g) Otros ( x ) Plástico duro como pomas, frascos de suavizante.

**a.2.- ¿Con que frecuencia llega el material plástico para ser reciclado?**

- a) Todos los días ( )
- b) 2 veces al día ( )
- c) 3 veces a la semana ( )
- d) Otros ( x ) 5 veces al día

**a.3.- ¿En qué proporciones o cantidades reciclan este material?**

- |  | <b>Cantidad</b> |
|--|-----------------|
|--|-----------------|

**UNIVERSIDAD TECNICA DE MACHALA**  
**UNIDAD ACADEMICA DE CIENCIAS QUÍMICAS Y LA SALUD**  
**CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**ENCUESTA SOBRE EL RECICLAJE DE MATERIALES PLÁSTICOS  
DESECHADOS**

**NOMBRE DE LA EMPRESA:** Recicladora Don Reina

**DIRECCION:** Colon tinoco y Juan Palomino

**NOMBRE DEL ENCUESTADO:** Domingo Reina

**CARGO QUE OCUPA:** Dueño

**FECHA DE CONSULTA:**

**1.- ¿Qué tipo de materiales reciclan en la planta?**

- a) Plástico ( x )
- b) Papel ( x )
- c) Metal ( x )
- d) Textiles ( )
- e) Vidrio ( )
- f) Otros:

**PLÁSTICOS:**

**a.1.- ¿Qué tipo de plásticos reciclan?**

- a) Tapas ( x )
- b) Botellas ( x )
- c) Fundas ( x )
- d) Tubos ( )
- e) Cubiertos ( )
- f) Vasos ( )
- g) Otros ( x ) Baldes, tinas, lavacaras

**a.2.- ¿Con que frecuencia llega el material plástico para ser reciclado?**

- a) Todos los días ( )
- b) 2 veces al día ( x )
- c) 3 veces a la semana ( )
- d) Otros ( )

**a.3.- ¿En qué proporciones o cantidades reciclan este material?**

**Cantidad**

- a) Tapas 0,007 Ton/mes
- b) Botellas 0,007 Ton/mes
- c) Fundas 0,014 Ton/mes
- d) Tubos
- e) Cubiertos
- f) Vasos
- g) Otros

**UNIVERSIDAD TECNICA DE MACHALA**  
**UNIDAD ACADÉMICA DE CIENCIAS QUÍMICAS Y LA SALUD**  
**CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**ENCUESTA SOBRE EL RECICLAJE DE MATERIALES PLÁSTICOS  
DESECHADOS**

**NOMBRE DE LA EMPRESA:** Recicladora Dos Hermanos

**DIRECCION:** Avenida Juan Palomino

**NOMBRE DEL ENCUESTADO:** Jorge Rodríguez

**CARGO QUE OCUPA:** Trabajador

**FECHA DE CONSULTA:**

**1.- ¿Qué tipo de materiales reciclan en la planta?**

- a) Plástico ( x )
- b) Papel ( x )
- c) Metal ( x )
- d) Textiles ( )
- e) Vidrio ( )
- f) Otros:

**PLÁSTICOS:**

**a.1.- ¿Qué tipo de plásticos reciclan?**

- a) Tapas ( x )
- b) Botellas ( x )
- c) Fundas ( x )
- d) Tubos ( )
- e) Cubiertos ( )
- f) Vasos ( )
- g) Otros ( x ) Envases de yogurt, Envases de aceite

**a.2.- ¿Con que frecuencia llega el material plástico para ser reciclado?**

- a) Todos los días ( )
- b) 2 veces al día ( )
- c) 3 veces a la semana ( )
- d) Otros ( x ) Unas 10 veces al día

**a.3.- ¿En qué proporciones o cantidades reciclan este material?**

- |  | <b>Cantidad</b> |
|--|-----------------|
|--|-----------------|

## ANEXO B: COMPARACIÓN ESTADÍSTICA SIGNIFICATIVA DE LOS DISTINTOS TIPOS DE REACTORES

26/06/2015 13:55

One-Way ANOVA on col(A) -> col(E):

Data	Mean	Variance	N
A	0,1929	8,9842E-4	2
F	0,2105	5,5778E-4	2
E	0,1712	3,92E-6	2

F = 1,6812  
p = 0,33639

At the 0,05 level,  
the means are NOT significantly different.

Fuente: La autora

## ANEXO C: ANÁLISIS DE NITRÓGENO TOTAL REALIZADOS EN LA EMPRESA NEMALAB



### RESULTADOS DE ANÁLISIS QUIMICO DE AGUA

NOMBRE CLIENTE:	ROMERO GRANDA PRISCILA ALEJANDRA	No. DOCUMENTO:	26601
NOMBRE REMITENTE SRTA.	PRISCILA ROMERO GRANDA	FECHA DE MUESTREO:	22/01/2.015
LOCALIZACIÓN:	MACHALA - EL ORO	FECHA DE INGRESO:	22/01/2.015
		FECHA DE SALIDA:	29/01/2.015

IDENTIF	IDENTIF.	mg/l
LAB.	MUESTRA	NITRÓGENO TOTAL
5470	AGUA DE CANAL	0.11



BIOQ.SORAYA PEREZ  
JEFE DE LABORATORIO




ING. NARCISA PINTADO  
SERV. AL CLIENTE

"ESTOS RESULTADOS PUEDEN SER SUJETOS DE COMPARACIÓN, SIEMPRE Y CUANDO SE UTILICE LA MISMA METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE ESTE LABORATORIO."

## ANEXO D: REGISTRO FOTOGRÁFICO DE EQUIPOS PARA ANALISIS QUÍMICOS

### Análisis de Demanda Química de Oxígeno – DQOs

Filtración de la muestra de agua residual



Fuente: La autora

Digestor DQOs



Fuente: La autora

## Espectrofotómetro



**Fuente: La autora**

## Análisis de Fósforo Total - P

Cubetas cuadradas



**Fuente: La autora**

## Reactivo – PhosVer 3



Fuente: La autora

Espectrofotómetro



Fuente: La autora

**ANEXO E: REGISTRO FOTOGRÁFICO DE EQUIPOS PARA ANALISIS FÍSICOS.**

**Análisis de Sólidos Suspendingos Volátiles - SSV**

Estufa



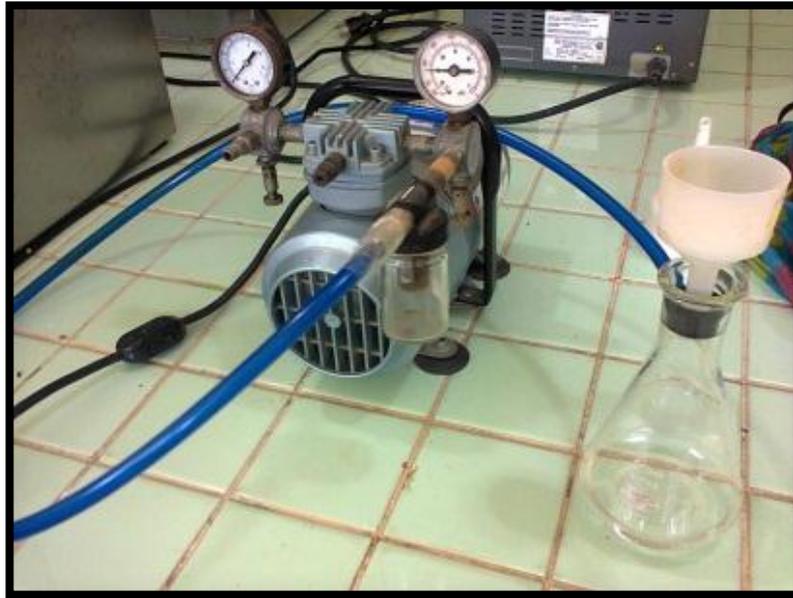
**Fuente: La autora**

Mufla



**Fuente: La autora**

Equipo de Filtración de Vacío



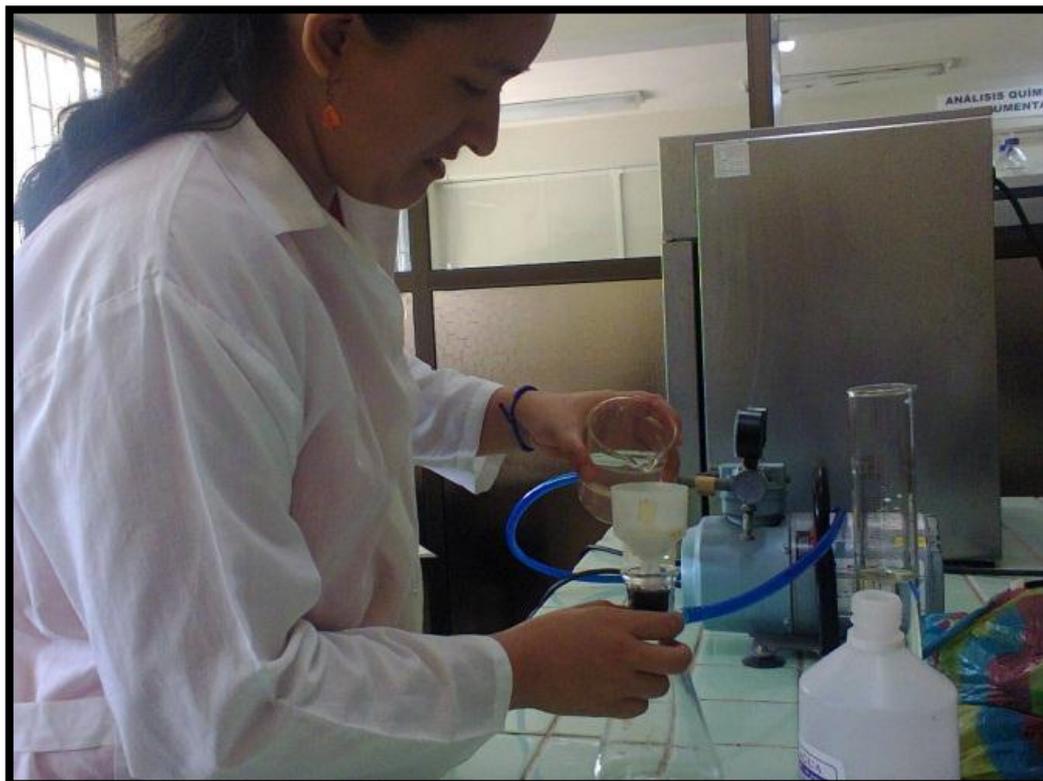
**Fuente: La autora**

Desecador



**Fuente: La autora**

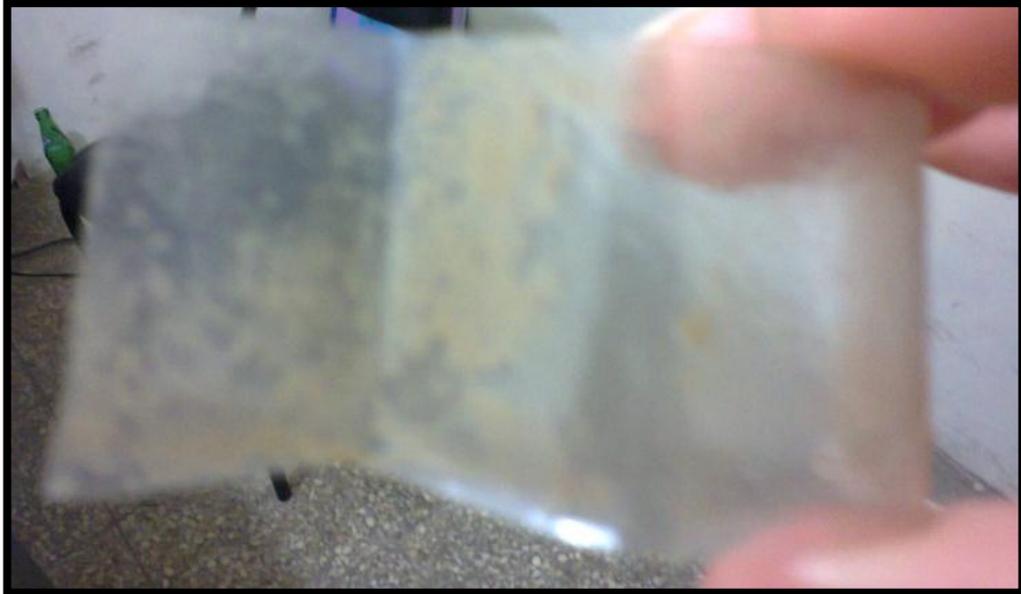
Proceso de filtración por membrana en bomba de vacío



Fuente: La autora

## **ANEXO F: BIOPELÍCULA ADHERIDA AL MATERIAL PLASTICO**

Biopelícula formada en el plástico PET



**Fuente: La autora**

Biopelícula formada en el plástico HDPE



**Fuente: La autora**

Biopelícula formada en tapas plásticas (PP)



**Fuente: La autora**