

**EVALUACIÓN DE UN REACTOR DE CONTACTORES BIOLÓGICOS ROTATIVOS
CON DISCOS DE MATERIAL NO CONVENCIONAL PARA EL TRATAMIENTO DE
UN AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA, A ESCALA DE LABORATORIO.**



**JULIÁN DANIEL MOLINA
LUISA MARÍA MONTENEGRO
Estudiantes de Ingeniería Ambiental**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
POPAYÁN-CAUCA
2015**

**EVALUACIÓN DE UN REACTOR DE CONTACTORES BIOLÓGICOS ROTATIVOS
CON DISCOS DE MATERIAL NO CONVENCIONAL PARA EL TRATAMIENTO DE
UN AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA, A ESCALA DE LABORATORIO.**



**JULIÁN DANIEL MOLINA
LUISA MARÍA MONTENEGRO**
Estudiantes de Ingeniería Ambiental

**Plan de trabajo de grado en la modalidad de trabajo de investigación, como
requisito parcial para optar al título de Ingeniero Ambiental**

Director
ING. NAPOLEON ZAMBRANO
Codirectora
PhD. PATRICIA VELEZ
Asesoras:
M.Sc. SANDRA RIVAS
M.Sc. NILZA VELASCO
Esp. LYDA PATRICIA MOSQUERA

UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
POPAYÁN-CAUCA
2015

Nota de aceptación:

Firma del jurado

Firma del jurado

Popayán Cauca, Abril de 2015

AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestros más sinceros agradecimientos, reconocimiento y cariño a quienes nos han apoyado y que hoy representan un gran ejemplo para nuestra futura vida profesional:

A nuestro director de tesis, Ingeniero Napoleón Zambrano Alfonso por su colaboración, orientación y dedicación durante el desarrollo de este trabajo.

Al grupo de investigación BIMAC dirigido por nuestra codirectora Patricia Vélez y a las integrantes asesoras Sandra Rivas, Lyda Mosquera y Nilza Velasco por su colaboración y apoyo recibido durante el desarrollo de esta investigación.

A todos los integrantes de los laboratorios de ingeniería ambiental y biología por su colaboración y paciencia.

A compañeros, amigos y demás personas que contribuyeron para llevar a cabo este logro.

A todos ustedes, expresamos infinitos sentimientos de gratitud por haber sido parte de este proceso y contribuir en este gran logro.

DEDICATORIAS

*Todo mi esfuerzo, sacrificio, dedicación y empeño plasmado en esta tesis está
dedicado:*

*A mis padres y hermanos, por su inmenso cariño y apoyo constante durante mi
carrera*

*Al ingeniero Carlos Serrano por la confianza depositada en mí y apoyo en todo
momento.*

*A mi compañera Luisa Montenegro por su dedicación, ayuda y compromiso con
la tesis.*

Daniel Molina

*A Dios por el camino recorrido y la bendición recibida al procurarme salud,
sabiduría, paciencia y voluntad durante toda la carrera.*

*Mi más profundo agradecimiento hacia mis padres y hermana , quienes durante
todos estos años confiaron en mí y me dieron su amor y apoyo incondicional,
comprendiendo mis ideales, dándole dirección, sentido y propósito a mi vida. Soy
poseedora de la fortuna más importante....mi familia.*

*A mis amigos que especialmente llegaron a mi vida, les agradezco el haber
compartido momentos agradables y tristes, gracias por tantos recuerdos; los
quiero mucho y nunca los olvidaré, a mi compañero de tesis por vivir a mi lado
cientos de horas de estudio así como momentos felices y otros irónicos pero de
aprendizaje mutuo.*

*Y claro, a la vida por permitirme llegar a este punto, fin de una etapa más pero
comienzo de otra nueva que viviré con mayor intensidad.*

Luisa Montenegro

RESUMEN GENERAL DEL TRABAJO DE GRADO

TÍTULO: EVALUACIÓN DE UN REACTOR DE CONTACTORES BIOLÓGICOS ROTATIVOS CON DISCOS DE MATERIAL NO CONVENCIONAL PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES A ESCALA DE LABORATORIO.

AUTORES: Julián Daniel Molina y Luisa María Montenegro
UNIVERSIDAD: Universidad del Cauca
FACULTAD: Facultad de Ingeniería Civil
PROGRAMA: Ingeniería Ambiental
DIRECTOR: Ingeniero Napoleón Zambrano
CODIRECTOR: PhD. Patricia Vélez

RESUMEN

En este trabajo de grado, se evaluó un sistema alternativo de tratamiento de agua residual doméstica por medio de un sistema de biodisco, construido con materiales no convencionales (acrílico, plástico, tela verde de cerramiento y geotextil) lo cual fue el factor diferencial de esta investigación, con el fin de establecer eficiencias de remoción se utilizaron parámetros fisicoquímicos (DBO_5 , DQO, pH y temperatura) y microbiológicos (coliformes totales y fecales) los cuales presentaron remociones mayores al 70%, demostrando la eficiencia del reactor y buenas condiciones ambientales, de acuerdo a estudios previos de consulta.

Una segunda fase de la investigación consistió en realizar un seguimiento de las características físicas y microbiológicas de la biopelícula en los diferentes materiales de los discos, con lo cual se determinó que el geotextil por sus características físicas, con una porosidad mayor al 90% y buena durabilidad, es el material más viable para la construcción de biodiscos, presentando buena adhesión de la biopelícula, siendo un material de bajo costo y de fácil obtención, apropiado para implementarlo en la construcción y diseño de biodiscos para futuras investigaciones.

PALABRAS CLAVES: Biodiscos, biopelícula, remoción, parámetros fisicoquímicos, parámetros biológicos, materiales no convencionales.

V°B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

V°B° CODIRECTOR(A) DE TRABAJO DE GRADO

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	14
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	15
2. JUSTIFICACIÓN.....	16
3. OBJETIVOS.....	17
3.1 Objetivo general.....	17
3.2 Objetivos específicos	17
4. ANTECEDENTES.....	18
5. MARCO TEÓRICO	20
5.1 Agua residual doméstica.....	20
5.1.1 Calidad del agua.	20
5.1.2 Tratamiento de las aguas residuales.	22
5.2 Aspectos generales del sistema de biodiscos	22
5.2.1 Descripción del proceso.	22
5.2.2 Ventajas y desventajas.....	23
5.2.3 Componentes de un sistema de biodiscos	24
5.2.4 Factores que influyen en la operación de los biodiscos.	25
5.3 Materiales de construcción y factores de forma	27
5.3.1 Características de los materiales no convencionales para la construcción de biodiscos usados en la investigación	28
5.3.1.1 Geotextil.	29
5.3.1.2 Plástico de invernadero.	29
5.3.1.3 Tela verde de cerramiento	30
5.3.1.4 Acrílico.....	31
5.4 Procesos bioquímicos.....	31
5.4.1 Comunidades microbiológicas en biodiscos.	31
5.4.2 Biopelícula.....	32
6. METODOLOGÍA	34
6.1 Delimitación de la zona de estudio.....	34
6.2 Sistema de tratamiento	34

6.3	Montaje de laboratorio	34
6.4	Construcción del sistema de biodiscos (Anexo B).....	34
6.4.1	Características de los discos	34
6.4.2	Dimensiones del reactor	34
6.5	Alimentación	38
6.6	Aclimatación y arranque del reactor: alimentación en batch	39
6.7	Alimentación en continuo y muestreo	39
6.8	Metodología para el objetivo número 1.....	40
6.8.1.	Parámetros fisicoquímicos.....	40
6.8.2.	Parámetros microbiológicos.....	40
6.9	Metodología para el objetivo número 2.	41
6.9.1	Seguimiento físico de la biopelícula	41
6.9.2	Seguimiento microbiológico de la biopelícula	41
7.	PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	43
7.1	Parámetros fisicoquímicos	43
7.1.1	pH (Anexo E).....	43
7.1.2	Temperatura (Anexo F).	44
7.1.3	Demanda Química de Oxígeno (Anexo G)	45
7.1.4.	Demanda Bioquímica de Oxígeno DBO ₅ (Anexo H)	46
7.1.5	Sólidos Suspendidos Totales.....	47
7.2	Parámetros microbiológicos.....	48
7.3	Análisis seguimiento físico	49
7.3.1	Análisis de las muestras (acrílico, plástico, tela verde de cerramiento y geotextil) masa/ área (g/cm ²).....	49
7.3.2	Seguimiento del color de la biopelícula.....	56
7.4	Análisis seguimiento microbiológico (Anexo L)	57
8.	CONCLUSIONES	59
9.	RECOMENDACIONES	60
10.	BIBLIOGRAFÍA	61
	ANEXOS.....	68

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características del acrílico para la cubierta del biodisco (Adaptado de Ideplast).....	20
Tabla 2. Parámetros fisicoquímicos más importantes relacionados con la calidad de un ARD.....	21
Tabla 3. Niveles de tratamiento (Tomado de Suarez, 2011)	22
Tabla 4. Ventajas y desventajas en los procesos RBC (Adaptado de Ordoñez, 2003 y Martínez, 2001).....	23
Tabla 5. Diferentes materiales utilizados para la construcción de biodiscos	27
Tabla 6. Diferentes materiales usados en los RBC y eficiencias de remoción.....	28
Tabla 7. Características del geotextil NT 1600 (Fernández et al., 2010)	29
Tabla 8. Características del material plástico PE utilizado para la cubierta del biodisco (Adaptado de Infoagro)	30
Tabla 9. Características de la tela verde para la cubierta del biodisco (Adaptado de Progen).....	30
Tabla 10. Características del acrílico para la cubierta del biodisco (Adaptado de Ideplast).....	31
Tabla 11. Aforos	37
Tabla 12. Características típicas para reactores de Biodiscos	38
Tabla 13. Características del ARS (Rodríguez y Lozano, 2012).....	39
Tabla 14. Cantidad de pruebas que se tomaron	39
Tabla 15. Metodología empleada para la realización de los ensayos.....	40
Tabla 16. Área y peso de los materiales prototipos.....	41
Tabla 17. Resultados de las pruebas de fermentación con caldo LMX en tubos múltiples para coliformes totales	48
Tabla 18. Resultados de las pruebas de fermentación con caldo LMX en tubos múltiples para coliformes fecales	48
Tabla 19. Resumen Estadístico para Acumulación g/cm^2	49
Tabla 20. Verificación de Varianza.....	50
Tabla 21. Prueba de Kruskal-Wallis para Acumulación g/cm^2 por Material- biopelícula seca	50
Tabla 22. Resumen Estadístico para Acumulación g/cm^2 – biopelícula húmeda.....	52
Tabla 23. Verificación de Varianza – biopelícula húmeda	53
Tabla 24. Prueba de Kruskal-Wallis para Acumulación g/cm^2 por Material – biopelícula húmeda.....	53

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Comportamiento del pH para un TRH de 27 horas	43
Gráfica 2. Comportamiento de la temperatura para un TRH de 27 horas.....	44
Gráfica 3. Comportamiento de la DQO para un TRH de 27 horas.....	45
Gráfica 4. Porcentaje de remoción de la DQO para un TRH de 27 horas	45
Gráfica 5. Comportamiento de la DBO ₅ para un TRH de 27 horas	47
Gráfica 6. Porcentaje de remoción de la DBO ₅ para un TRH de 27 horas	47
Gráfica 7. Acumulación en los diferentes materiales – biopelícula secada 10 min masa/área (g/cm ²)	51
Gráfica 8. Acumulación en los diferentes materiales – biopelícula secada 10 min masa/área (g/cm ²)	54

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Componentes de un sistema de biodisco.....	24
Ilustración 2. Formación de la biopelícula	32
Ilustración 3. Modelo del canal de agua	32
Ilustración 4. Dimensiones de los discos.....	34
Ilustración 5. Dimensiones del reactor	34
Ilustración 6. Ubicación del ángulo α	36
Ilustración 7. Vista general del sistema de biodisco	38
Ilustración 8. Materiales	41
Ilustración 9. Toma de muestras	42

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1. Volumen del reactor	35
Ecuación 2. Volumen efectivo del reactor.	35
Ecuación 3. Área efectiva	36
Ecuación 5. Tiempo de retención hidráulico	36

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Normatividad colombiana con respecto a principales parámetros microbiológicos y fisicoquímicos (Adaptado de Decreto 1594 de 1984)	69
Anexo B. Seguimiento y registro fotografico sistema RBC.....	70
Anexo C. Volúmenes de sustrato aplicados para la adecuación del reactor (alimentación en batch)	75
Anexo D. NMP para varias combinaciones de resultados para 5 tubos de fermentación por dilución (Apha et al., 1998)	78
Anexo E. Resultados para el pH	79
Anexo F. Resultados para la temperatura.....	80
Anexo G. Resultados de la DQO	81
Anexo H. Resultados de la DBO ₅	81
Anexo I. Pesos y resumen de los diferentes materiales.....	82
Anexo J. Estudios con biodiscos, enfatizando en el material de construcción del medio de soporte.....	85
Anexo K. Seguimiento microbiológico y registro fotográfico del sistema RBC.....	87

INTRODUCCIÓN

En Colombia al igual que en otros países de la región, los cuerpos hídricos son receptores de todo tipo de vertimientos de aguas residuales (A.R) los cuales disminuyen su calidad, ponen en riesgo la salud de sus habitantes, disminuyen la productividad y aumentan los costos de tratamiento del recurso hídrico. Entre el 67% y 72% de las aguas residuales (AR) vertidas a los cuerpos hídricos no recibe ningún tipo de tratamiento, ocasionando problemas de disminución de calidad, riesgo para la salud humana, disminución de la productividad y aumento de los costos de tratamiento del recurso hídrico (Plan nacional de desarrollo, 2014; Global Water Partnership, 2000).

En la medida en que se evalué una alternativa de bajo costo para el tratamiento de aguas residuales se les podrá dar un adecuado manejo y minimizar la contaminación al ambiente. Los reactores de biodiscos (RBC, Rotating Biological Contactors en inglés) se presentan como una opción tecnológica para las pequeñas y medianas comunidades, dada su alta eficiencia, bajos costos de operación y fácil construcción.

Los trabajos realizados por (Najafpour et al., 2005), (Griffin y Findlay, 2000) y (Spengel y Dzombak, 1991), demuestran que los RBC ofrecen un número significativo de ventajas sobre otros sistemas de tratamiento, destacándose las siguientes: efluentes de buena calidad incluyendo nitrificación total, costos bajos y facilidad de operación y mantenimiento. Este sistema de crecimiento adherido ha sido utilizado con éxito para el tratamiento de aguas residuales municipales, industriales y aguas consideradas peligrosas por el contenido de tóxicos.

Dado que la utilización de diferentes materiales no convencionales como plástico, acrílico, tela verde de cerramiento, y geotextil como material para la construcción de los discos no ha sido objeto de estudio, este trabajo contribuyó a determinar si dichos materiales son efectivos para la construcción de un biodisco a escala de laboratorio para aplicarse al tratamiento de las aguas residuales.

Por lo tanto el propósito de este trabajo fue evaluar la eficiencia de un contactor biológico rotativo a escala de laboratorio con discos de material no convencional (plástico, acrílico, tela verde de cerramiento, y geotextil), para el tratamiento de las aguas residuales domésticas, como posible alternativa para el diseño de biorreactores de bajo costo.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Aunque se han desarrollado numerosas alternativas de tratamiento de aguas residuales para dar solución a este tipo de problema, la falta de información sobre el funcionamiento, operación y mantenimiento de las tecnologías de tratamiento de aguas residuales tradicionales, la mala adaptación al medio y la baja capacidad local para su sostenimiento y manejo conducen a la implementación de sistemas inoperantes y al abandono de los existentes (Bernal et al., 2005).

Para Von Sperling (1995) en los países de desarrollo como Colombia y otros países de la región, los costos de construcción, la sostenibilidad, la facilidad de operación y mantenimiento y los costos operativos, son factores críticos en los procesos de selección de tecnologías de tratamiento de aguas residuales.

Los reactores de biodiscos han sido ampliamente aplicados a las aguas residuales (AR) que son adecuadas para realizarles un tratamiento biológico. Hasta 1985, Japón tenía 1.323 plantas con arreglos de RBC, de los cuales el 10 % se utiliza para la biorremediación de los lixiviados generados en los vertederos municipales (Castillo et al., 2007). Los biodiscos representan un medio viable para el tratamiento secundario de AR municipales e industriales (Banerjee, 1997), además en comparación con otros reactores, el RBC está demostrando ser eficaz en el tratamiento de aguas residuales complejas (Alemzadeh et al, 2002; Kapdan y Kargi, 2002; Axelsson et al, 2006).

Con respecto a las alternativas de tratamiento de AR, en el mercado existen diferentes tecnologías para aplicar, no obstante en el país se han enfocado los tratamientos especialmente en sistemas de lagunaje y en menor medida en filtros anaerobios y lodos activados complementados con tratamientos fisicoquímicos puesto que son los más utilizados y conocidos en nuestro medio, pero no siempre los más eficaces (Pérez, 2010). Existe otro tipo de tratamiento biológico alternativo que son los RBC que comparado con los otros sistemas aerobios su consumo de energía es mínimo, tienen bajos costos y simplicidad en su operación.

Sin embargo, los RBC han sido un sistema poco investigado y mucho menos implementado en el país, lo cual hace necesario su estudio como alternativa para el tratamiento de AR. En vista de que los RBC son una tecnología viable para ser llevada a cabo en el laboratorio, utilizando un material no convencional para el soporte de la película fija, se evaluó la eficiencia del reactor a partir de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos en un agua residual sintética (ARS).

2. JUSTIFICACIÓN

Las diferentes condiciones topográficas, sociales, climatológicas, tecnológicas, demográficas, económicas, entre otras, que presentan las pequeñas poblaciones de Colombia y América Latina representan un reto a la hora de seleccionar tecnologías sostenibles para el tratamiento de las aguas residuales domésticas, creándose la necesidad de desarrollar herramientas que faciliten la toma de decisiones para la implementación de estos sistemas (Bernal et al., 2005).

El material de soporte del crecimiento de la biopelícula constituye la parte esencial del proceso de tratamiento del RBC, los medios de soportes utilizados en la actualidad son plásticos de polipropileno, poliestireno y de PVC, los cuales tienen un costo por metro cuadrado 100% mayor que los materiales no convencionales.

Son pocos los estudios realizados en RBC enfocados en el crecimiento de la biopelícula y más aún en las comunidades microbiológicas desarrolladas (Rivera et al., 1988; Cereceda et al., 2001; Guerra, 1988), por lo tanto se hace imprescindible la caracterización de estas con el fin de tener un conocimiento profundo en la relación medio, microorganismos y eficiencia.

Las remociones de demanda bioquímica de oxígeno obtenidas por este sistema de tratamiento (RBC), varían de 80-95%, dependiendo principalmente del tipo de AR por tratar (Martínez, 2001). Por tanto los RBC se presentan como una alternativa viable para el tratamiento secundario de las aguas residuales, debido a las ventajas que tienen en cuanto a costos, eficiencia, operación y mantenimiento; con el estudio de un material no convencional de bajo costo para el soporte de la película fija, se podrá tener una amplia aplicabilidad en pequeñas y medianas poblaciones; los resultados de esta investigación aportará mayor conocimiento en los estudios de tratamiento de aguas residuales contribuyendo a generar una posible alternativa tecnológica a considerar.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Evaluar la eficiencia de un RBC a escala de laboratorio con discos de material no convencional (plástico, acrílico, tela verde de cerramiento, y geotextil) para el tratamiento de un agua residual doméstica.

3.2 Objetivos específicos

Determinar la calidad del afluente y efluente del RBC para establecer eficiencias de remoción de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos para un tiempo de retención de 27 horas.

Realizar un seguimiento de las características físicas y microbiológicas de la biopelícula en los diferentes materiales de los discos (plástico, acrílico, tela verde de cerramiento y geotextil), para determinar la mejor opción en la construcción de estos.

4. ANTECEDENTES

El origen de los discos biológicos para tratamiento de aguas de desecho parece remontarse hasta el final del siglo XIX con un estudio de Weigand sobre “el poder depurador de las ruedas de molino en agua” su patente describe un cilindro constituido por tablas de madera parcialmente sumergido en aguas de desecho. En los años veinte, en Alemania y en Estados Unidos se experimentaba con discos de madera giratorios pero no fueron efectivos debido a su rápido desgaste y deficiente fabricación (Peters y Alleman, 1982).

En 1929 J. Doman, informó sobre el desarrollo de un filtro de contacto que usaba placas de acero galvanizado sumergidas. Otra opción fue la rueda biológica patentada por A.T. Maltby poco antes de 1930, la unidad consiste en un grupo de ruedas parcialmente sumergidas que giran por el flujo de agua que circula por un canal. Los materiales del medio soporte más utilizados durante este periodo fueron la madera y el hierro, que se deterioraban rápidamente por lo que ello supuso un freno al avance de estos RBCs iniciales (Bezanilla, 1993).

Fue hasta la década de los 50 en la que investigadores europeos comienzan a investigar con discos rotatorios de plástico. En la universidad de Stuttgart se investigó extensivamente el uso de discos de plástico y madera de 1m de diámetro. Un mejoramiento posterior debido a Popel y Hartmann permite el uso del plástico de poliestireno expandido y se inicia entonces la aplicación comercial.

En el verano de 1965, se evaluaron en la planta de tratamiento de Jones Island en Milwaukee (Wisconsin, USA) discos de metal aluminio de 1 metro de diámetro (Antoine, 1982).

En 1972, la Autotron anuncio el desarrollo de un disco más compacto y con mayor área superficial para el soporte de los microorganismos construido con hojas de polietileno. A partir de este momento el proceso se vuelve una mejor opción que el tratamiento de lodos activados, debido principalmente a los bajos costos de operación (Peters y Alleman, 1982).

En 1980 en el primer simposio nacional sobre reactores biológicos de contacto la EPA, recoge toda la información sobre investigaciones realizadas hasta el momento sobre conceptos y modelos de diseño, las remociones de materia carbonacea y nitrogenacea, variables del proceso y propiedades de la biopelícula, estudios biocinéticos además de tratamientos con aguas residuales domésticas e industriales, evidenciándose el buen funcionamiento de los RBC para el tratamiento de aguas residuales utilizando polímeros sintéticos como material de soporte de los biodiscos (EPA, 1980).

En el contexto latinoamericano la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) desarrolló investigaciones para construir este sistema con materiales más baratos, pero no se encuentra información precisa en bases de datos confiables (Martínez, 2001).

(Valdez y Montesino, 2003) a partir de un RBC diseñado y construido a escala de laboratorio, estudiaron la operación del sistema de tratamiento en continuo para diferentes cargas superficiales orgánicas empleando un residual sintético, con una composición semejante a la de un residual doméstico, con el propósito de conocer el comportamiento del dispositivo en las condiciones experimentales planteadas. Los resultados obtenidos muestran una remoción apreciable de la materia orgánica tomando como base la demanda química de oxígeno (DQO).

En Colombia son pocas las investigaciones realizadas con RBC, (Perez, 2010; Ordoñez y Betancur, 2003) estudiaron la aplicabilidad de este sistema de tratamiento con discos de acrílico utilizando lixiviados de un relleno sanitario, obteniendo remociones satisfactorias en DQO, DBO_5 y nitrógeno total corroborando la eficiencia de un RBC para el tratamiento de aguas residuales con carga considerada peligrosa.

En todos estos estudios sobre RBC el enfoque ha sido principalmente la eficiencia de estos y la aplicación en diferentes tipos de agua residual, sin tener en cuenta el material de construcción de la biopelícula, el cual resulta costoso, por lo tanto, se hace necesario estudios que evalúen las condiciones socioeconómicas y climáticas de los países para obtener diferentes medios de soporte que sean accesibles y de fácil obtención para su implementación.

5. MARCO TEÓRICO

5.1 Agua residual doméstica.

El agua residual doméstica (ARD) es aquella que ha sido utilizada por una comunidad y contiene todos los materiales añadidos al agua durante su uso. Esta por lo tanto compuesta de desechos corporales humanos (heces y orina) junto con el agua utilizado para inodoros y aguas sucias, que es el agua residual resultante de aseo personal, lavado de ropa, preparación de alimentos y la limpieza de utensilios de cocina (Mara, 2003).

5.1.1 Calidad del agua.

Existe un consenso creciente de que "la calidad del agua" debe entenderse en el sentido de las características físicas, químicas y biológicas del agua necesaria para mantener los usos del agua deseadas (UN/ECE, 1995). La calidad del ARD, se determina siguiendo unos parámetros físicos, químicos y biológicos que indican el grado de aceptabilidad para determinado uso como doméstico, recreacional, riego, agrícola, etc. Estos parámetros se explican a continuación.

5.1.1.1 Parámetros microbiológicos.

Existe un consenso general sobre la dificultad de determinar la presencia de todos los organismos patógenos implicados en los procesos de contaminación ambiental, por lo tanto para evaluar la calidad biológica de un agua se ha planteado, trabajar con organismos indicadores los cuales tienen un comportamiento similar a los patógenos (concentración y reacción frente a factores ambientales y barreras artificiales), pero son más rápidos, económicos y fáciles de identificar (Campos, 2003). El grupo de microorganismos coliformes tiene todos los requisitos como indicador, en la Tabla 1 se muestran sus principales características. En el Anexo A, se puede observar como en Colombia las normas sobre calidad de agua y vertimientos tienen como parámetro biológico este grupo de organismos como indicadores de contaminación.

Tabla 1. Características del acrílico para la cubierta del biodisco (Adaptado de Ideplast)

ORGANISMO INDICADOR	CARACTERÍSTICAS
Coliformes	Bacterias bacilares gran negativas que fermentan la lactosa con producción de gas en 48h a $35 \pm 0,5$ C. Existen cepas que no conforman con la definición. Incluyen cuatro géneros: Escherichia, Klebsiella, Citrobacter y Enterobacter. El género Escherichia es el más representativo de contaminación fecal
Coliformes fecales	Bacterias coliformes que producen gas a $44,5$ C en 24 ± 2 h
Escherichia coli	Bacteria coliforme representativa de origen fecal. Constituye los coliformes fecales. Es el indicador fecal por excelencia

5.1.1.2 Parámetros fisicoquímicos.

Hay una gran variedad de parámetros fisicoquímicos para caracterizar las AR, cuyos valores reflejan que tan aceptable son para determinado uso. Estos parámetros son de fácil determinación en los laboratorios. A continuación en la Tabla 2, se da una breve explicación de los más representativos, objeto de estudio de esta investigación.

Tabla 2. Parámetros fisicoquímicos más importantes relacionados con la calidad de un ARD

PARÁMETRO	CARACTERÍSTICA	MÉTODO DE EVALUACIÓN	REFERENCIA
Temperatura	La temperatura afecta en forma importante la actividad microbial y los procesos bioquímicos que ocurren en el reactor, afectando el desempeño de este.	Termómetro	(Romero, 2008). (Apha et al, 1998).
Ph	El pH indica la concentración de iones hidronio $[H_3O]^+$ presentes en determinadas disoluciones.	Potenciométrico	(Metcalf y Eddy, 2003). (APHA et al, 1998).
Demanda Química de Oxígeno	Se usa para medir el oxígeno equivalente a la materia orgánica oxidable químicamente mediante un agente químico oxidante fuerte, por lo general dicromato de Potasio ($K_2Cr_2O_7$), en un medio ácido y a alta temperatura. Para la oxidación de ciertos compuestos orgánicos resistentes se requiere la ayuda de un catalizador como el sulfato de plata.	Existen tres métodos para la determinación de la DQO: Método de reflujo abierto, método de reflujo cerrado titulométrico y método de reflujo cerrado colorimétrico. Los métodos de reflujo cerrado son más económicos por usar menos cantidades de reactivos y por tanto generar menos cantidades de residuos peligrosos.	(Pérez, 2010). (APHA et al, 1998).
Demanda Biológica de Oxígeno	La DBO es la cantidad de oxígeno que necesitan los microorganismos para oxidar la materia orgánica biodegradable en condiciones aerobias. La DBO es el parámetro más usado para medir la calidad de aguas residuales y superficiales, para diseñar unidades de tratamiento biológico y evaluar sus eficiencias y fijar cargas permisibles en fuentes receptoras.	Para la determinación principalmente se usa el método de DBO_5 , $DBOu$ y el método respirométrico. Este último proporciona una medida directa del oxígeno consumido por los microorganismos a partir del aire ambiente o de un medio enriquecido con oxígeno en un recipiente herméticamente cerrado bajo condiciones de temperatura y agitación constantes.	(Romero, 2008). (APHA et al, 1998).
Sólidos Totales	Residuo material que queda en el recipiente después de la evaporación de una muestra y su posterior secado en un horno. El total de sólidos incluye "sólidos suspendidos totales" la porción del total de sólidos retenidos por un filtro, y "los sólidos totales disueltos" la parte que pasa por el filtro.	Secado de $103^{\circ}C$ a $105^{\circ}C$.	(APHA et al, 1998).

5.1.2 Tratamiento de las aguas residuales.

En términos generales, en una PTAR ocurren operaciones, procesos físicos, químicos y biológicos. Se puede considerar que las reacciones bioquímicas que se llevan a cabo en estos procesos son las mismas que se realizan en la naturaleza (ríos, lagos, suelo, etc.) sólo que en forma controlada dentro de tanques o reactores y a velocidades mayores. Los niveles de tratamiento son presentados en la Tabla 3 (Suarez, 2011)

Tabla 3. Niveles de tratamiento (Tomado de Suarez, 2011)

NIVEL	DESCRIPCIÓN	TIPO DE UNIDAD
Preliminar	Remueve material causantes de problemas operacionales como trapos, ramas, arenisca, material flotante.	Rejas, tamices, desarenadores, tanques de homogenización, trampas de grasa.
Primario	Remueve una porción de sólidos suspendidos y de materia orgánica.	Sedimentador, unidades con inyección de aire, tanque séptico, Imhoff.
Secundario	Remueve materia orgánica biodegradable disuelta o suspendida.	Lodos activados, biodiscos, filtros percoladores, humedales, lagunas, reactor UASB.
Terciario	Remueve sólidos suspendidos a través de microfiltración, además en este nivel se remueven fosforo y nitrógeno.	Microfiltración, la coagulación y precipitación, la adsorción por carbón activado, cloración.
Avanzado	Remueve material remanente suspendido o disuelto, después de tratamiento biológico.	Destilación, osmosis, cloración, ozonización, intercambio iónico, nanofiltración, adsorción por carbón activado, electrodiálisis.

5.1.3 Procesos biológicos.

Los procesos de tratamiento biológico se clasifican en aerobios y anaerobios de acuerdo a la necesidad de oxígeno requerida por los microorganismos. Los biodiscos por sus características de operación se clasifican como un proceso aerobio de película fija (Álvarez, 1988), su uso es principalmente para la reducción de la DBO carbonácea y la nitrificación, obteniendo eficiencias de remoción del 80-85% en DBO y SST (Suarez, 2011), presenta como característica básica la utilización de comunidades microbianas en forma de película para la conversión de la materia orgánica soluble en sólidos biológicos.

5.2 Aspectos generales del sistema de biodiscos

5.2.1 Descripción del proceso.

Según la revisión de Pérez (2010) el biodisco remueve la materia orgánica soluble y coloidal presente en el AR, bajo condiciones aeróbicas. Consiste de una serie de discos de 3 a 4 m de diámetro, colocados en una flecha (eje) horizontal e instalados en un tanque de diferentes materiales. Los discos giran a velocidades entre 1 y 2 revoluciones por minuto (R.P.M.) y aproximadamente el 40% del área superficial de los discos está sumergida en el AR que está contenida en el tanque. Los microorganismos

presentes en el AR comienzan a fijarse y multiplicarse en la superficie de los discos que se cubre con una película biológica (biomasa) de 2 a 4 milímetros de espesor.

Durante la rotación el reactor acarrea una película de AR, la cual absorbe oxígeno del aire. Los organismos de la película fija de biomasa en los discos, remueven la materia orgánica soluble aeróbicamente, es decir estabilizan la materia orgánica en sustancias más simples, en presencia de oxígeno.

El consumo de oxígeno y la remoción de la materia orgánica se efectúan mientras que el sistema gira a través del AR.

Las fuerzas de fricción ejercidas sobre la película biológica al girar los discos dentro del A.R, provocan que el exceso de biomasa se desprenda. Esto evita la producción excesiva de la película biológica manteniéndola con un espesor casi constante. La rotación del sistema mantiene en suspensión a la biomasa desprendida hasta que el flujo de agua la saca del sistema.

5.2.2 Ventajas y desventajas.

La característica del bajo requerimiento energético del sistema, así como las necesidades mínimas de operación y mantenimiento son las razones principales del constante incremento en la utilización de este proceso. A continuación en la Tabla 4, se listan una serie de ventajas y desventajas de los RCB.

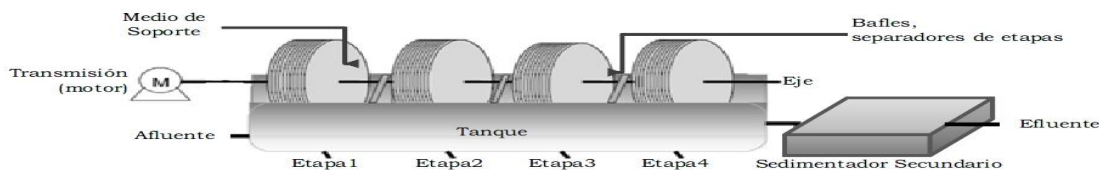
Tabla 4. Ventajas y desventajas en los procesos RBC (Adaptado de Ordoñez, 2003 y Martínez, 2001)

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Bajos consumos de energía y mantenimiento más sencillo.	No hay parámetros de diseño bien definidos.
Usando una configuración de sistemas anaerobios-aerobio, la producción de lodos es reducida comparado con un sistema convencional.	Baja comercialización lo que incrementa los costos de inversión
Es posible tener en cada etapa un cultivo biológico diferente, se cuenta con un grado adicional de flexibilidad en el proceso. Puede conseguirse bastante nitrificación desarrollando cultivos de bacterias nitrificantes selectivas en las últimas etapas.	Los RBC no son efectivos cuando las aguas residuales contienen altas concentraciones de metales y ciertos pesticidas, herbicidas y compuestos orgánicos fuertemente clorados, debido a la inhibición de la actividad microbiana
Resistencia frente a variaciones de cargas orgánicas e hidráulicas además poca área de terreno requerida y no existen problemas de ruido	La principal desventaja de los procesos aerobios frente a los procesos anaerobios, es la gran cantidad de materia celular que se produce
La biomasa presenta en general buenas características de sedimentación con lo que se disminuye el costo de la clarificación	En algunos casos, como en el tratamiento de polulantes orgánicos volátiles, puede ser necesario el control de los gases desprendidos, lográndose esto con la adición de una cubierta protectora

5.2.3 Componentes de un sistema de biodiscos

Los principales componentes de un sistema de biodiscos son: los discos, el eje, la transmisión, el tanque, cerramientos y tanque de sedimentación (Metcalf & Eddy, 1996). Los cuales se esquematizan en la Ilustración 1

Ilustración 1. Componentes de un sistema de biodisco (Pérez, 2010)



5.2.3.1 Ejes.

Los ejes son los encargados de dar el soporte a los discos y por ende a su rotación la cual es elemental para la operación del reactor. El material de estos ejes debe ser fuerte para sostener el peso de los discos sumado al peso de la biomasa adherida al material de soporte. De igual manera se debe tener en cuenta que el eje estará en contacto con el AR y por lo tanto debe ser resistente a la corrosión del líquido.

5.2.3.2 Medio de soporte (discos).

El disco es la superficie donde la población microbiológica se adhiere y se desarrolla para el funcionamiento del sistema de tratamiento. Al igual que los ejes, el material del disco debe ser resistente a la corrosión por los constituyentes del AR, pero también se puede generar corrosión por los microorganismos adheridos a la superficie los cuales pueden llevar a cabo un rápido deterioro de los discos (Mba et al , 1999).

El material del medio de soporte debe estar diseñado para proveer máxima área superficial para el crecimiento de la biomasa y mayor contacto con el AR; además para permitir el máximo drenaje del líquido sobre el área del disco durante la rotación (Mba, 2003)

5.2.3.3 Mecanismo de transmisión.

Generalmente el mecanismo utilizada para el giro de los discos es mediante la transmisión mecánica, el cual utiliza un motor y un sistema de poleas y piñones para ajustar al giro deseado el eje y por ende a los discos.

5.2.3.4 Tanque.

El tanque es el compartimiento donde está contenida el agua y donde se sumergen parcialmente los discos. Su volumen depende de la carga orgánica superficial y la carga hidráulica aplicada.

5.2.4 Factores que influyen en la operación de los biodiscos.

El desempeño del reactor de biodiscos depende de diferentes factores. De ello los más importantes son: las características del agua residual, tiempo de retención hidráulico, carga orgánica e hidráulica, temperatura, pH, número de etapas, velocidad de rotación de los discos, las características de la biopelícula, nivel de oxígeno disuelto. Según la revisión de (Pérez, 2010) se describen a continuación:

5.2.4.1 El agua residual.

Es uno de los factores más importantes en la operación de los biodiscos, puesto que el contenido orgánico del AR es el sustrato para la comunidad microbológica y por lo tanto es necesario para mantener el buen desarrollo para la biopelícula. Otro aspecto a considerar son los constituyentes adicionales que pueden afectar la degradación de la materia orgánica tales como los metales pesados y otros componentes tóxicos, los cuales pueden inhibir la actividad microbológica como también las eficiencias de remoción. De igual manera la presencia de material suspendido puede ocupar espacio en el disco, reduciendo el flujo de contenido orgánico soluble a la biopelícula bajando las tasas de biodegradación.

5.2.4.2 Tiempo de retención hidráulico (TRH).

Hay estudios que comprueban que altos (TRH) mejoran la difusión del sustrato en la biopelícula aumentando la eficiencia de remoción, no obstante debe tenerse en cuenta que TRH muy bajos se obtiene bajas remociones y TRH muy altos no será económicamente viable.

5.2.4.3 Carga orgánica.

Anteriormente, el desempeño de los biodiscos fue correlacionado con la carga hidráulica y fue utilizado como factor de diseño, no obstante este parámetro no influye en las características del afluente (sustrato) y por lo tanto fue cambiado por la carga orgánica como parámetro de mayor confiabilidad. La carga orgánica corresponde al contenido orgánico aplicado a un tiempo por unidad de superficie. La carga orgánica puede expresarse como la total o soluble para diferentes parámetros como DBO, DQO o COT. Operar el reactor de biodiscos a baja carga orgánica puede perjudicar el buen desarrollo de la biopelícula al no haber suficiente sustrato para la biomasa.

5.2.4.4 Oxígeno disuelto.

Teniendo en cuenta que este sistema es de tipo aerobio, el oxígeno disuelto es primordial para el desarrollo de los procesos biológicos. El oxígeno disuelto es utilizado para la oxidación de la materia orgánica carbonácea y para la nitrificación. Para llevar a cabo las reacciones bioquímicas es necesario garantizar una cantidad de oxígeno suficiente para los procesos aerobios, los cuales se presenta con oxígeno disuelto mayor a 0,5 mg/L (Pérez, 2010).

5.2.4.5 Temperatura y pH.

La temperatura influye en el desempeño del reactor debido a la afectación que puede ocurrir en los procesos biológicos. Un incremento de la temperatura puede aumentar la actividad microbiana aumentando así, la tasa de remoción de contaminantes. Aunque el aumento de temperatura contribuye a la actividad microbiológica, la temperatura no puede ser muy alta porque afecta la solubilidad del oxígeno disuelto en el agua y puede ser un factor limitante para el proceso microbiológico.

En cuanto al proceso en general (Autotrol, 1978) señala que, cuando el AR es tratada entre 12 y 32°C, la operación se lleva a cabo en forma satisfactoria. Si la temperatura del proceso es menor de 12°C, la eficiencia del tratamiento decrecerá significativamente. A más de 32°C, la población bacteriana cambia de mesófila a termófila, y este último tipo de bacterias es menos eficiente en la eliminación de contaminantes.

El pH es otro factor importante en el desempeño del reactor teniendo en cuenta que interviene en el desarrollo de las comunidades biológicas. La mayoría de las bacterias no toleran pH más bajos de 4.0 y superiores a 9.5. En general, el pH óptimo para el crecimiento bacteriano se sitúa entre 6.5 y 7.5 (Metcalf y Eddy, 1996).

5.2.4.6 Velocidad de rotación de los discos.

La velocidad de rotación es un parámetro importante debido a que la transferencia del oxígeno en el agua está en función del giro (Di Palma y Verdone, 2008), de igual manera la velocidad de rotación afecta la transferencia de nutrientes a la biopelícula y así mismo afecta las tasas de remoción.

A mayor velocidad de giro se obtiene mayor oxigenación y mayores tasas de remoción, no obstante si la velocidad es muy alta, puede provocar el desprendimiento descontrolado de la biopelícula adherida al disco (Castillo y Vivas, 1996), además aumenta los costos operativos al consumirse mayor energía de la necesaria.

5.3 Materiales de construcción y factores de forma

Las primeras investigaciones con RBC utilizaron la madera, metales como el aluminio, acero, entre otros, como material de soporte. Posteriormente con el auge del plástico se realizaron investigaciones con este material, obteniéndose resultados satisfactorios para la comercialización. En los materiales de construcción se busca que sean corrugados debido a que aumenta el área disponible para el crecimiento de microorganismos y mejora la adherencia y estabilidad estructural del sistema (Ordóñez y Betancur, 2003). En La Tabla 5, se resumen los diferentes materiales utilizados para la construcción de sistemas RBC en investigaciones, tanto a escala real como de laboratorio y en el Anexo K se presentan estudios con biodiscos, enfatizando en el material de construcción del medio de soporte en diferentes tipos de agua residual.

Tabla 5. Diferentes materiales utilizados para la construcción de biodiscos

MATERIAL	AUTORES
Plástico de Polipropileno	(Vasiliadou et al, 2014), (Dautant y Lopez, 1997) y (Nahid et al, 2001)
Acetato perforado	(Castillo et al, 2007), (Diez y Gomez, 1999)
Plástico de polietileno	(EPA et al., 1980), (Autotrol, 1972)
Plástico de polietileno de alta densidad	(Yucel, 1989), (Severin et al, 1980), (kubsad et al., 2004)
PVC	(Di Palma y Verdone, 2008), (Amorim et al., 2013), (Duque et al., 2011)
Plexiglas	(Sassi et al, 1996), (Hiras et al., 2004), (Datta y Philip)
Plástico de Poliestireno expandido	(Popel, 1964 citado por Bezanilla, 1993)
Acrílico	(Valdes y Montesino, 2003), (Perez, 2010), (Ordoñez y Betancour, 2003)
Fibra de vidrio	(Parreiras, 2005)
Polimetilmetacrilato	(Pakshirajan y Kheria, 2012), (Teixera y Oliveira, 2001), (Alnnasou et al, 2011)
Policarbonato	(Yamaguchi, 1999)
Poliuretano	(Malachova et al, 2013)
PVC no plastificado	(Nishidome y Kusuda, 1988)
Hojas de aluminio perforado	(Sahinkaya y Dilek, 2006)

Los materiales conocidos hasta la fecha, incluyendo los anteriormente descritos, todavía afrontan problemas de rendimiento, facilidad de obtención, costo, sencillez en el manejo y mantenimiento, por lo cual a continuación se describirá las características principales de los materiales no convencionales que fueron usados en la investigación: geotextil, tela verde de cerramiento, plástico y acrílico que fue tomado como blanco, ya que es un material común a la hora de diseñar biodiscos, debido a su corrugación. A continuación se listan algunos reportes de eficiencias de

remoción obtenidas con los diferentes materiales usados en la construcción de RBC para agua residual doméstica.

Tabla 6. Diferentes materiales usados en los RBC y eficiencias de remoción

			Remociones						Autor	Referencia
Tipo de agua residual	Tamaño	Material de los discos	DQO	DBO	NTK	SST	Coliformes totales y fecales	Fósforo		
ARD	Pequeña escala	plexiglas	82.30 %	85.80 %	85%	63.20%		3.3%	(Hiras et al., 2004)	(Pérez, 2010)
ARD	Pequeña escala	Plástico de polietileno		84-94%	40-83%			37- 24%	(Noss et al., 1980)	(EPA et al., 1980)
ARD	Pequeña escala	Plástico de polietileno	60%	82%					(Miller et al., 1980)	(EPA et al., 1980)
ARD	Pequeña escala	PVC							(Ito y matsuo, 1980)	(EPA et al., 1980)
ARD	Escala Real	Polietileno de alta densidad							(Severin et al., 1980)	(EPA et al., 1980)
ARD	Escala Real	Plastico de polietileno		82%					(Viraragha van et al., 1980)	(EPA et al., 1980)
		Poliestireno expandido							(Popel, 1964)	(Bezanilla, 1993)
ARD	Pequeña escala	Aluminio		97%					(Torpey et al, 1971)	(Bezanilla, 1993)
ARD	Escala Real	polietileno							(Autotrol, 1972)	(Bezanilla, 1993)
ARD	Pequeña escala	Tablas de madera							(Weigand, 1900)	(Bezanilla, 1993)
ARD	Pequeña escala	Acero galvanizado							(Doman J, 1929)	(Bezanilla, 1993)
ARD	Pequeña escala	acrílico		80,17 %			94,17%		(Cordero et al, 2008)	
ARD	Pequeña escala	acrílico	84%						(Valdes y Montesino, 2003)	
Diferentes tipos	Pequeña escala	Hierro y otros metales hasta antes de 1950							(Bezanilla, 1993)	
ARD	Pequeña escala	Metacrilato transparente	78 a 86 %						(Bezanilla, 1993)	
ARD	Pequeña escala	Polimetilmetacrilato							(Alnnasouri et al., 2011)	
ARD	Pequeña escala	PVC no plastificado							(Nishidome y Kusuda, 1988)	
ARD	Pequeña escala	Plexiglás							(Sassi et al, 1996)	

5.3.1 Características de los materiales no convencionales para la construcción de biodiscos usados en la investigación

5.3.1.1 Geotextil.

El geotextil tipo NT 1600 es un geotextil no tejido por punzonamiento de agujas de 100% fibra sintética discontinua de polipropileno, que se forman en una red aleatoria de estabilidad dimensional. El tipo no tejido NT 1600 GT-135 resiste la degradación ultravioleta, podredumbre, degradación biológica, elementos ácidos o básicos encontrados de manera natural. El polipropileno es estable dentro de un rango de pH de 2 a 13 (Geomembrana soluciones de Ingeniería). El geotextil tipo NT 1600 se ajusta a los valores de propiedades físicas que se describen en la Tabla 7.

Tabla 7. Características del geotextil NT 1600 (Fernández et al., 2010)

PROPIEDAD	VALORES
Espesor (mm)	1.4
Porosidad %	>90%
Tamaño de abertura aparente (μm)	180
Permeabilidad (cm/s)	0.42
Espesor total (mm)	3
Usos	Confinamiento, drenaje, filtración, impermeabilización, pavimentación, protección, refuerzo de muros y taludes, refuerzo de suelos blandos, separación, control de erosión

5.3.1.2 Plástico de invernadero.

Es el plástico flexible más empleado actualmente para forzado de cultivos en invernaderos, túneles y acolchado. Esto se debe principalmente a su bajo precio, a sus buenas propiedades mecánicas, y a la facilidad para incorporar aditivos que mejoran sus servicios, el (PE) junto al polipropileno (PP) y al PVC, son los termoplásticos de más consumo.

Es un derivado de la hulla y del petróleo y se obtiene mediante la polimerización del etileno utilizándose en su fabricación varios procesos y sistemas catalíticos. La mayor parte del PE para invernaderos se fabrica por el proceso de alta presión y catálisis de radicales libres mediante peróxidos.

Atendiendo a su densidad los PE se clasifican en:

- Baja densidad: $< 930 \text{ kg/m}^3$.
- Media densidad: $930 - 940 \text{ kg/m}^3$.
- Alta densidad: $> 940 \text{ kg/m}^3$.

El PE utilizado en la investigación es el de baja densidad, el cual tiene menos resistencia a la rotura. Se desgarrar con facilidad. El PE es el material plástico que menos densidad tiene; es decir, es el que menos pesa por unidad de superficie a igualdad de grosor (Los plásticos en la agricultura materiales de cubierta para invernaderos).

En la Tabla 8 se muestran las características del material plástico PE utilizado para la cubierta del disco.

Tabla 8. Características del material plástico PE utilizado para la cubierta del biodisco (Adaptado de Infoagro)

PROPIEDAD	POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD
Densidad	0,92 (g/cm ³)
Espesor	150 micras
Índice de refracción	1512
% de dilatación antes de que se rompa	400-500
Resistencia al frío y calor	-40+50° C
Duración	2 años
Usos	sector del envase y empaque: bolsas, botellas compresibles para pulverizar fármacos, envase industrial, laminaciones, película para forro, película encogible y estirable, aislante para cables y conductores, película para invernadero, tubería de riego y sistemas de irrigación

5.3.1.3 Tela verde de cerramiento

La tela verde es una tela tejida en polipropileno, con aditivos que la protegen contra la acción de los rayos ultravioletas, de fácil manejo y durabilidad. Normalmente en anchos de 1,05 m ó 2,10 m y largos de 100 m ó 250 m (Agrouniverso). En la Tabla 9 se describen las características de la tela verde para la cubierta del biodisco.

Tabla 9. Características de la tela verde para la cubierta del biodisco (Adaptado de Progen)

PROPIEDAD	TELA VERDE
Material	Polipropileno, Pigmento y Estabilizador UV
Color	Verde
Resistencia a la ruptura	Urdimbre: 16.180 (n/m) ; norma: astm d4595 Trama: 14.390 (n/m) ; norma: astm d4595
Peso	Peso 62 gr/m ² ; norma: ntc-229
vida útil estimada	8 Meses
Usos	Es utilizada en agricultura, floricultura, ganadería, avicultura y construcción; actúa como barrera cortavientos, usada para delimitar áreas, para cerramiento de espacios, usada para generar sombrío, como cortina de protección en cultivos y galpones. En construcción es utilizada como cerramientos de obras civiles, construcciones viales

5.3.1.4 Acrílico.

El material acrílico, es una de las tantas variantes del plástico. La ventaja del uso del acrílico, es que puede permanecer largo tiempo en la intemperie, sin sufrir daño alguno. Por lo mismo, el acrílico es un material idóneo para las construcciones. Debido principalmente, a lo antes señalado, como al hecho de que es un tipo de plástico más flexible de lo normal, lo que lo hace aún más fácil de trabajar. Dentro de sus características técnicas, se puede señalar, que el acrílico soporta largas horas a la exposición de los rayos ultravioletas, sin dañar su estructura y los colores del mismo. El acrílico es un material muchísimo más resistente que el vidrio. Con lo cual, no es fácil que se rompa y, de hacerlo, no se astilla; sus principales características se muestran en la Tabla 9; asimismo, el peso del acrílico es bastante más reducido que el del vidrio. Este, pesa sólo la mitad del segundo (Arquigráfico).

Tabla 10. Características del acrílico para la cubierta del biodisco (Adaptado de Ideplast)

PROPIEDAD	LÁMINA DE PMMA POLIMETILMETACRILATO
Material	Su componente el MMA (monómero de metacrilato de metilo) si lo es en fase líquida
Dimensiones y calibre	Lámina de 122cm x 180 ò 245cm; Calibre C60 (2.5mm) hasta C320 (8mm)+/-3%.
Color	Natural.
Características	Se destaca frente a otros plásticos transparentes en cuanto a resistencia a la intemperie, transparencia y resistencia al rayado.
Usos	Señalización, cubiertas, domos, protecciones en maquinaria, lámparas separadoras

5.4 Procesos bioquímicos

Considerando que el biodisco es un sistema biológico, es necesario explicar el funcionamiento y las características de los procesos bioquímicos que ocurren dentro del reactor, pues mediante esta vía se ejecuta la degradación de los compuestos orgánicos y se hace control del sistema de tratamiento (Pérez, 2010). Por lo tanto se hace indispensable conocer las principales comunidades microbiológicas en los procesos RBC, las características de la biopelícula desde su formación y los procesos involucrados para la remoción de carbono como proceso principal para el tratamiento biológico.

5.4.1 Comunidades microbiológicas en biodiscos.

La composición de la 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. 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. 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; esta sucesión se da mediante interacciones entre los microorganismos como competición, predación, parasitismo, comensalismo y mutualismo, los cuales definen la diversidad y dominancia de las especies (Welter et al, 2004).

5.4.2 Biopelícula.

Según Costerton (1999), los biofilms o biopelículas son comunidades bacterianas englobadas en una matriz de exopolisacáridos (EPS) 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 espacios intersticiales o canales, ver ilustración 3, los cuales son una parte integral de la estructura de las biopelículas; siendo en esencia, la línea de vida de los sistemas que, proveen de un medio de circulación de nutrientes, así como también el intercambio de productos metabólicos con el fluido (Davey y O'Toole, 2000).

5.4.2.1 Formación de la biopelícula.

Davey y O'Toole (2000) plantea que la formación de la biopelícula por muchas especies microbianas se da en tres etapas, la primera es la adherencia inicial a la superficie cuando las especies sienten ciertos parámetros ambientales o condiciones de estrés, después la formación de microcolonias y finalmente la maduración de estas con el revestimiento de los EPS. El crecimiento de la biopelícula continua hasta que llega un momento en que no reciben más oxígeno las capas profundas entonces se produce el desprendimiento de la biomasa, como se muestra en la Ilustración 2. Después de dicho acontecimiento comenzará la formación de una nueva película y así indefinidamente (Welter et al, 2004).

Ilustración 2. Formación de la biopelícula (Barros de Macedo, 2000)

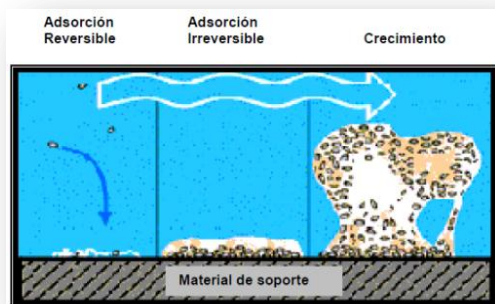


Ilustración 3. Modelo del canal de agua (Salas, 2010)



5.4.2.2 Propiedades de la biopelícula.

Las especies microbianas y su morfología, así como la mayor parte de la composición del EPS, determinan las propiedades físicas y químicas de las biopelículas (Eguia, 1991). Estas propiedades se explican a continuación:

5.4.2.2.1 Propiedades físicas.

- **Color:** El color de la biopelícula en las etapas iniciales de un reactor de biodiscos, utilizado en el tratamiento de efluentes domésticos, es generalmente gris o gris amarronado y filamentoso, mientras que en etapas posteriores es amarronado o rojizo amarronado, gelatinoso y menos filamentoso. La biomasa de color gris es indicativo de biomasa que preferentemente remueve materia orgánica carbonácea mientras que la amarronada rojiza es característica de la predominancia de microorganismos nitrificantes (Welter et al, 2004).
- **Espesor:** De acuerdo a Welter et al., (2004) cuando se pone en funcionamiento un sistema de RBC, los microorganismos que naturalmente se encuentran en el afluente comienzan a adherirse a la superficie de los discos y en un plazo de una a cuatro semanas forman una biopelícula con un espesor de 1 a 4 mm, Alleman et al (1982) afirma que en las etapas iniciales del proceso, cuando la concentración de materia orgánica es alta, la biopelícula generalmente es de mayor espesor que la que se observa en etapas posteriores en donde el afluente contiene menor cantidad de materia orgánica. Cuando el espesor de la biopelícula se incrementa, el oxígeno disuelto no es capaz de difundirse hasta el fondo del mismo, por lo tanto los microorganismos de la capa inferior, unidas al soporte, podrían cambiar alternativamente adaptándose a las nuevas condiciones ambientales (anaerobiosis).

5.4.2.2.2 Propiedades químicas.

La biopelícula es generalmente viscosa e hidrofílica; debido a la presencia de componentes poliméricos extracelulares que están constituidos por polisacáridos con residuos hidrofílicos y otros polímeros intracelulares (Welter et al, 2004). Las propiedades químicas tienen que ver con la unión de las especies microbianas a la superficie o medio de soporte gracias a enlaces débiles intermoleculares, que resultan de las fuerzas entre la célula y el soporte, incluyendo: fuerzas de London – Van der Waals, interacciones electrostáticas, interacciones estéricas y puentes poliméricos (Welter et al, 2004).

6. METODOLOGÍA

6.1 Delimitación de la zona de estudio

La construcción y evaluación del reactor de contactores biológicos rotativos con materiales no convencionales se llevó a cabo en el laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad del Cauca, Popayán Cauca.

6.2 Sistema de tratamiento

Se construyó, y evaluó un reactor de contactores biológicos rotativos (RBC) con materiales no convencionales (plástico, tela verde de cerramiento, acrílico, y geotextil) para el tratamiento de ARS, evaluando la eficiencia del biodisco en la remoción de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, y realizando el seguimiento físico y microbiológico de la biopelícula.

6.3 Montaje de laboratorio

El RBC se realizó con eje de acero inoxidable con el fin de evitar la corrosión. El medio de soporte se diseñó con 4 discos de diámetro de 0,475 m con materiales ubicados en orden de afluente a efluente de la siguiente manera: plástico, geotextil, tela verde de cerramiento y acrílico. El mecanismo de transmisión fue un motor de 2.2 RPM y el tanque se construyó en acrílico. El agua a tratar fue un ARS, y se controló su caudal con una bomba de funcionamiento peristáltico con capacidad variable de 1L/día a 20 L/día.

6.4 Construcción del sistema de biodiscos (Anexo B).

Los cálculos necesarios para la construcción del sistema de biodiscos se detallan a continuación:

6.4.1 Características de los discos:

Diámetro de los discos: 0.475 m
Longitud del radio: 0.225 m

Ilustración 2. Dimensiones de los discos



6.4.2 Dimensiones del reactor:

Altura (h): 0.15 m
Ancho (b): 0.20 m
Largo (l): 0.55 m

Ilustración 3. Dimensiones del reactor



Existen diferentes modelos para la construcción de biodiscos, los cuales han sido objeto de investigación por muchos autores; para el desarrollo de la investigación se optó por la propuesta de (Pérez, 2010), debido a la facilidad de construcción a escala de laboratorio, el modelo se basó en la carga orgánica, para la obtención del caudal, modelo que se explica a continuación. Las dimensiones del reactor y la concentración del afluente son parámetros de diseño propio.

Volumen del reactor

El volumen total del reactor fue determinado de acuerdo a las dimensiones del tanque construido en acrílico.

$$V = (h * b * l) = (0.15\text{m} * 0.20\text{m} * 0.55\text{m}) = 0.01655 \text{ m}^3 = 16.55 \text{ L}$$

Ecuación 1. Volumen del reactor

Volumen efectivo del reactor (VR)

El volumen efectivo del reactor se determina calculando la capacidad del tanque y se le resta el volumen de la porción sumergida de los discos, el cual se muestra en la ecuación:

Volumen Efectivo del reactor (VR) = Volumen del reactor - Volumen sumergido de los discos: $VR = (V) - (Ad * P * e * nt)$

Ecuación 2. Volumen efectivo del reactor

Donde

VR: volumen efectivo del reactor

Ad: área sumergida de cada disco (m^2)

P: proporción de área sumergida del disco

e: 2 espesor de los discos (m)

nt: número de discos en el reactor

Calculando:

$$VR = (0.20\text{m} * 0.55\text{m} * 0.15\text{m}) - ((\pi * (0.475\text{m})^2) / 4 * 0.4 * 0.0030 * 4)$$

$$VR = 0.015649 \text{ m}^3 = 15.65 \text{ L}$$

Relación de volúmenes:

$$\frac{VR}{V} * 100\% = \frac{15.65}{16.55} * 100\% = 99\%$$

Área efectiva:

$$A = (\pi * D^2) / 4 * nt * 2) - ((\pi * d^2) / 4 * nt * 2) \quad \xrightarrow{\text{simplificando}} \quad = \frac{\pi}{4} * nt * (D^2 - d^2)$$

Ecuación 3. Área efectiva

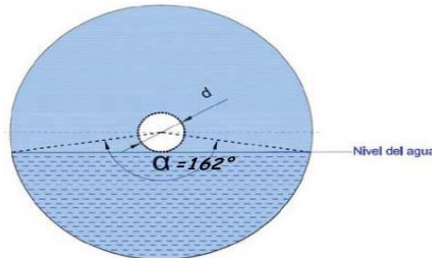
Donde

- A: área efectiva de los discos (m²)
- nt: número de discos en el reactor
- D: diámetro del disco (m)
- d: diámetro de superficie no sumergida (m)

Para calcular el área es necesario primero hallar “d” y éste se determina a partir del ángulo α . De acuerdo con varios autores, cuando se trabaja con un porcentaje de sumergencia del 40%, el ángulo α que subtende la superficie mojada con vértice en el centro del disco es igual a 162° (Diez y Gómez, 1999; Rana y Khare, 2002), como lo muestra la ilustración 6. El valor de “d” para ese ángulo es de 0,04 m.

$$A = ((\pi * [0.475^2] / 4 * 4 * 2) - ((\pi * [0.04]^2) / 4 * 4 * 2)) = 1.40 \text{ m}^2$$

Ilustración 4. Ubicación del ángulo α



Cálculos de diseño a partir de la carga orgánica

La carga orgánica puede expresarse como la total o soluble para diferentes parámetros como DBO, DQO o COT. La carga orgánica es calculada como se muestra en la ecuación 4:

$$CO = \frac{C * Q}{A}$$

Ecuación 4. Cálculo carga orgánica

Dónde:

- CO: carga orgánica (g DBO, DQO ó COT/ m².d)
- C: concentración de carga orgánica del afluente (g/L)
- Q: caudal del afluente (L/d)
- A: área efectiva de los discos (m²)

Según los trabajos revisados por Gadd, G.M. y A.J. Griffiths (1978), el rango de cargas orgánicas e hidráulicas utilizadas es muy amplio, para aguas residuales las cargas orgánicas van de 0,98 a 2,93 g/m²*d, Metcalf y Eddy (1996) recomienda un rango de 2.45 – 7.35 g DBOsol /m².d, para una carga orgánica de diseño de 3 g DBO₅/m²*d para el reactor se tiene el siguiente caudal:

$$CO = (C * Q) / A \rightarrow Q = (CO * A) / C = (3 \text{ g DBO}_5 / \text{m}^2 * 1.4 \text{ m}^2) / (0.3 \text{ g/L}) = 14 \text{ L/d}$$

Se controló su caudal con una bomba de funcionamiento peristáltico con capacidad variable de 1L/día a 20 L/día, ajustándola al caudal de diseño de 14 L/d, como se muestra en la Tabla 11. Se hace importante comentar que aunque se trabaja con un caudal fijo, es imposible garantizar una misma carga orgánica cada día puesto que la concentración del afluente puede variar dependiendo de la carga orgánica del inóculo. Sin embargo, este aspecto no es un inconveniente ya que pequeñas variaciones de concentraciones no afecta significativamente la carga ni mucho menos el desempeño del reactor ya que se sigue operando a una carga orgánica situada en el rango óptimo.

Debe aclararse que para el modelo a escala laboratorio se calculó el caudal necesario a tratar a partir de las dimensiones establecidas. En el caso de modelos a escala real debe hacerse lo contrario, es decir, conocer el caudal y a partir de ello establecer la carga orgánica superficial y el área de discos necesario.

Tabla 11. Aforos

VOLUMEN (mL)	TIEMPO (s)	CAUDAL (mL/s)	CAUDAL (L/d)
20	119	0.168	14.521
20	116	0.172	14.897
15	89	0.169	14.562
15	91	0.165	14.242
15	98	0.153	13.224
		Promedio	14.289 L/d

Tiempo de retención hidráulico:

El TRH resulta a partir de la división entre el volumen efectivo del reactor y el caudal de diseño. Para este diseño el TRH es de 27 h, lo cual resulta alto en comparación a los criterios técnicos enunciados en la Tabla 12 y se debe a un volumen grande de tanque relativamente en comparación con el caudal que es bajo. El caudal bajo se debe a la alta concentración orgánica del afluente, por lo tanto, para satisfacer la carga orgánica de diseño no requiere de mucho caudal. Si la concentración fuera más baja requeriría mucho más caudal para satisfacer la carga orgánica de diseño y disminuiría el TRH.

$$\text{TRH} = \text{VR}/\text{Q} = 15.65 \text{ L} / (14\text{L}/\text{d}) = 1.12 \text{ d} = 27\text{h}$$

Ecuación 5. Tiempo de retención hidráulico

(Castillo et al., 2007) evaluaron un agua residual doméstica, encontrando el mejor tiempo de retención de 24 horas y carga orgánica superficial de 9,2 a 17 g DBO/m²*d, para tres mallas de poliéster (corrugada, perforada y cubierta) siendo la mejor las dos últimas.

En la Tabla 12, se describen las características típicas para reactores de biodiscos (Pérez, 2010), de la cual se adaptó para el sistemas de biodiscos una sumergencia del 40%

Tabla 12. Características típicas para reactores de Biodiscos

PARÁMETRO	(ROMERO, 2008)	(METCALF Y EDDY, 1996)
Tiempo de Retención Hidráulico (TRH)	0.8 – 1.2 h	1.5 – 4 h
Carga Hidráulica	0.02 – 0.10 m ³ /m ² .d	0.03 - 0.08 m ³ /m ² .d
Carga Orgánica	12 – 20 g DBO sol/m ² .d 30 - 40 g DBO/m ² .d	2.45 – 7.35 g DBO sol/m ² .d 7.35 – 14.7 g DBO/m ² .d
Longitud Eje	< 7.5 m	< 8.23 m
Diámetro Eje	13 – 25 mm	
Número de Etapas	4 – 5	
Diámetro de los Discos	2 – 3.6 m	< 3.6 m
Sumergencia de los Discos	40%	40%
Velocidad de Rotación	1 – 2 RPM y 0.2 – 0.3 m/s	

Ilustración 5. Vista general del sistema de biodisco



6.5 Alimentación

En los experimentos se utilizó ARS cuya composición se tomó de la propuesta de (Rodríguez y Lozano, 2012) para la preparación de ARS con fines de uso en laboratorio y en reactores prototipos. La Tabla 13 presenta las características del ARS.

Tabla 13. Características del ARS (Rodríguez y Lozano, 2012)

COMPUESTO	CANTIDAD	COMPUESTO	CANTIDAD
Leche en polvo	100 mg/L	urea	3 mg/L
Gelatina sin sabor	35 mg/L	Fosfato Bicálcico	40 mg/L
Almidón	170 mg/L	Sulfato de magnesio	2,5 mg/L
Sal	7 mg/L	Inóculo de microorganismos	70 ml/L
Azúcar	28 mg/L	Jabón de tocador	3 gotas

La actividad de inoculación consta de dos períodos: Alimentación batch y alimentación continua.

6.6 Aclimatación y arranque del reactor: alimentación en batch

El funcionamiento del biodisco se inició el 16 de septiembre de 2014 con una duración de 42 días para la alimentación batch. En la primera semana se agregó mayor cantidad de agua del río Molino (14 L/d) y se empezó a suministrar ARS, para su preparación se usó el triple de la cantidad de componentes por litro como se muestra en el Anexo C, con el fin de adaptar a los microorganismos a este nuevo tipo de agua. En estas semanas se hicieron pruebas de laboratorio con un tiempo de retención hidráulica de 27 horas para verificar que la carga orgánica estuviera cercana a la carga orgánica de diseño, aproximadamente 3 g DBO/m²*d

6.7 Alimentación en continuo y muestreo

El periodo de muestreo presentó una duración de 43 días, iniciando el 28 de octubre de 2014 y finalizando el 11 de diciembre de 2014. Una vez se estableció el estado estable del reactor se empezaron a evaluar los parámetros fisicoquímicos para determinar la eficiencia del reactor con un tiempo de retención de 27 horas, según Tabla 14.

Tabla 14. Cantidad de pruebas que se tomaron

ETAPAS	PARAMETRO A MEDIR	NUMERO DE PRUEBAS	LUGAR DE PRUEBA DEL REACTOR
Inicial	DBO ₅	2	Entrada
	DQO	2	Entrada
Estable	DBO ₅	4	Entrada
		4	Salida
	DQO	4	Entrada
		4	Salida
Etapa final	DBO ₅	3	Entrada
		3	Salida
	DQO	3	Entrada
		3	Salida

6.8 Metodología para el objetivo número 1.

6.8.1. Parámetros fisicoquímicos.

Se realizaron aforos de caudal y ensayos de demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), demanda química de oxígeno (DQO), pH y temperatura (T⁰), según Tabla 15.

Tabla 15. Metodología empleada para la realización de los ensayos

PARÁMETRO	MÉTODO	OBSERVACIÓN
T (° C)	Termométrico	Termómetro digital marca HACH
Caudal	Volumétrico	Aforos de caudal
pH	4500-H ⁺	Potenciométrico. Electrodo marca HACH.
DQO	5220-C	Reflujo miro cerrado. Digestor marca HACH.
DBO ₅	5210-B	Sensor para DBO ₅ (BOD Track-HACH)

6.8.2. Parámetros microbiológicos

Para la identificación del grupo coliformes totales y fecales inicialmente se pretendía realizar con el método de filtración por membrana, pero debido a que es un método de menor sensibilidad, rapidez y reproducibilidad en la detección y cuantificación del grupo coliformes (Rodríguez et al., 2003) que la técnica con el método de cultivo caldo Fluorocult LMX, se escogió este último.

Se utilizó el medio de cultivo caldo Fluorocult LMX marca Merck con la técnica de tubos múltiples de fermentación, utilizando 5 tubos de caldo LMX por dilución según recomendaciones de (Apha et al., 1998) para que sea más representativo. Los resultados del estudio de los tubos se reportan como número más probable de microorganismos, el cual está basado en fórmulas de probabilidad y nos representa la densidad media de coliformes en la muestra por 100 ml, según Anexo D. Se determinó este parámetro dos veces en la etapa final del reactor colocando 5 tubos de fermentación con caldo LMX por dilución (de 10ml) cada tubo se inoculó con las diluciones de la muestra (en disoluciones decimales decrecientes 10⁻¹, 10⁻², 10⁻³), se mezclaron los tubos mediante agitación suave y se incubaron a 35°C durante 24 horas y se observó si se produjo cambio de color (verde azulado) para identificar coliformes totales. Posteriormente los tubos positivos (verde azulados) fueron puestos bajo una lámpara de luz UV para observar fluorescencia que indica coliformes fecales.

6.9 Metodología para el objetivo número 2.

6.9.1 Seguimiento físico de la biopelícula

Para el seguimiento físico de la biopelícula se realizaron unos montajes prototipos de los materiales (tela verde de cerramiento, acrílico, geotextil y plástico), instalándolos en el último disco (acrílico) en el orden afluente efluente y sujetándolos con alambres de acero inoxidable que permitiera removerlos fácilmente, a los cuales se les determino su área en cm^2 y peso en gramos (g), como lo muestra la Tabla 15, lo cual permitió que se pudiera realizar un seguimiento de la acumulación de biopelícula masa/ área (g/cm^2), pesando los prototipos directamente para conocer el peso de la biopelícula húmeda y dejándolos secar durante 15 min a temperatura ambiente para conocer el peso de la biopelícula seca, durante 43 días correspondientes al inicio del sistema en continuo, además se realizó una observación periódica del color de la biopelícula en el transcurso de la investigación.

Tabla 16. Área y peso de los materiales prototipos

MATERIAL	ÁREA (CM^2)	PERÍMETRO (CM)	PESO (G) SIN BIOPELÍCULA
Acrílico	42	0.2039	5.856
tela verde	64	0.2039	1.616
Plástico	64	0.2043	2.459
Geotextil	74	0.219	2.363

Ilustración 6. Materiales



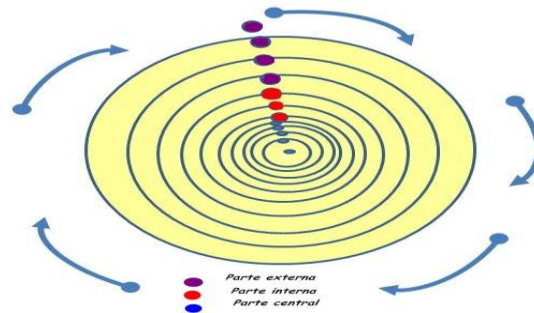
6.9.2 Seguimiento microbiológico de la biopelícula

La constitución microbiológica de la biopelícula se realizó de la siguiente manera: Observación de las características macroscópicas y microscópicas de las colonias a través de microscopía óptica, utilizando:

- microscopía óptica normal.
- Microscopía en campo oscuro utiliza una luz muy intensa en forma de un cono hueco concentrado sobre el espécimen.
- Microscopía en contraste de fase: se usa principalmente para aumentar el contraste entre las partes claras y oscuras de las células sin colorear. Es ideal para especímenes delgados, o células aisladas.
- Coloración de Gram para determinar morfología y agrupación.

Se realizó el estudio de los microorganismos que crecen en la biopelícula mediante un esquema de identificación así:

Ilustración 7. Toma de muestras (Patricia Vélez – codirectora)



El recorrido de análisis de los microorganismos en los diferentes materiales del biodisco tela verde de cerramiento, acrílico, geotextil y plástico, se realizó haciendo una zonificación, donde se tomaron muestras de tres secciones diferentes de los discos (externa, interna y en el centro del biodisco), con el fin de determinar los grupos más abundantes, y la relación entre la microfauna encontrada.

Todos los procedimientos, y resultados de las pruebas realizadas en el laboratorio se reportan en tablas que fueron incorporadas a hojas electrónicas de Statgraphics y Microsoft Excel, con los cuales se elaboraron los cálculos de las eficiencias de remoción, los análisis estadísticos, las gráficas e ilustraciones, el desarrollo de fórmulas, entre otras.

Los análisis de laboratorio fueron realizados siguiendo las técnicas, procedimientos y recomendaciones del *Standard Methods for the examination of water and wastewater, 20th Edition*.

7. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con la ayuda de Excel y Statgraphics se realizaron las pruebas estadísticas de los datos de los parámetros fisicoquímicos evaluados durante la investigación

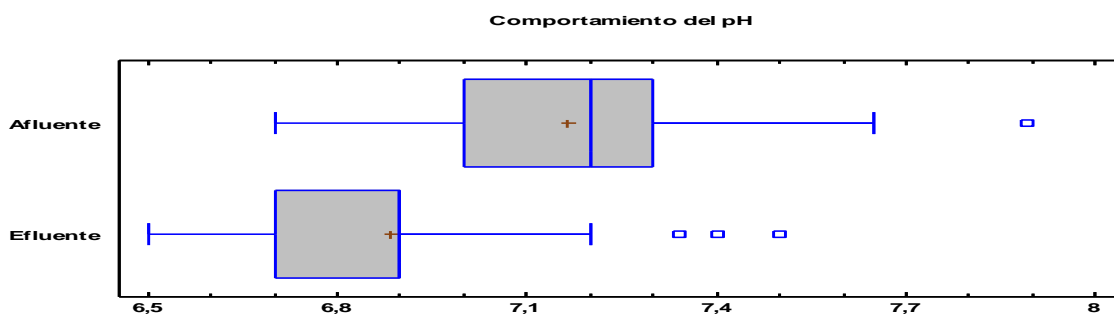
7.1 Parámetros fisicoquímicos

7.1.1 pH (Anexo E)

Para el parámetro de pH se realizaron pruebas en dos puntos entrada (punto 1) el cual corresponde al tanque de suministro del sistema, y la salida (punto 2) a la descarga del reactor. Para la variable pH se obtuvo una media en el afluente de 7,16 +/- 0,1 unidades de pH, con un mínimo de 6.7 y un máximo de 7.9; en el efluente se alcanzó una media de 6,9 +/- 0,1, con un mínimo de 6.5 y un máximo de 7.5 como se muestra en la gráfica 1. Para Antonie (1976) una eficiencia óptima en RBC se obtiene con un pH entre 6.5 y 8.5, lo cual sugiere que los resultados se encuentran en el rango óptimo para el adecuado funcionamiento del reactor, en este caso, hay 4 puntos alejados pero no hay puntos muy alejados, los cuales pueden presentarse porque durante la nitrificación la alcalinidad del agua se incrementa ligeramente debido al consumo de CO₂ de las bacterias autotróficas (el pH se incrementa) pero en una contra reacción este decrece drásticamente debido a la formación del ácido.

Como se puede observar en la Gráfica 1, el pH presentó un ligero disminución en el efluente, probablemente debido a la producción de ácidos orgánicos y dióxido de carbono en las etapas iniciales, y a los procesos de nitrificación. La mediana para el efluente coincide con el cuartil, esto sucede porque se concentraron muchos datos en un mismo punto. En el afluente la parte izquierda de la caja es mayor que la de la derecha; ello quiere decir que el pH comprendido entre el 25% y el 50% de las muestras está más disperso que entre el 50% y el 75%. Por otro lado, los valores de pH registrados en el efluente, cumple con todos los artículos estipulados en el Anexo A, evidenciándose la poca variación de pH que registra un RBC para el tratamiento de aguas, ya que no fue necesario adicionar reactivos para acondicionar el pH.

Gráfica 1. Comportamiento del pH para un TRH de 27 horas



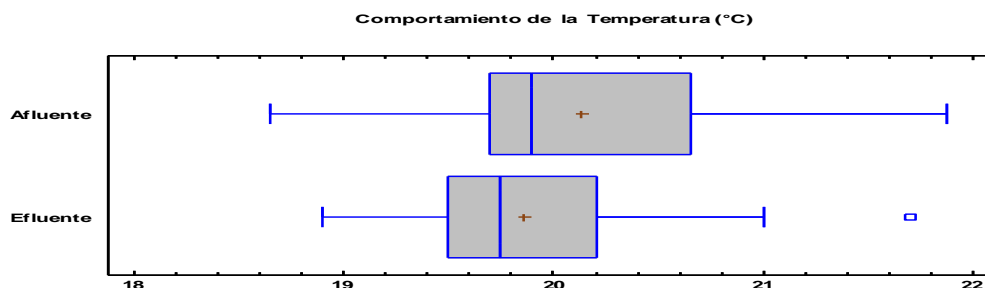
7.1.2 Temperatura (Anexo F).

La temperatura es un factor importante por su efecto en los microorganismos. La temperatura de operación afecta directamente a la cinética de eliminación del sustrato, la actividad metabólica de los microorganismos es acelerada por el aumento de la temperatura, mientras que, si la temperatura disminuye, la velocidad de eliminación del sustrato es menor (Antonie, 1976).

Los resultados estadísticos obtenidos para la temperatura se presentan en la Gráfica 2, en donde se aprecia el comportamiento de la temperatura durante todo el proceso. Como se puede observar, para la variable temperatura se obtuvo una media en el afluente de 20.13 ± 0.26 °C, con un mínimo de 18,65 °C y un máximo de 21,87 °C; en el efluente se alcanzó una media de 19.86 ± 0.23 °C, con un mínimo de 18,9 °C y un máximo de 21,7 °C.

Las temperaturas en el afluente y efluente tienen un rango muy similar, lo que demuestra que no existe un factor predominante que haga variar ostensiblemente la temperatura, en este caso, hay 1 punto alejado, pero no hay puntos muy alejados y la temperatura para el afluente levemente mayor esto puede obedecer a que el clima es el factor principal que modifica la temperatura del agua del biodisco, además hay otros factores que también influyen en la temperatura como las reacciones endotérmicas y exotérmicas que ocurren dentro del reactor a partir de los procesos biológicos, sin embargo son insignificantes para la variación de la temperatura. Autotrol (1978) señala que, cuando el AR tratada está entre 12 y 32°C, la operación se lleva a cabo en forma satisfactoria. Si la temperatura de proceso es menor de 12°C, la eficiencia del tratamiento decrecerá significativamente. A más de 32°C, la población bacteriana cambia de mesófila a termófila, y este último tipo de bacterias es menos eficiente en la eliminación de contaminantes; considerando lo anterior, la temperatura se encuentra en los rangos recomendados para que exista una buena eficiencia en el tratamiento. Todos los registros de temperatura en el efluente estuvieron por debajo de 21,7 °C, que según lo estipulado por la normatividad colombiana del Anexo A, hace viable este vertimiento a cuerpos de agua y al alcantarillado público.

Gráfica 2. Comportamiento de la temperatura para un TRH de 27 horas



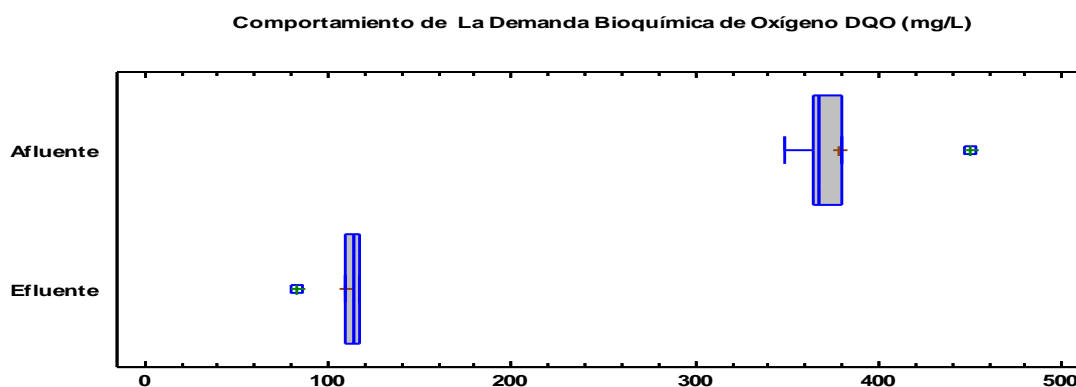
7.1.3 Demanda Química de Oxígeno (Anexo G)

La disminución de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) a la entrada (sedimentada) y salida del RBC, es considerada como el principal parámetro en la determinación de la viabilidad del presente proyecto junto con la demanda biológica de oxígeno (DBO₅) (Ordoñez y Betancurt, 2003).

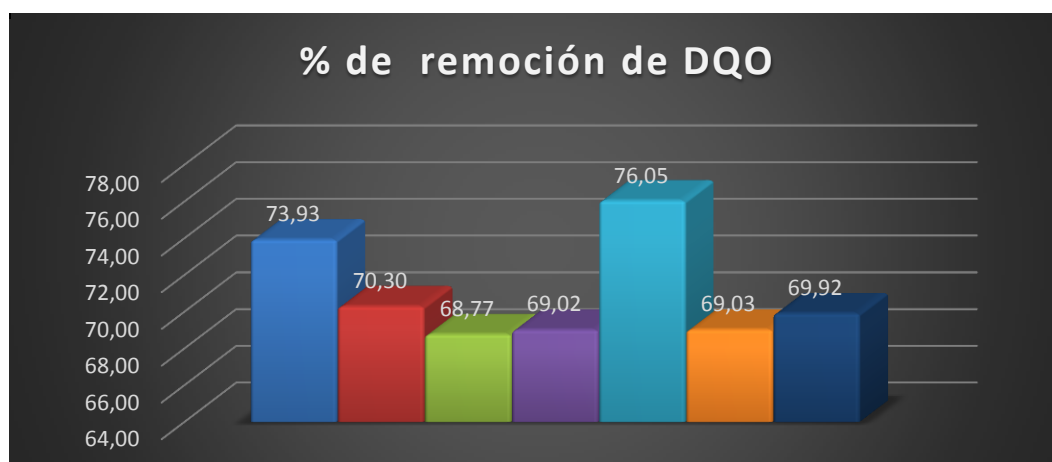
De acuerdo con la Gráfica 3 se obtuvo una media de DQO para el afluente de 379.0 +/- 30.46 (mg/L) y para el efluente de 109.72 +/- 10.94 (mg/L). En la gráfica 5, se puede observar que el valor mínimo para el afluente fue de 349.0 mg/L, el valor máximo de 450,0 mg/L, mientras que para el efluente el valor mínimo fue de 83.57 mg/L y el valor máximo fue de 117.32 mg/L, se puede observar que no hay puntos alejados, pero hay 2 puntos muy alejados, la presencia de puntos muy alejados puede indicar valores aberrantes ó una distribución altamente sesgada lo cual se puede atribuir a la técnica analítica utilizada, ya que se pudo presentar errores experimentales. Se obtuvo resultados aceptables en remoción de DQO con eficiencias de 68.77% al 76.05 % con una media de 71.00 +/- 2.63 % de acuerdo a la gráfica 3, lo cual es producto de la remoción de compuestos orgánicos biodegradables y no biodegradables. La Gráfica 4 permite observar la remoción entre el afluente y efluente, se observa asimetría en la distribución de los valores de la DQO para el afluente, con una mayor dispersión entre el 50 y 75% de los datos y para el efluente se presentan una leve dispersión en rangos más cortos de DQO

Existen otros estudios con tratamientos de diferentes AR y ARS en el cual se muestran eficiencias de remoción de este parámetro que varía de 70% a 92%, sin embargo, esta eficiencia está condicionada a las características del AR y se pueden obtener porcentajes inclusive más bajos de ese rango para aguas residuales con contenido de materia orgánica no biodegradable y porcentajes más altos de remoción de DQO cuando el AR posee una relación DBO₅/DQO cercana a 1 (Pérez, 2010).

Gráfica 3. Comportamiento de la DQO para un TRH de 27 horas



Gráfica 4. Porcentaje de remoción de la DQO para un TRH de 27 horas



7.1.4. Demanda Bioquímica de Oxígeno DBO₅ (Anexo H)

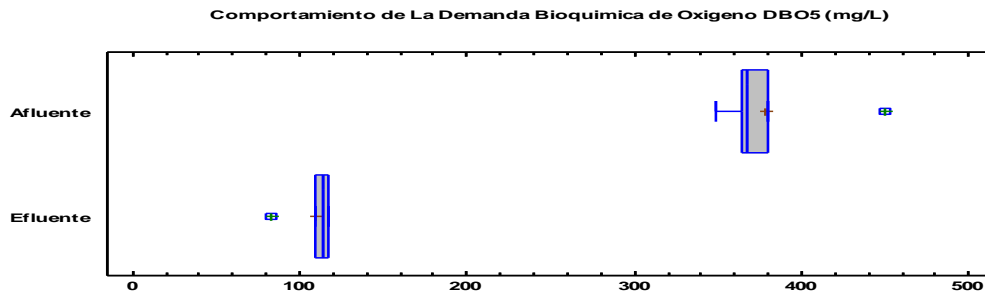
La DBO₅ es el parámetro ampliamente utilizado para medir la contaminación orgánica que es degradable por microorganismos. Aunque no mide directamente cuánta es la cantidad de materia orgánica presente en el agua, sí muestra la cantidad de oxígeno necesario para oxidar dichos compuestos biodegradables, por lo tanto indica el grado de contaminación por materia orgánica (Pérez, 2010).

La variación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno entre la entrada y salida del reactor de biodiscos durante el proceso, se puede observar en la Gráfica 5, los resultados de entrada están siempre por encima de los puntos de salida, obteniéndose remociones de DBO₅ en el reactor, en todas las caracterizaciones. Se presenta 1 punto alejado, pero no hay puntos muy alejados que puede deberse a la variación de la carga orgánica del inóculo; la mediana coincide con los límites de los bigotes, esto sucede porque se concentraron muchos datos en un mismo punto.

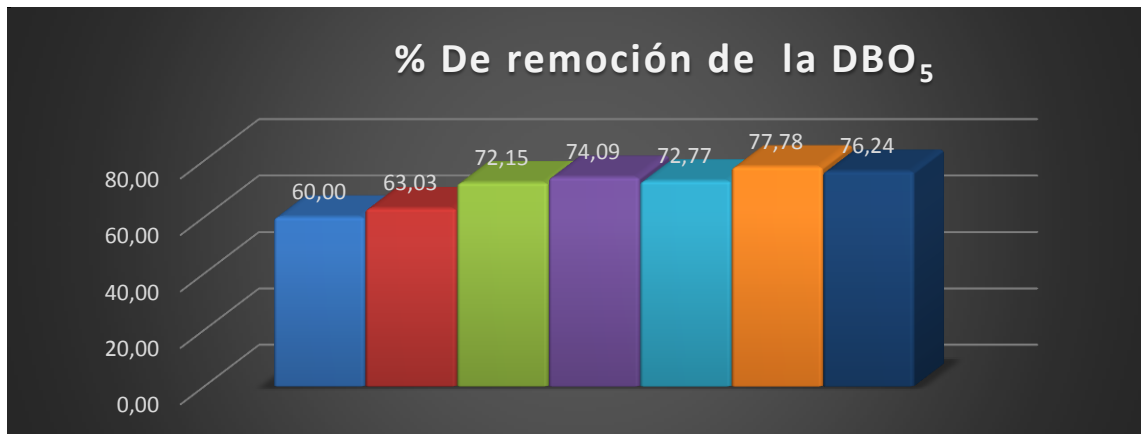
Finalmente en la gráfica 6 se determinó el porcentaje de remoción de la DBO₅ con eficiencias de 60.00% al 77.78 % con una media de 70.87+/- 6.22 %, demostrando eficiencias de remoción aceptables. Algunos autores citan teóricamente las altas remociones de DBO₅ que se pueden lograr en los RBC, las cuales oscilan de 75 a 95% (Rivera et al, 1988; Metcalf y Eddy, 1996; RAS, 1998; Spellman, 2003; Romero, 2008; citado por Pérez, 2010). La remoción de DBO₅ y de DQO estuvo por debajo de la norma según el Anexo A, con referente a remoción de estos parámetros para vertimientos a cuerpos de agua y vertimientos al alcantarillado público - decreto 1594 de 1984. Esto no quiere decir, que el RBC funcionara mal, es de recordar, que para este estudio no se utilizó sedimentadores a la entrada y a la salida por lo que las

eficiencia de remoción se ven afectadas, por otro lado no se contó con diferentes etapas o separadores lo que involucra menos discos y por tanto menos eficiencia.

Gráfica 5. Comportamiento de la DBO₅ para un TRH de 27 horas



Gráfica 6. Porcentaje de remoción de la DBO₅ para un TRH de 27 horas



7.1.5 Sólidos Suspendidos Totales.

Al iniciar el muestreo se evidenció la poca presencia de material en suspensión en la muestra a pesar de que esta se asimila como un AR típicamente doméstica, la ausencia de material en suspensión se puede atribuir a que la base para preparar el ARS es agua potable. Por lo tanto se determinó no evaluar este parámetro.

Además, un reactor biológico no está diseñado con el propósito de remover sólidos suspendidos ya que esta función debe ejecutarse en sistemas previos como desarenadores y decantadores primarios, por eso es de esperarse que las remociones no sean tan altas. Parte de los sólidos suspendidos son removidos en el reactor biológico por un proceso físico de sedimentación que se lleva a cabo en el reactor y en el sedimentador secundario. También puede darse remoción de sólidos por procesos biológicos con la degradación de pequeñas sustancias orgánicas, para ello las bacterias hidrolizan la partícula o mediante la secreción de enzimas que la

descomponen o la disuelven para incorporarlas luego dentro de la estructura celular. También puede removerse por ingestión de materia suspendida llevada a cabo por protozoos y metazoos de mayor tamaño para posteriormente ser removidos por la purga de lodos (Wiszniewski et al, 2006; Romero, 2008; citado por Pérez, 2010).

7.2 Parámetros microbiológicos.

Para identificar el grupo de coliformes fecales y totales se utilizó el medio de cultivo caldo Fluorocult LMX marca merck con la técnica de tubos múltiples de fermentación, utilizando 5 tubos de caldo LMX por dilución según recomendaciones de (Apha et al., 1998) como se explicó en la sección 6.8.2 . Los resultados de las pruebas realizadas para la identificación de coliformes totales y coliformes fecales se presentan en las Tablas 17 y 18 respectivamente.

Tabla 17. Resultados de las pruebas de fermentación con caldo LMX en tubos múltiples para coliformes totales

MUESTRA	FECHA	0,1 ML	0,01 ML	0.001 ML	COMBINACIÓN DE POSITIVOS	ÍNDICE NMP/ 100 ML	EFICIENCIA DE REMOCIÓN
Afluente 1	25/11/2014	5/5	4/5	4/5	5/4/4	7000	86,7%
Efluente 1	25/11/2014	2/5	2/5	1/5	2/2/1	930	
Afluente 2	9 /12/2014	5/5	5/5	4/5	5/5/4	7900	90,1%
Efluente 2	9 /12/2014	2/5	1/5	0/5	2/1/0	780	

Tabla 18. Resultados de las pruebas de fermentación con caldo LMX en tubos múltiples para coliformes fecales

MUESTRA	FECHA	0,1 ML	0,01 ML	0,001 ML	COMBINACIÓN DE POSITIVOS	ÍNDICE NMP/ 100 ML	EFICIENCIA DE REMOCIÓN
Afluente 1	25/11/2014	5/5	4/5	3/5	5/4/3	3300	79,4%
Efluente 1	25/11/2014	2/5	1/5	0/5	2/1/0	680	
Afluente 2	9/12/2014	4/5	4/5	2/5	4/4/2	4700	74,5%
Efluente 2	9/12/2014	2/5	2/5	1/5	2/2/1	1200	

De acuerdo con los resultados obtenidos se evidenció la presencia de coliformes tanto totales y fecales en el RBC debido principalmente al inóculo que se utilizaba del río Molino. Las eficiencias de remoción fueron altas obteniendo como mínima y máxima del 90,1% y 74,5%, estos resultados son similares a los reportados por otros autores como (Cordero et al., 2008) que obtuvieron eficiencias de remoción de 94,17% de coliformes totales para ARD con sedimentadores primario y secundario.

Estos resultados fueron satisfactorios y ponen en evidencia el uso de esta tecnología para el tratamiento de ARD porque a pesar de no contar con diferentes etapas en el RBC para cada material se dieron remociones altas del grupo coliforme.

7.3 Análisis seguimiento físico

La acumulación de biopelícula en el soporte g/cm^2 , es el resultado de dividir los gramos de biopelícula húmeda por el área de la superficie específica del sistema de extracción de la biopelícula del soporte. La determinación del color fue el resultado del seguimiento exhaustivo mediante registro fotográfico durante todo el periodo de investigación.

7.3.1 Análisis de las muestras (acrílico, plástico, tela verde de cerramiento y geotextil) masa/ área (g/cm^2)

BIOPELÍCULA SECA

Utilizando la prueba de Anova se verificara si existe relación entre la acumulación de la biopelícula según los diferentes materiales de soporte usados (Plástico, acrílico, geotextil y tela verde). Para ello se realizará el siguiente contraste:

H_0 = todas las medias son iguales $\mu_A = \mu_G = \mu_P = \mu_T$

H_1 = alguna media no es igual - alguna μ_i es diferente

Comprobando requisitos o condiciones de la prueba Anova: normalidad, y homocedasticidad

-NORMALIDAD:

Para establecer la normalidad de los datos se evaluó el sesgo estandarizado y la curtosis para la acumulación de biopelícula, los resultados se presentan en la Tabla 19. Para los cuatro materiales el sesgo y curtosis estandarizados: están entre -2 y $+2$ por tanto los datos vienen de una distribución normal.

Tabla 19. Resumen Estadístico para Acumulación g/cm^2

Material	Recuento (No. de muestras)	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación	Mínimo	Máximo	Rango
Acrílico	14	0,17	0,014	7,9 %	0,15	0,19	0,04
Geotextil	14	0,22	0,047	20,9%	0,15	0,31	0,15
Plástico	14	0,12	0,024	19,6%	0,08	0,15	0,07
Tela verde	14	0,13	0,025	19,1%	0,08	0,17	0,09
Total	56	0,16	0,051	3,4 %	0,08	0,31	0,22

Continuación Tabla 19. Resumen Estadístico para Acumulación g/cm²

Material	Sesgo Estandarizado	Curtosis Estandarizada
Acrílico	-0,27	-1,23
Geotextil	0,94	-0,57
Plástico	-0,22	-0,59
Tela verde	0,38	0,22
Total	2,83	1,61

HOMOCEASTICIDAD: ANÁLISIS DE VARIANZA

El contraste de Levene presentado en la Tabla 20, consiste en efectuar un análisis de la varianza sobre las diferencias en valor absoluto entre las observaciones y la mediana.

Tabla 20. Verificación de Varianza

	Prueba	Valor-P
Levene's	3,95609	0,0134

Puesto que el valor P es menor que 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las desviaciones estándar, con un nivel del 95,0% de confianza. Esto viola uno de los supuestos importantes subyacentes en el análisis de varianza e invalidará la mayoría de las pruebas estadísticas comunes. Por lo tanto no se cumple la segunda condición necesaria para poder tomar los resultados de la prueba Anova como válidos.

Tras comprobar si se cumplen o no las condiciones del ANOVA se puede concluir que los resultados obtenidos no son totalmente fiables, puesto que los datos no cumplen con el requisito de homocedasticidad, Por ello se utilizó la prueba de Kruskal-Wallis para realizar la comparación de las medianas en lugar de las medias. En la Tabla 21 se resumen los datos de la prueba.

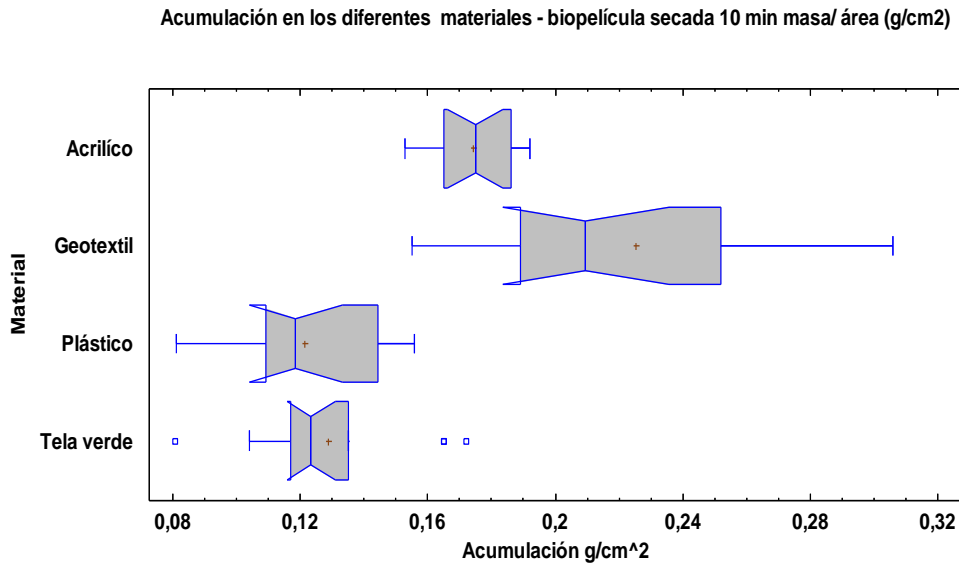
Tabla 21. Prueba de Kruskal-Wallis para Acumulación g/cm² por Material-biopelícula seca

Material	Tamaño Muestra	Rango Promedio
Acrílico	14	36,0
Geotextil	14	47,61
Plástico	14	13,46
Tela verde	14	16,923

Estadístico = 41,1381 Valor-P = 6,11267E-9

La prueba de Kruskal-Wallis evalúa la hipótesis de que las medianas de acumulación g/cm^2 dentro de cada uno de los 4 niveles de material son iguales. Puesto que el valor-P es menor que 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95,0% de confianza, por tanto se rechaza la hipótesis nula. Para determinar cuáles medianas son significativamente diferentes de otras, se presenta a continuación el Gráfico 7 de caja y bigotes con muesca de mediana.

Gráfica 7. Acumulación en los diferentes materiales – biopelícula secada 10 min masa/ área (g/cm^2)



En los datos de las muestras, la variabilidad parece ser similar dentro de cada material, aunque la localización muestra algunas diferencias. En este caso, hay 4 puntos alejados pero no hay puntos muy alejados. También se incluyen en la gráfica muescas que cubren una distancia arriba y abajo de la mediana. Las muescas de las medianas correspondientes al acrílico y geotextil no se traslapan, por tanto existe una diferencia estadísticamente significativa entre ellas, con un nivel de confianza del 95%, indicando que la mediana es significativamente mayor para el geotextil que para el acrílico. Las muescas para los materiales plásticos y tela verde se traslapan por tanto no existe una diferencia estadísticamente significativa entre ellas.

En los datos de la muestra, la muesca para el material geotextil no se traslapa con las cajas de ninguno de los materiales indicando que la mediana es significativamente mayor para este material.

BIOPELÍCULA HÚMEDA:

Utilizando la prueba de Anova se verificara si existe relación entre la acumulación de la biopelícula según los diferentes materiales de soporte usados (Plástico, acrílico, geotextil y tela verde). Para ello se realizará el siguiente contraste:

$H_0 =$ todas las medias son iguales $\mu_A = \mu_G = \mu_P = \mu_T$

$H_1 =$ alguna media no es igual - alguna μ_i es diferente

Comprobando requisitos o condiciones de la prueba de Anova: normalidad, y homocedasticidad.

-NORMALIDAD:

Para establecer la normalidad de los datos se evaluó el sesgo estandarizado y la curtosis para la acumulación de biopelícula, los resultados se presentan en la Tabla 22. Para los cuatro materiales el sesgo y curtosis estandarizados: están entre -2 y $+2$ por tanto los datos vienen de una distribución normal

Tabla 22. Resumen Estadístico para Acumulación g/cm^2 – biopelícula húmeda

Material	Recuento (No. de muestras)	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación	Mínimo	Máximo	Rango
Acrílico	14	0,19	0,01	7,32%	0,16	0,21	0,05
Geotextil	14	0,32	0,02	9,17%	0,25	0,35	0,1
Plástico	14	0,17	0,01	9,35%	0,14	0,19	0,05
Tela verde	14	0,14	0,023	16,81%	0,12	0,19	0,07
Total	56	0,20	0,07	35,03%	0,12	0,35	0,23

Material	Sesgo Estandarizado	Curtosis Estandarizada
Acrílico	-0,89	1,06
Geotextil	-2	0,501
Plástico	-0,50	-1,08
Tela verde	1,52	-0,21
Total	2,9	-0,70

HOMOCEDASTICIDAD: ANÁLISIS DE VARIANZA

El contraste de Levene presentado en la Tabla 22, consiste en efectuar un análisis de la varianza sobre las diferencias en valor absoluto entre las observaciones y la mediana.

Tabla 23. Verificación de Varianza – biopelícula húmeda

	Prueba	Valor-P
Levene's	1,49826	0,22

Puesto que el valor P es menor que 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las desviaciones estándar, con un nivel del 95,0% de confianza. Esto viola uno de los supuestos importantes subyacentes en el análisis de varianza e invalidará la mayoría de las pruebas estadísticas comunes. Por lo tanto no se cumple la segunda condición necesaria para poder tomar los resultados de la prueba de Anova como válidos.

Tras comprobar si se cumplen o no las condiciones de la prueba de Anova se puede concluir que los resultados obtenidos no son totalmente fiables, puesto que los datos no cumplen con el requisito de homocedasticidad, Por ello se utilizó la prueba de Kruskal-Wallis para realizar la comparación de las medianas en lugar de las medias. En la Tabla 23 se resumen los datos de la prueba.

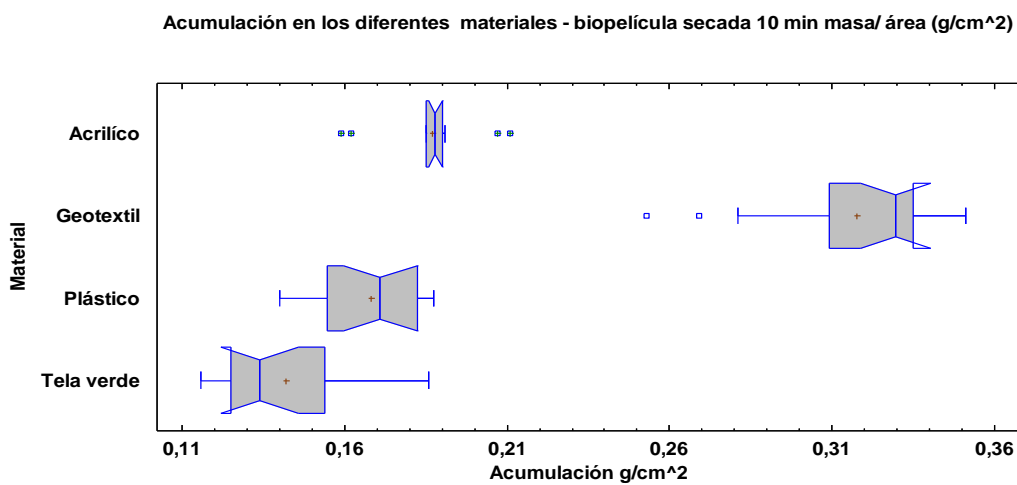
Tabla 24. Prueba de Kruskal-Wallis para Acumulación g/cm² por Material – biopelícula húmeda

Material	Tamaño Muestra	Rango Promedio
Acrílico	14	33,14
Geotextil	14	49,5
Plástico	14	20,36
Tela verde	14	11,0

Estadístico = 43,9818 Valor-P = 1,52265E-9

La prueba de Kruskal-Wallis evalúa la hipótesis de que las medianas de acumulación g/cm² dentro de cada uno de los 4 niveles de Material son iguales. Puesto que el valor-P es menor que 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95,0% de confianza, por tanto se rechaza la hipótesis nula. Para determinar cuáles medianas son significativamente diferentes de otras, se presenta a continuación el Gráfico 7 de caja y bigotes con muesca de mediana.

Gráfica 8. Acumulación en los diferentes materiales – biopelícula húmeda área (g/cm²)



Esta Gráfica 8, despliega 4 diagramas de caja y bigote, una para cada nivel de material. En este caso, hay 2 puntos alejados y 4 puntos muy alejados. La presencia de puntos muy alejados puede indicar valores aberrantes ó una distribución altamente sesgada. Se observa que el desplazamiento de la gráfica de caja correspondiente al geotextil hacia la derecha indica que hay mayor acumulación de biopelícula, siendo la diferencia entre el máximo y el mínimo mayor, como así también la diferencia intercuartílica. La caja correspondiente al acrílico nos indica que la dispersión de datos es poca y no existen valores máximos y mínimos muy alejados de la tendencia; Respecto a la caja de cuartiles del material Plástico y tela verde se puede asegurar que este conjunto de datos posee menor acumulación, en los datos de las muestras, la variabilidad parece ser similar dentro de cada material, aunque la localización muestra algunas diferencias.

En los datos de la muestra, la muesca para el material geotextil no se traslapa con las cajas de ninguno de los materiales indicando que la mediana es significativamente mayor para este material.

De acuerdo a las Gráficas 7 y 8 se puede apreciar, que los microorganismos presentes en el agua residual, colonizaron en general todas las superficies expuestas. Las variaciones en los pesos se ven influenciadas por los desprendimientos de la biopelícula causados por las fuerzas cortantes. El geotextil tuvo mayor acumulación promedio representada en 0,32 (g/cm²) en la biopelícula húmeda y 0,22 (g/cm²) en la biopelícula seca, seguido del acrílico que fue tomado como blanco, ya que se conocía por estudios previos, que es un material viable en la construcción de biodiscos por su corrugación, aunque este material presenta mayor costo de inversión en comparación

con los otros materiales, respectivamente la tela verde y el plástico representan los soportes con menor acumulación de biopelícula a lo largo de la investigación.

Los resultados obtenidos en el geotextil se debieron principalmente a las características que presenta el material, pues su porcentaje de vacíos es mayor lo que permite una mejor adherencia por parte del biofilm, además, los geotextiles no tejidos debido a su porosidad mayor al 90% y estructura de fibras entrelazadas aleatoriamente, poseen una alta permeabilidad, permitiendo el paso del agua y reteniendo las partículas (Geotextiles Funciones y Aplicaciones).

Las biopelícula que se desarrolla sobre materiales porosos son más estables y resistentes, (Cunningham et al., 1990; Iwai y Kitao, 1994; citado por Gonzáles et al., 2003). Los principales mecanismos de fijación de biopelícula en el medio de soporte poroso, como el utilizado en este sistema, son la adherencia y la fijación mecánica hecha dentro del poro, por lo tanto, la determinación de la acumulación de la biomasa en este tipo de material se hace en todo el medio de soporte, ya que el crecimiento se tiene tanto en la superficie del material del geotextil como dentro del poro. El geotextil presenta un promedio de acumulación de biopelícula húmeda de $0,23 \text{ (g/cm}^2\text{)}$ lo cual indica que en comparación con los otros materiales de soporte absorbe más agua del sistema lo que podría aumentar considerablemente el peso del conjunto. Una biopelícula está compuesta principalmente de agua. Los rangos reportados están en el orden del 87-99% (Eguía, 1991).

Importantes trabajos se han desarrollado con la incorporación del medio plástico en varios sistemas de tratamiento, ofreciendo ventajas tales como mayor superficie específica, mayor índice de huecos, menor densidad del empaque y mayor flexibilidad de construcción (Bezanilla, 1993). Los plásticos tardan más tiempo (meses-años) en su formación (Niquette, Servais & Savoie, 2000; citado por Ariza et al., 2013). Sin embargo, esto depende de las condiciones de flujo y de la calidad del agua. El PE utilizado tiene una duración aproximada de 2 años, se degrada por radiación UV y el oxígeno, por lo que la exposición permanente a la intemperie provoca su rotura al perder sus propiedades mecánicas, lo cual debe considerarse al diseñar un sistema de contactores biológicos con este material de soporte para los biodiscos.

El soporte con el material de tela verde de cerramiento tuvo un crecimiento de pequeñas colonias en formas de filamentos, la biopelícula cubrió por sectores la superficie y su crecimiento tendió hacia la periferia del disco en forma de filamentos. Este material en comparación a los demás es el que presenta una menor vida útil aproximada a ocho meses, lo cual es una característica que lo hace inviable a la hora de usarlo como material de soporte para un sistema de biodiscos.

Los soportes con material en tela verde y plástico, mantuvieron una acumulación similar a lo largo de la investigación, sin embargo se presume que existe mayor acumulación y desprendimiento de biopelícula en el plástico a la hora de diseñar un disco con mayor diámetro debido a que es un material muy liso; ya que estaría expuesto a tres tipos de desprendimiento: espontáneo, el cual se presenta constantemente en el material y por medio del cual se reintroducen nutrientes, microorganismos y metales al agua. Puede presentar una falla por adhesión y cohesión relacionado con aumento en las fuerzas cortantes.

7.3.2 Seguimiento del color de la biopelícula:

En las primeras semanas de arranque del sistema empezó a crecer una fina capa de textura gelatinosa de color transparente en la superficie de los discos, lo cual indica condiciones ambientales favorables de los microorganismos para la formación de microcolonias y formación de EPS (Davey y O'Toole, 2000), la biopelícula se empieza a observar más en las semanas siguientes, tomando una coloración grisácea de tipo filamentoso de poco espesor, pero en el disco de tela verde se observaba espacios de biopelícula sin coloración debido a la poca adherencia de los microorganismos a la superficie. Para el cuarto día después de iniciado el sistema continuo, se torna la biopelícula más espesa y más fuerte en adherencia a la superficie, esta coloración es indicativo de que la biomasa presente remueve preferentemente materia orgánica carbonácea (Welter et al, 2004). Al pasar unas semanas la coloración de la biopelícula se torna de color marrón claro con poco espesor, pero este va aumentando en el transcurso de la semana siguiente. Este marrón va cambiando a una tonalidad más clara, de un color habano; en este tiempo ocurre una falla en un eje del motor lo que ocasiona un daño de la biopelícula favoreciendo condiciones anaerobias en el reactor, por lo que se realizó un lavado del tanque y un raspado parcial de la biopelícula. A partir de este acontecimiento se deja que la biopelícula vuelva a condiciones estables para realizar las pruebas fisicoquímicas, retornando a una tonalidad amarronada rojiza lo cual es característico de la predominancia de microorganismos nitrificantes (Welter et al, 2004). No se observaron cambios de color distintos.

Del paso de la etapa estable a la etapa final se presentó un cambio de coloración a marrón blanco con un aumento de espesor debido a las condiciones favorables del reactor. Resultados similares son presentados por distintos autores (Cereceda et al., 2001; Welter et al., 2004, Pérez, 2010), lo que confirma el buen funcionamiento de la biopelícula.

7.4 Análisis seguimiento microbiológico (Anexo L)

A los quince días de iniciado el sistema con alimentación en continuo, se procedió a realizar la descripción macro y microscópica con tinción de Gram, encontrándose que existe una alta diversidad de microorganismos heterótrofos. Los morfotipos presentes encontrados corresponden a bacilos Gram positivos y bacilos Gram negativos en su mayoría; lo cual corresponde con los estudios realizados por Mara (2003), las bacterias saprofitas más frecuentemente aisladas en los sistemas de tratamiento microbiológico aerobios son Gram negativas, en forma de barras heterótrofas facultativas. En su mayoría pertenecen a los géneros *Achromobacter*, *Bacillus*, *Flavobacterium*, *Pseudomonas* y *Zooglea*, junto con los coliformes no fecales todas estas bacterias son *Proteobacterias* (Mara, 2003). Debido a que algunos bacilos Gram negativos están relacionados con la familia *Enterobacteriaceae* en la cual se encuentran algunos géneros potencialmente patógenos como *Escherichia coli*, *Klebsiella* y *Pseudomonas*, es necesario que se aplique un proceso de desinfección (Ariza et al., 2013).

Se realizaron tres observaciones aplicando microscopía óptica, correspondientes a los días 15, 32 y 45 de iniciado el sistema continuo; para muestras tomadas en tres puntos de los discos (externa, interna y centro), se evidenció que los nematodos parecen ser el grupo dominante dentro de las poblaciones más grandes de las muestras ya que se encontraron en los cuatro materiales (acrílico, plástico, tela verde y geotextil), la relación entre los nematodos y bacterias filamentosas era la relación biótica más significativa, y en menor medida, nemátodos con ciliados y rotíferos. La relación entre la abundancia de especies de nemátodos y las variables fisicoquímicas sugiere que los nemátodos pueden ser buenos indicadores de bajos niveles de carga de contaminantes en la entrada del sistema de RBC. Por último, los resultados indican que los nematodos pueden tener un papel relevante para un buen desarrollo de la biopelícula (Salvadó et al., 2004).

En general los puntos de muestreo presentaron similitud en la microfauna encontrada, la cual presentaba ciertos rasgos particulares en función del tiempo de toma de las muestras; realizadas a los once días después de iniciado el sistema continuo; con la tinción de Gram se encontró diversidad de bacterias Gram positivas y Gram negativas de acuerdo a lo escrito anteriormente, así como se observó por microscopía óptica la presencia en gran cantidad de bacterias filamentosas, para las observaciones tomadas a los 32 días del sistema en continuo, se evidencian ciertos cambios en la microfauna, con la aparición de especies más complejas (eucariotas), como algunas especies de protozoos y algas, finalmente después de 45 días, se encontró una abundante presencia de rotíferos y nematodos, de acuerdo a los resultados existe una evolución en la población microbiana a lo largo del tiempo en

funcionamiento del sistema de biodiscos, lo cual tiene concordancia con los siguientes reportes:

Según los antecedentes encontrados por Guerra (1988), Antonie y Welch fueron de los primeros investigadores que identificaron los microorganismos asociados con la biopelícula de un sistema de biodiscos. Encontraron, como más importantes, a los organismos filamentosos *Geotrichum candidum* y *Bacillus cereus*; y a las bacterias no filamentosas *Zooglea filipéndula*, *Pseudomonas denitrificans*, *Aerobacter aerogenes* y *Escherichia Coli*. Experimentos desarrollados por Torpey, et al., revelaron que existe una sucesión de diferentes tipos de microorganismos, empezando con una aglomeración gelatinosa de bacterias y *Sphaerotilus*, en la primera etapa, seguida por un crecimiento abundante y diverso de protozoarios, rotíferos y nemátodos en las etapas subsecuentes. Encontraron que la depredación de microorganismos es evidente en las últimas etapas del tratamiento, originando áreas claras en la superficie de los discos.

Ouyang también estudio la variación de organismos en las diferentes etapas e informó que en la primera etapa predominaron los organismos filamentosos *Sphaerotilus* y *Zooglea*: mientras que en la segunda etapa, se encontraron protozoarios y rotíferos. En las etapas tres y cuatro se encontró *Ketaria* y *Podophrya*. Resultados similares han presentado Hoag, Hovey y Pretorius.

La identificación de los principales grupos microbiológicos presentes en el reactor que se realizó para el biodisco es documentado en el anexo L, registrados para las fechas 11 de noviembre, 28 de noviembre y 11 de diciembre de 2014, correspondientes a los días 15, 32 y 45 de iniciado el sistema continuo, la identificación fue hecha mediante la comparación con fotos y la descripción hecha por varios autores (Kinner et al,1983; Rivera et al, 1988; AYMA, 1999; Cereceda et al, 2001; Vilaseca, 2001; Environmental Leverage Inc, 2003; Olivares, 2007; Air Products, s.f; citado por Pérez, 2010). La identificación no se realizó tan detalladamente como para reconocer cada uno de los individuos presentes en la biopelícula. Se optó por identificar los grupos principales de microorganismos los cuales son los que desempeñan una función concreta y pueden indicar el grado del tratamiento y la calidad del agua. Vilaseca (2001) establece que para determinar el estado de tratamiento de depuración la identificación hasta especie no es necesaria, es suficiente reconocerlos por grupos para valorar la eficacia del proceso de depuración.

8. CONCLUSIONES

- El sistema de reactor de biodiscos a escala de laboratorio, presento buenas eficiencias de remoción, superiores al 70%, para los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos realizados para un tiempo de retención de 27 horas (DBO₅, DQO, coliformes totales y coliformes fecales), en un ARD.
- Al realizar el seguimiento físico cuantitativo se encontró que la acumulación para el geotextil tuvo una diferencia significativa respecto a los otros materiales, presentado mayor acumulación tanto para la biopelícula húmeda y la seca, demostrando que el geotextil se presenta como la mejor opción para la implementación de diseños de biodiscos por su características de porosidad y durabilidad, que permiten una mejor adherencia por parte de la biopelícula, además es un material de bajo costo y fácil obtención. Se confirma que el acrílico es un material óptimo en la construcción de biodiscos por las características de corrugación que posee; el plástico de baja densidad utilizado, tiene buena adherencia de la biopelícula sin embargo, tuvo mayor desprendimiento por su textura lisa. La tela verde de cerramiento debido a su corta vida útil, no se propone en esta investigación para futuros estudios.
- El seguimiento microbiológico, permitió conocer la evolución de los principales microorganismos, evidenciándose que la relación biótica más representativa fue entre nemátodos y bacterias filamentosas, además se encontró que en los tres puntos de muestreo para los cuatro discos se encontraban la presencia de los mismos grupos de micrroorganismos, de los cuales predomino en el transcurso de las etapas bacterias, protozoos, nemátodos y rotíferos. La identificación de estos microorganismos permitió establecer que existía buenas condiciones de tratamiento.

9. RECOMENDACIONES

- Evaluar el comportamiento de parámetros fisicoquímicos como oxígeno disuelto (OD), alcalinidad y remociones de nitrógeno y fósforo, son importantes, ya que de éstos depende el desarrollo de las comunidades microbiológicas y por ende la eficacia en la remoción de compuestos orgánicos. Es aquí donde nace la necesidad de elaborar estudios adicionales que complementen estos componentes en lo concerniente al desempeño de este sistema biológico.
- Para el diseño del sistema se debe facilitar la extracción de los lodos producidos, mediante algún diseño de purga de lodos.
- Para estimular el crecimiento y fijación de la biopelícula, se recomienda aplicar en etapas iniciales un inóculo con alto contenido de microorganismos semejantes al AR.
- Es recomendable un sistema de pretratamiento de sedimentación a fin de retener sólidos que pudiesen interferir en alcanzar una mayor eficiencia de los biodiscos.
- Se sugiere tener varias etapas de discos construidos con geotextil por separado, para aumentar las eficiencias de remoción. Un sistema dividido en etapas permite que la película biológica presente diferentes tipos de poblaciones en cada una de ellas y especializada en la degradación de sustratos diferentes
- Se recomienda valorar diferentes tiempos de retención hidráulica, con el fin de definir las eficiencias de remoción vs TRH para los diferentes parámetros fisicoquímicos.
- Es pertinente evaluar un RCB con diferentes tipos de aguas residuales, incluyendo aguas residuales con alta carga orgánica como los lixiviados, con discos realizados en el material de geotextil.
- Se sugiere caracterizar por métodos fenotípicos o moleculares las comunidades microbiológicas de la biopelícula y del agua residual antes y después del tratamiento, para analizar más detalladamente los procesos bioquímicos involucrados en la remoción de nutrientes y patógenos.

10. BIBLIOGRAFÍA

- Agrouniverso. Tela verde. Recuperado de:
<http://www.agrouniverso.com/test/index.php/agricola/polisombras/80-tela-verde>
- Alemzadeh et al., (2002). Phenol biodegradation by rotating biological contactor. *Biochemical Engineering Journal* 11 (1), 19 - 23.
- Alnnasouri et al., (2011). Influence of surface topography on biofilm development: experiment and modeling. *Science direct*.
- Amorim et al., (2013). Bioaugmentation for treating transient 4-fluorocinnamic acid shock loads in a rotating biological contactor. *Science direct*.
- Antonie, R.L., (1976) Fixed biological surfaces- wastewater treatment .The rotating biological contactor. CRC Press, INC Cleveland, Ohio.
- Apha et al., (1998). Standard methods for the examination of water and wastewater. Washington, DC
- Ariza J.C et al., (2013). Efecto del desprendimiento de las biopelículas formadas en una red de acueducto sobre la calidad del agua. Universidad de los Andes. Bogotá, Colombia.
- Arquigráfico. Propiedades del acrílico. Recuperado de:
<http://www.arkigrafico.com/propiedades-del-acrilico/#>
- Autotrol (1978). Corporation Autotrol Wastewater Treatment Systems Design Manual, Bio - Systems Division, Milwaukee. Wisconsin.
- Axelsson, J et al., (2006). Decolorization of the textile dyes reactive red 2 and reactive blue 4 using *Bjerkandera* sp. strain BOL 13. *Enzyme and Microbial Technology* 39, 32 - 37.
- Banerjee G. (1997). Hydraulics of bench-scale rotating biological contactor. *Water Res.* 31(10), 2500–2510.
- Barros De Macêdo, J. A. (2000). "Biofilmes bacterianos, uma preocupação da indústria de farmacêutica." *Revista Fármacos & Medicamentos* 2(7): 6pp
- Behling et al., (2008). Desempeño de un reactor biológico rotativo de contacto al tratar un efluente camaronero bajo diferentes tiempos de retención hidráulico. *Boletín*

del centro de Investigaciones biológicas Volumen 42, No. 2, 2008, Pp. 243–254
Universidad de Zulia, Maracaibo, Venezuela

- Bernal et al., (2005). Guía Selección de tecnología para el tratamiento de aguas residuales domésticas por métodos naturales. Universidad Del Valle.
- Bezanilla J. A. (1963). Depuración de agua residual en un contactor biológico rotativo (RBC) con alternancia en el sentido del flujo. Tesis Doctoral. Universidad De Cantabria Escuela Superior De La Marina Civil
- Campos (2003). Indicadores de contaminación fecal en aguas. Recuperado de: http://tierra.rediris.es/hidrored/ebooks/ripda/pdfs/Capitulo_20.pdf
- Castillo, et al., (2007). "Landfill leachate treatment using a rotating biological contactor and an upward-flow anaerobic sludge bed reactor." *Waster management*(20): 7pp.
- Castillo, F & Vivas, F. (1996) "Tratamiento de aguas residuales, de una empresa papelera, con sistemas de biodiscos." *Revista Acotepac* (29) : 6pp.
- Chavan y Mukherji (2007). Dimensional analysis for modeling oxygen transfer in rotating biological contactor. *Science direct*
- Cereceda et al., (2001). "Biofilm Communities and Operational Monitoring of a Rotating Biological Contactor System." *Water, Air & Soil Pollution* 126(3-4): 14pp
- Cordero et al., (2008). Determinación de la eficiencia de un tratamiento aerobio de aguas residuales, con la aplicación de un sistema contactor biológico rotante. Tesis. Universidad Politécnica Salesiana. Cuenca.
- Costley, S. C. & wallis, F. M. (2000). "Effect of flow rate on heavy metal accumulation by rotating biological contactor (RBC) biofilms." *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology* 24(4): 7pp.
- Costerton et al., (1999) Bacterial biofilms: A common cause of persistent infections. *Science*, 284.
- Davey y O'Toole (2000). Microbial biofilms: from ecology to molecular genetics. *Microbiology and molecular biology reviews*, Dec. 2000, p. 847–867
- Datta y Philip (2014). Performance of a rotating biological contactor treating voc emissions from paint industry. *Science direct*.
- Dellaire, G. (1979) "Behind the rapid rise of the rotating biological contactor" *Journal of The Civil Engineering Division , Proc. Of the ASCE* 49(1): 72 -73.

- Diez, J. F. & Gómez, V. J. (1999). Diseño y Construcción de un sistema de Biodisco para el tratamiento de Aguas Residuales. Escuela de Ingenierías -Facultad de Ingeniería Mecánica. Medellín, Universidad Pontificia Bolivariana, UPB. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico: 158.
- Di Palma & Verdone, N. (2008). "The effect of disk rotational speed on oxygen transfer in rotating biological contactors." *Bioresource technology* 100(3): 4pp.
- Doman J.(1929). Results of operation in experimental contact filter with partially submerged rotating plates. *Sewage Work's Journal*, I(5): 555-559
- Duque et al., (2011). Bioaugmentation of a rotating biological contactor for degradation of 2-fluorophenol. *Science direct*.
- Eguía E. (1991). Desarrollo de la biopelícula en medio de soporte permeable. Tesis Doctoral. Universidad De Cantabria Escuela Superior De La Marina Civil
- EPA et al., 1980. First national simposium / Workshop on rotating biological contactor technology held at champion, Pennsylvania.
- Fernández et al., (2010). Determinación de la viabilidad en uso de geotextil no tejido como medio filtrante, en flujo horizontal, para la remoción de sólidos suspendidos, materia orgánica y nutrientes en efluentes de piscifactorías de trucha. *Rev. Journal de Ciencia e Ingeniería*. Vol. 02, No. 02, Páginas 33–41
- Gadd, G.M. y A.J. Griffiths (1978). Microorganism and heavy metal toxicity. *Microbial Ecol.*: 4, 303-317
- Geomembrana soluciones de Ingeniería. Ficha técnica. Recuperado de: http://geomembranas.com.co/wp-content/uploads/2012/06/03_Fichatecnica-Geotextil-No-Tejido-Tipo-1600-v3.pdf
- Geotextiles Funciones y Aplicaciones. Recuperado de: http://www.mexichem.com.mx/Sol_Integrales/Geosinteticos/pdfs/Infraestructura/Catalogo%20Funciones%20Aplicaciones%20Geotextiles.pdf
- Global water partnership (2000). Agua para el siglo XIX: de la visión a la acción. America del Sur.
- González B et al., (2003). Tratamiento de agua residual municipal utilizando biopelículas en suspensión. Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México
- Griffin, P., & Findlay, G. (2000). Process and engineering improvements to rotating biological contactors design. *Water Science & Technology*, 41, (1), 137-144.

- Guerra D. (1988). Comparación de las características de sedimentación de lodos producidos de dos sistemas de biodiscos. Tesis. Universidad Autónoma de Nuevo León. Monterrey.
- Infoagro. Los plásticos en la agricultura. Materiales de cubierta para invernaderos
Recuperado de: http://www.infoagro.com/industria_auxiliar/plasticos2.htm
- Kapdan, I.K., Kargi, F. (2002). Biological decolorization of textile dyestuff containing Wastewater by *Coriolus versicolor* in a rotating biological contactor. *Enzyme and Microbial Technology* 30 (2), 195 - 199.
- Kubsad et al., (2004). Model for oxygen transfer in rotating biological contactor. *Science direct*.
- Los plásticos en la agricultura: Materiales de cubierta para invernaderos.
Recuperado de: <http://www.ecofisiohort.com.ar/wp-content/uploads/2008/08/los-plasticos-en-la-agricultura.pdf>
- Malachova et al., (2013). Biodegradation and detoxification potential of rotating biological contactor (rbc) with *irpex lacteus* for remediation of dye-containing wastewater. *Science direct*.
- Mara, D (2003). *Domestic Wastewater Treatment in Developing Countries*. Earthscan. London.
- Martínez A. (2001). Biodiscos: una alternativa de tratamiento biológico para aguas residuales cuando no se dispone de grandes extensiones de terreno, 13(3), 57–59.
- Mba D. (2003). “Mechanical evolution of the rotating biological contactor into the 21st century.” *Proceedings of the institution of mechanical engineers. Part E: Journal of process mechanical engineering* 217 (3):31 pp.
- Mba, D; Bannister, R. H. & Findlay, G. E. (1999). “Mechanical redesing of the rotating biological contactor.” *Wáter research* 33 (18): 10 pp.
- Metcalf Y Eddy. (2003). *Wastewater Engineering. Treatment and Reuse*. Fourth edición
- Metcalf & Eddy (1996) *Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento vertido y reutilización*. Editorial Mc Graw Hill. México.

- Ministerio del Medio Ambiente de Colombia (2002). Gestión para el manejo, tratamiento y disposición final de las aguas residuales municipales. Guía. Santa Fé de Bogotá. Colombia.
- Nahid et al., (2001). Treatment of bakers yeast wastewater with a biopack system. Science direct.
- Najafpour, et al., (2005). Effect of organic loading on performance of rotating biological contactors using Palm Oil Mill effluents. Process Biochemistry, 40(8), 2879 – 2884.
- Ordoñez, P.J y A. Betancourt. (2003). Estudio preliminar para el tratamiento de lixiviados en un reactor de biodiscos. Tesis Universidad Nacional De Colombia.
- Pakshirajan, K. y Kheria, S., "El tratamiento continuo de industria de color de las aguas residuales utilizando inmovilizado *Chrysosporium Phanerochaete* en una rotación biológica reactor contactor ", Journal of Environmental Gestión, 101, 118- 123, 2012.
- Parreiras, S. 2005. Curso sobre tratamiento de esgoto por disposição no solo. Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM), Belo Horizonte (Brasil). 40 p
- Plan nacional de desarrollo, (2014). Informe al congreso, Recuperado de: <https://sinergia.dnp.gov.co/PortalDNP/Default.aspx?txtAplicacion=Sinergia&txtUrl=https://sinergia.dnp.gov.co/Sinergia/Seguimiento.aspx>
- Pérez, Juan (2010) Aplicación y evaluación de un reactor de contactores biológicos rotativos a escala laboratorio como tratamiento de lixiviados generados en el relleno sanitario de la pradera. Tesis. Universidad de Medellín
- Peter, R.W. and J.E. Alleman (1982). "The history of fixed-film wastewater treatment systems",in proc of list, international conf. fixed – film Biol. Preocesses , Kings Island, Ohio
- Popel, F. (1964) Aufbau, Abbauleistung and Bemessung von Tauchtropfkörper Schweiz Z. f. Hidrolog.XXVI(2), pp. 394-407
- Poujoulat, G., (1916). "Apparatus for the Purification of Sewage." French Patent No. 478,669; 1May 1915, Jour. Soc. Chemical Industry, 35, 1129
- Progen. Tela verde ficha de especificaciones. Recuperado de: <http://www.aliensenalizacion.com/documentos/polisombra.pdf>

- Rana, N. S. & Khare, M. (2002). "Design Criteria for a Rotating Biological Contactor System for Treatment of Urinal Wastewater." *International Journal of Environmental Studies* 59(1): 11pp.
- Rodríguez et al., (2003). Determinación de coliformes totales y E.coli en aguas utilizando el Fluorocult LMX (MERCK) I: Comparación con los medios de cultivo tradicionales.
- Rodríguez y Lozano (2012) "Preparación, composición y uso de agua residual sintética para alimentación de reactores prototipo y de laboratorio". *Rev. Didáctica Ambiental*. Pág. 10-16.
- Romero, J. A. (2008). *Tratamiento de Aguas Residuales: Teoría y principios de diseño*. Bogotá, Escuela Colombiana de Ingeniería. 1248pp.
- Sassi et al, (1996). Relaxation time analysis of a rotating biological contactor. *Science direct*.
- Sahinkaya y Dilek., (2006). Biodegradation of 4-cp and 2,4-dcp mixture in a rotating biological contactor (rbc). *Science direct*.
- Salvadó et al., (2004) Dinámica de nematodos en una carga orgánica alta contactores biológicos rotatorios. *Res Agua*. May; 38 (10): 2571-8.
- Singh y Mittal. (2012) .Caracterización de biofilm de un contactor rotativo tratamiento de agua residual sintética. *Rev: Ciencia del Agua y Tecnología*. Vol 66 No. 2 pp 429-437.
- Sishidome y Kusuda (1988). Measurements of dissolved oxygen in attached microbial films of rotating biological contactor by oxygen microelectrode. *Science direct*.
- Spengel D. and D. Dzombak. (1991.) Treatment of landfill leachate with rotating biological contactors: Bench-scale experiments. *Research Journal WPCF*
- Suarez, C (2011). *Tratamiento De Aguas Residuales Municipales en El Valle Del Cauca*. Tesis. Universidad Del Valle.
- Teixera y Oliveira (2001). Denitrification in a closed rotating biological contactor: effect of disk submergence. *Science direct*.
- UN/ECE (United Nations Economic Commission for Europe) (1995). *State of the Art on Monitoring and Assessment: Rivers*. UN/ECE Task Force on Monitoring and assessment, Draft Report V. Lelystad, the Netherlands: RIZA.

- Valdés, N. y Montesino M. A. (2003). Tratamiento de aguas residuales domésticas empleando un reactor biológico rotatorio, Ingeniería Hidráulica Y Ambiental, VOL. XXIV, No. 2
- Vasiliadou et al., (2014). experimental and modeling study on removal of pharmaceuticallyactive compounds in rotating biological contactors. Science direct.
- Vilaseca, M. M. (2001). "Observación microscópica de fangos activados en los tratamientos de depuración biológica." Boletín Intexter del Instituto de Investigación Textil y de Cooperación Industrial - Universitat Politècnica de Catalunya (119): 6pp.
- Von Sperling, M (1995). Comparison among the most frequently used systems for wastewater treatment in developing countries. International symposium on technology transfer. Salvador, Bahia. Brasil.
- Welter et al., (2004). "La Biopelícula en los procesos RBC." Recuperado de: <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/argentina14/welter.pdf>.
- Yamaguchi (1999). Biodegradation of hydrocarbons by prototheca zopfii in rotating biological contactors. Science direct.
- Yuce (1989). Biodegradation and removal of phenols in rotating biological contactors. Science direct

ANEXOS

Anexo A. Normatividad colombiana con respecto a principales parámetros microbiológicos y fisicoquímicos (Adaptado de Decreto 1594 de 1984)

ARTÍCULO	DEFINICIÓN	PARÁMETROS
38	Criterios de calidad admisibles para la destinación del recurso humano y doméstico. Para su potabilización se requiere solamente tratamiento convencional	pH 5.0 a 9.0 unidades Coliformes Totales: 20000 microorganismos / 100 ml Coliformes fecales: 2000 microorganismos / 100 ml
39	Criterios de calidad admisibles para la destinación del recurso humano y doméstico. Para su potabilización se requiere solo desinfección	pH 6.5 a 8.5 unidades Coliformes Totales: 1000 microorganismos / 100 ml
40	Criterios admisibles para la destinación del recurso para uso agrícola	pH 5.0 a 9.0 unidades Para riego de frutas que se consuman sin quitar la cáscara y para hortalizas de tallo corto: Coliformes fecales < 1000 microorganismos / 100 ml Coliformes Totales < 5000 microorganismos / 100 ml
41	Criterios de calidad admisibles para la destinación del recurso para uso pecuario	Sin definir
42	Criterios de calidad admisibles para la destinación del recurso para fines recreativos mediante contacto primario	pH 5.0 a 9.0 unidades Coliformes Totales: 1000 microorganismos / 100 ml Coliformes fecales: 200 microorganismos / 100 ml
43	Criterios de calidad admisibles para la destinación del recurso para fines recreativos mediante contacto secundario	pH 5.0 a 9.0 unidades Coliformes Totales: 5000 microorganismos / 100 ml
44	Criterios de calidad admisibles para la destinación del recurso para uso estético	
45	Criterios de calidad admisibles para la destinación del recurso para preservación de flora y fauna, en aguas dulces, frías o cálidas y en aguas marinas o estuarias	pH Unidades 6.5 - 9.0 4.5 - 9.0 6.5 - 8.5
72	Vertimiento a cuerpos de agua	pH: 5.0 a 9.0 Temperatura < 40°C Sólidos suspendidos > 80% de carga de remoción DBO ₅ > 80% de carga de remoción
73	Vertimiento al alcantarillado público	pH: 5.0 a 9.0 Temperatura < 40°C Sólidos suspendidos > 80% de carga de remoción DBO ₅ > 80% de carga de remoción

Anexo B. Seguimiento y registro fotográfico sistema RBC



Foto 1.
Observación: discos en acero inoxidable
Fecha: julio de 2014



Foto 2.
Observación: discos en acero inoxidable
Fecha: julio de 2014



Foto 3.
Observación: discos en acero inoxidable cubiertos en tela verde , acrílico, geotextil y plástico
Fecha: julio de 2014



Foto 4.
Observación: montaje del sistema RBC en acrílico
Fecha: agosto de 2014



Foto 5.
Observación: vista lateral – montaje RBC
Fecha: agosto de 2014



Foto 6.
Observación: vista frontal – montaje RBC y bomba peristáltica
Fecha: agosto de 2014



Foto 7.
Observación: discos con área conocida de los materiales prototipos
Fecha: agosto de 2014



Foto 8.
Observación: motor 2.2 RPM
Fecha: agosto de 2014



Foto 9.
Observación: motor 2.2 RPM
Fecha: agosto de 2014



Foto 10.
Observación: crecimiento inicial de la biopelícula
Fecha: 22 de septiembre 2014



Foto 11.
Observación: crecimiento inicial de la biopelícula
Fecha: 22 de septiembre 2014



Foto 12.
Observación: crecimiento inicial de la biopelícula
Fecha: 22 de septiembre 2014



Foto 12.
Observación: crecimiento inicial de la biopelícula
Fecha: 22 de septiembre 2014

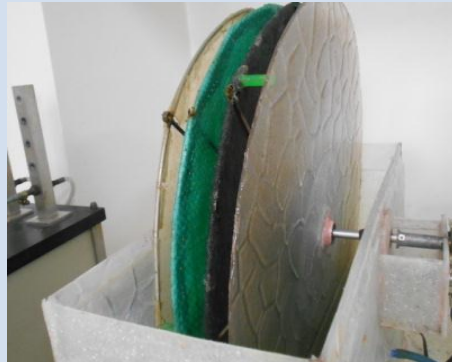


Foto 13.
Observación: crecimiento inicial de la biopelícula
Fecha: 24 de septiembre 2014



Foto 14.
Observación: crecimiento inicial de la biopelícula
Fecha: 24 de septiembre 2014



Foto 14.
Observación: crecimiento inicial de la biopelícula
Fecha: 24 de septiembre 2014



Foto 15.
Observación: crecimiento inicial de la biopelícula
Fecha: 24 de septiembre 2014



Foto 15.
Observación: desprendimiento de la biopelícula
Fecha: 24 de septiembre 2014



Foto 20.
Observación: crecimiento inicial de la biopelícula
– color marrón
Fecha: 3 de octubre 2014



Foto 21.
Observación: crecimiento inicial de la biopelícula
– color marrón
Fecha: 3 de octubre 2014



Foto 23.
Observación: crecimiento inicial de la biopelícula – color marrón
Fecha: 3 de octubre 2014

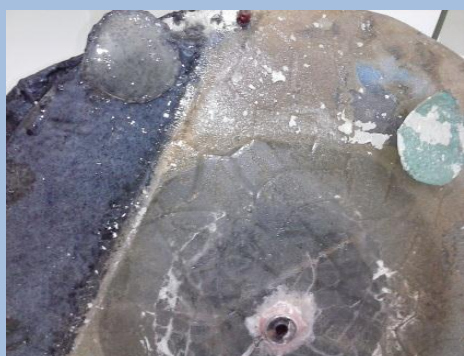


Foto 32.
Observación: daño en el motor
Fecha: 14 de octubre 2014



Foto 33.
Observación: daño en el motor
Fecha: 14 de octubre 2014



Foto 34.
Observación: daño en el motor
Fecha: 14 de octubre 2014



Foto 38.
Observación: crecimiento de la biopelícula
Fecha: 4 de noviembre 2014

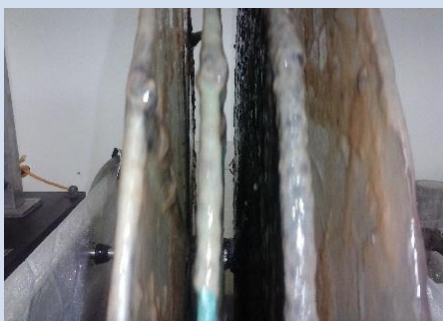


Foto 39.
Observación: crecimiento de la biopelícula
Fecha: 4 de noviembre 2014



Foto 40.
Observación: crecimiento de la biopelícula
Fecha: 4 de noviembre 2014



Foto 47.

Observación: crecimiento de la biopelícula
Color marrón

Fecha: 14 de noviembre de 2014

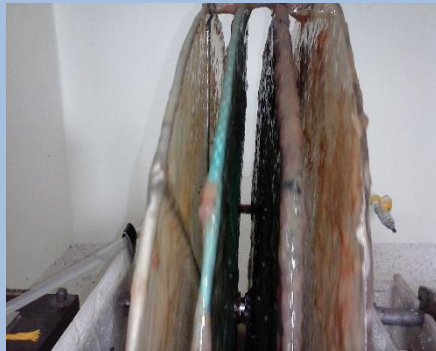


Foto 48.

Observación: crecimiento de la biopelícula
Color marrón

Fecha: 14 de noviembre de 2014



Foto 49.

Observación: crecimiento de la biopelícula-
Color marrón

Fecha: 14 de noviembre de 2014



Foto 52.

Observación: crecimiento de la biopelícula
Color marrón

Fecha: 24 de noviembre de 2014



Foto 53.

Observación: crecimiento de la biopelícula
Color marrón

Fecha: 14 de noviembre de 2014



Foto 54.

Observación: crecimiento de la biopelícula
Color marrón

Fecha: 14 de noviembre de 2014



Foto 55.

Observación: crecimiento de la biopelícula
Color marrón – vista de materiales prototipo

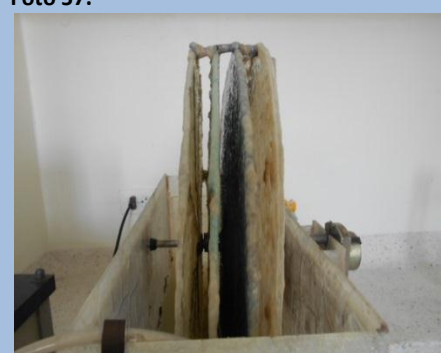
Fecha: 1 de diciembre de 2014



Foto 56.

Observación: crecimiento de la biopelícula
Color marrón

Fecha: 1 de diciembre de 2014



Observación: crecimiento de la biopelícula
Color marrón

Fecha: 1 de diciembre de 2014



Foto 58.
Observación: crecimiento de la biopelícula
 Color marrón – Geotextil
Fecha: 14 de diciembre de 2014



Foto 59.
Observación: crecimiento de la biopelícula
 Color marrón - Plástico
Fecha: 14 de diciembre de 2014



Foto 60.
Observación: crecimiento de la biopelícula
 Color marrón - tela verde
Fecha: 14 de diciembre de 2014



Foto 61.
Observación: crecimiento de la biopelícula
 Color marrón - Acrílico
Fecha: de diciembre de 2014

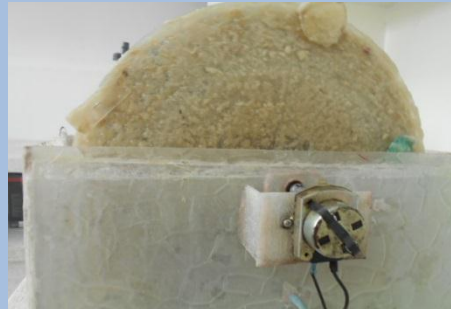


Foto 62.
Observación: crecimiento de la biopelícula
 Color marrón
Fecha: 14 de noviembre de 2014



Foto 63.
Observación: crecimiento de la biopelícula
 Color marrón
Fecha: 14 de noviembre de 2014



Foto 64.
Observación: crecimiento de la biopelícula
 Color marrón - lodos
Fecha: 17 de diciembre de 2014



Foto 65.
Observación: crecimiento de la biopelícula
 Color marrón - lodos
Fecha: 17 de diciembre de 2014



Foto 68.
Observación: crecimiento de la biopelícula
 Color marrón - lodos
Fecha: 17 de diciembre de 2014

Anexo C. Volúmenes de sustrato aplicados para la adecuación del reactor (alimentación en batch)

ALIMENTACIÓN EN BATCH			
DÍA	FECHA	INÓCULO (L)	AGUA RESIDUAL SINTÉTICA AL TRIPLE DE LOS COMPONENTES (L)
1	16-sep-14	12	4.5
2	17-sep-14		
3	18-sep-14	1	1
4	19-sep-14	1	1
5	20-sep-14	2	2
6	21-sep-14		
7	22-sep-14		
8	23-sep-14	1	1
9	24-sep-14	1	1
10	25-sep-14	1	1
11	26-sep-14	2	2
12	27-sep-14		
13	28-sep-14		
14	29-sep-14	1	1
15	30-sep-14	1	1
16	01-oct-14	1	1
17	02-oct-14	1	1
18	03-oct-14	2	2
19	04-oct-14		
20	05-oct-14		
21	06-oct-14	1	1
22	07-oct-14	1	1
23	08-oct-14	1	1
24	09-oct-14	1	1
25	10-oct-14	3	3
26	11-oct-14		
27	12-oct-14		
28	13-oct-14		
29	14-oct-14	12	4.5
30	15-oct-14	1	1
31	16-oct-14	1	1
32	17-oct-14	2	2
33	18-oct-14		
34	19-oct-14		
35	20-oct-14	1	1
36	21-oct-14	1	1
37	22-oct-14	1	1
38	23-oct-14	1	1
39	24-oct-14	2	2
40	25-oct-14		
41	26-oct-14		
42	27-oct-14	1	1

Continuación Anexo C.

ALIMENTACIÓN EN CONTINUO			
DÍA	FECHA	INÓCULO (L)	VOLUMÉN (L)
43	28/10/2014	3	39
44	29/10/2014		
45	30/10/2014		
46	31/10/2014	1	13
47	01/11/2014	3	39
48	02/11/2014		
49	03/11/2014		
50	04/11/2014	3	39
51	05/11/2014		
52	06/11/2014		
53	07/11/2014	3	39
54	08/11/2014		
55	09/11/2014		
56	10/11/2014	3	39
57	11/11/2014		
58	12/11/2014		
59	13/11/2014	2	19.5
60	14/11/2014		
61	15/11/2014	3	39
62	16/11/2014		
63	17/11/2014		
64	18/11/2014	3	39
65	19/11/2014		
66	20/11/2014		
67	21/11/2014	1	13
68	22/11/2014	3	39
69	23/11/2014		
70	24/11/2014		
71	25/11/2014	3	39
72	26/11/2014		
73	27/11/2014		
74	28/11/2014	3	39

Continuación Anexo C.

ALIMENTACIÓN EN CONTINUO			
DÍA	FECHA	INÓCULO (L)	VOLUMÉN (L)
75	29/11/2014		
76	30/11/2014		
77	01/12/2014	3	39
78	02/12/2014		
79	03/12/2014		
80	04/12/2014	2	19.5
81	05/12/2014		
82	06/12/2014	3	39
83	07/12/2014		
84	08/12/2014		
85	09/12/2014	3	39
86	10/12/2014		
87	11/12/2014		

Anexo D. NMP para varias combinaciones de resultados para 5 tubos de fermentación por dilución (Apha et al., 1998)

Combinación de tubos positivos			NMP/100mL	Límites de 95% de confianza		Combinación de tubos positivos			NMP/100mL	Límites de 95% de confianza	
				Inferior	Superior					Inferior	Superior
0	0	0	< 1.8	-	6.8	4	0	3	25	9.8	70
0	0	1	1.8	0.090	6.8	4	1	0	17	6.0	40
0	1	0	1.8	0.090	6.9	4	1	1	21	6.8	42
0	1	1	3.6	0.70	10	4	1	2	26	9.8	70
0	2	0	3.7	0.70	10	4	1	3	31	10	70
0	2	1	5.5	1.8	15	4	2	0	22	6.8	50
0	3	0	5.6	1.8	15	4	2	1	26	9.8	70
1	0	0	2.0	0.10	10	4	2	2	32	10	70
1	0	1	4.0	0.70	10	4	2	3	38	14	100
1	0	2	6.0	1.8	15	4	3	0	27	9.9	70
1	1	0	4.0	0.71	12	4	3	1	33	10	70
1	1	1	6.1	1.8	15	4	3	2	39	14	100
1	1	2	8.1	3.4	22	4	4	0	34	14	100
1	2	0	6.1	1.8	15	4	4	1	40	14	100
1	2	1	8.2	3.4	22	4	4	2	47	15	120
1	3	0	8.3	3.4	22	4	5	0	41	14	100
1	3	1	10	3.5	22	4	5	1	48	15	120
1	4	0	10	3.5	22	5	0	0	23	6.8	70
2	0	0	4.5	0.79	15	5	0	1	31	10	70
2	0	1	6.8	1.8	15	5	0	2	43	14	100
2	0	2	9.1	3.4	22	5	0	3	58	22	150
2	1	0	6.8	1.8	17	5	1	0	33	10	100
2	1	1	9.2	3.4	22	5	1	1	46	14	120
2	1	2	12	4.1	26	5	1	2	63	22	150
2	2	0	9.3	3.4	22	5	1	3	84	34	220
2	2	1	12	4.1	26	5	2	0	49	15	150
2	2	2	14	5.9	36	5	2	1	70	22	170
2	3	0	12	4.1	26	5	2	2	94	34	230
2	3	1	14	5.9	36	5	2	3	120	36	250
2	4	0	15	5.9	36	5	2	4	150	58	400
3	0	0	7.8	2.1	22	5	3	0	79	22	220
3	0	1	11	3.5	23	5	3	1	110	34	250
3	0	2	13	5.6	35	5	3	2	140	52	400
3	1	0	11	3.5	26	5	3	3	170	70	400
3	1	1	14	5.6	36	5	3	4	210	70	400
3	1	2	17	6.0	36	5	4	0	130	36	400
3	2	0	14	5.7	36	5	4	1	170	58	400
3	2	1	17	6.8	40	5	4	2	220	70	440
3	2	2	20	6.8	40	5	4	3	280	100	710
3	3	0	17	6.8	40	5	4	4	350	100	710
3	3	1	21	6.8	40	5	4	5	430	150	1100
3	3	2	24	9.8	70	5	5	0	240	70	710
3	4	0	21	6.8	40	5	5	1	350	100	1100
3	4	1	24	9.8	70	5	5	2	540	150	1700
3	5	0	25	9.8	70	5	5	3	920	220	2600
4	0	0	13	4.1	35	5	5	4	1600	400	4600
4	0	1	17	5.9	36	5	5	5	> 1600	700	-
4	0	2	21	6.8	40						

Anexo E. Resultados para el pH

Fecha	pH	
	Afluente	Efluente
28/10/2014	6.8	7.2
29/10/2014	6.9	7.1
30/10/2014	6.7	7.2
31/10/2014	6.5	6.9
01/11/2014	6.9	7.1
04/11/2014	7.1	7.2
05/11/2014	6.9	7.2
06/11/2014	7.2	7.4
07/11/2014	7.4	7.6
10/11/2014	7.2	7.4
11/11/2014	6.9	7
12/11/2014	6.8	6.9
13/11/2014	6.65	7.4
14/11/2014	6.6	6.9
15/11/2014	6.9	7
18/11/2014	6.6	6.8
19/11/2014	6.7	6.9
20/11/2014	7.5	7.89
21/11/2014	7.2	7.4
22/11/2014	7.1	7.2
25/11/2014	6.9	7
26/11/2014	6.8	7.1
27/11/2014	6.87	7.54
28/11/2014	6.7	7.2
01/12/2014	6.9	7.1
02/12/2014	6.5	6.7
03/12/2014	6.6	6.7
04/12/2014	7.34	7.65
05/12/2014	6.8	6.9
06/12/2014	6.9	7.2
09/12/2014	6.9	7.1
10/12/2014	6.8	7.2
11/12/2014	6.65	7.3

Anexo F. Resultados para la temperatura.

TEMPERATURA (°C)		
Fecha	Afluente	Efluente
28/10/2014	21.87	20.8
29/10/2014	19.7	20.5
30/10/2014	21.6	20.65
31/10/2014	19.67	19.5
01/11/2014	18.65	18.9
04/11/2014	21.54	20.1
05/11/2014	19.89	19.5
06/11/2014	20.5	20.13
07/11/2014	20.33	19.26
10/11/2014	20.66	19.6
11/11/2014	19.4	20.2
12/11/2014	19.8	20.1
13/11/2014	19.9	19.6
14/11/2014	19.8	18.9
15/11/2014	20.65	19.4
18/11/2014	21.24	20.1
19/11/2014	19.99	19.8
20/11/2014	21.02	19.5
21/11/2014	19.87	20.2
22/11/2014	19.06	19.5
25/11/2014	20.76	19.5
26/11/2014	19.76	18.9
27/11/2014	19.3	21.7
28/11/2014	19.87	20.4
01/12/2014	20.8	19.5
02/12/2014	19.6	20.1
03/12/2014	19.8	20.1
04/12/2014	19.65	20.4
05/12/2014	19.57	19.5
06/12/2014	19.9	21
09/12/2014	19.87	19.5
10/12/2014	20.04	18.9
11/12/2014	20.3	19.74

Anexo G. Resultados de la DQO

DQO (mg/L)			
FECHA	AFLUENTE	EFLUENTE	REMOCIÓN (%)
30/10/2014	450	117.32	73.93
06/11/2014	380	112.87	70.30
13/11/2014	365	113.98	68.77
20/11/2014	378	117.119	69.02
27/11/2014	349	83.569	76.05
04/12/2014	367	113.678	69.03
11/12/2014	364	109.497	69.92

Anexo H. Resultados de la DBO₅

DBO ₅ (mg/L)			
FECHA	AFLUENTE	EFLUENTE	REMOCIÓN (%)
30/10/2014	252	100.8	60.00
06/11/2014	198	73.193	63.03
13/11/2014	156	43.44	72.15
20/11/2014	187	48.456	74.09
27/11/2014	168	45.745	72.77
04/12/2014	179	39.765	77.78
11/12/2014	182	43.249	76.24

Anexo I. Pesos y resumen de los diferentes materiales

ACRÍLICO								
Día	Fecha	Peso de biopelícula con agua (g)	Peso neto de la biopelícula (g)	g/cm ²	Peso de biopelícula sin agua (g)	Peso neto de la biopelícula (g)	g/cm ²	Peso de agua (g)
1	28/10/2014	7,786	1,931	0,185	6,678	0,822	0,159	1,108
2	31/10/2014	7,82	1,964	0,186	6,970	1,114	0,166	0,850
3	04/11/2014	7,789	1,933	0,185	6,934	1,078	0,165	0,855
4	07/11/2014	7,989	2,133	0,190	7,0345	1,179	0,167	0,954
5	10/11/2014	7,884	2,028	0,188	7,645	1,789	0,182	0,239
6	12/11/2014	7,897	2,041	0,188	7,789	1,933	0,185	0,108
7	14/11/2014	7,976	2,120	0,190	7,798	1,942	0,186	0,178
8	18/11/2014	8,036	2,180	0,191	7,986	2,130	0,190	0,050
9	21/11/2014	8,876	3,020	0,211	8,056	2,200	0,192	0,820
10	24/11/2014	7,987	2,131	0,190	7,678	1,822	0,183	0,309
11	28/11/2014	8,673	2,817	0,207	7,9834	2,128	0,190	0,690
12	01/12/2014	6,678	0,8222	0,159	6,544	0,6882	0,156	0,134
13	05/12/2014	6,7983	0,9425	0,162	6,433	0,5772	0,153	0,3653
14	09/12/2014	7,8975	2,0417	0,188	7,0675	1,2117	0,168	0,83

PLÁSTICO								
Día	Fecha	Peso de biopelícula con agua (g)	Peso neto de la biopelícula (g)	g/cm ²	Peso de biopelícula sin agua (g)	Peso neto de la biopelícula (g)	g/cm ²	Peso de agua (g)
1	28/10/2014	9,599	7,983	0,150	5,340	3,724	0,083	4,259
2	31/10/2014	9,789	8,173	0,153	5,200	3,584	0,081	4,589
3	04/11/2014	10,234	8,618	0,160	7,144	5,528	0,112	3,090
4	07/11/2014	10,876	9,260	0,170	7,201	5,585	0,113	3,675
5	10/11/2014	11,023	9,407	0,172	6,987	5,371	0,109	4,036
6	12/11/2014	11,897	10,281	0,186	6,891	5,275	0,108	5,006
7	14/11/2014	11,667	10,051	0,182	6,989	5,373	0,109	4,678
8	18/11/2014	11,678	10,062	0,182	7,977	6,361	0,125	3,702
9	21/11/2014	11,556	9,940	0,181	8,045	6,429	0,126	3,511
10	24/11/2014	11,655	10,039	0,182	9,973	8,357	0,156	1,682
11	28/11/2014	11,987	10,371	0,187	9,789	8,173	0,153	2,198
12	01/12/2014	8,9763	7,3605	0,140	8,546	6,931	0,134	0,430
13	05/12/2014	9,923	8,3072	0,155	9,246	7,630	0,144	0,678
14	09/12/2014	9,89292	8,27712	0,155	9,566	7,950	0,149	0,327

TELA VERDE								
Día	Fecha	Peso de biopelícula con agua (g)	Diferencia (g)	g/cm ²	Peso de biopelícula sin agua (g)	Diferencia (g)	g/cm ²	Peso de agua (g)
1	28/10/2014	7,868	5,409	0,123	6,678	4,219	0,104	1,190
2	31/10/2014	7,433	4,974	0,116	5,200	2,741	0,081	2,233
3	04/11/2014	7,987	5,528	0,125	7,463	5,004	0,117	0,524
4	07/11/2014	7,675	5,216	0,120	7,442	4,983	0,116	0,233
5	10/11/2014	8,128	5,669	0,127	7,945	5,486	0,124	0,183
6	12/11/2014	8,349	5,890	0,130	7,898	5,439	0,123	0,451
7	14/11/2014	7,998	5,539	0,125	7,675	5,216	0,120	0,323
8	18/11/2014	9,847	7,388	0,154	8,099	5,639	0,127	1,749
9	21/11/2014	11,896	9,437	0,186	10,567	8,108	0,165	1,329
10	24/11/2014	10,998	8,539	0,172	10,546	8,087	0,165	0,452
11	28/11/2014	11,893	9,434	0,186	11,035	8,575	0,172	0,859
12	01/12/2014	8,993	6,534	0,141	8,545	6,086	0,134	0,448
13	05/12/2014	8,821	6,362	0,138	7,893	5,433	0,123	0,929
14	09/12/2014	9,221	6,762	0,144	8,655	6,195	0,135	0,566

GEOTEXTIL								
Día	Fecha	Peso del biopelícula con agua (g)	Diferencia (g)	g/cm ²	Peso de biopelícula sin agua (g)	Diferencia (g)	g/cm ²	Peso del agua (g)
1	28/10/2014	22,87	20,507	0,309	13,77	11,407	0,186	9,1
2	31/10/2014	24,678	22,315	0,333	11,46	9,097	0,155	13,218
3	04/11/2014	24,878	22,515	0,336	14,7899	12,427	0,200	10,0881
4	07/11/2014	23,786	21,423	0,321	14,98	12,617	0,202	8,806
5	10/11/2014	24,768	22,405	0,335	13,976	11,613	0,189	10,792
6	12/11/2014	24,789	22,426	0,335	14,014	11,651	0,189	10,775
7	14/11/2014	24,895	22,532	0,336	14,768	12,405	0,200	10,127
8	18/11/2014	24,769	22,406	0,335	16,065	13,702	0,217	8,704
9	21/11/2014	23,997	21,634	0,324	22,61	20,247	0,306	1,387
10	24/11/2014	24,089	21,726	0,326	21,854	19,491	0,295	2,235
11	28/11/2014	25,987	23,624	0,351	21,985	19,622	0,297	4,002
12	01/12/2014	19,8723	17,5096	0,269	18,389	16,0263	0,249	1,4833
13	05/12/2014	18,7456	16,3829	0,253	16,0354	13,6727	0,217	2,7102
14	09/12/2014	20,8272	18,4645	0,281	18,6353	16,2726	0,252	2,1919

Resumen peso de los diferentes materiales

BIOPÉLÍCULA HÚMEDA				
FECHA	ACRILÍCO	PLÁSTICO	TELA VERDE	GEOTEXTIL
	g/cm²	g/cm²	g/cm²	g/cm²
28/10/2014	0,185	0,1500	0,123	0,309
31/10/2014	0,186	0,1530	0,116	0,333
04/11/2014	0,185	0,1599	0,125	0,336
07/11/2014	0,190	0,1699	0,120	0,321
10/11/2014	0,188	0,1722	0,127	0,335
12/11/2014	0,188	0,1859	0,130	0,335
14/11/2014	0,190	0,1823	0,125	0,336
18/11/2014	0,191	0,1825	0,154	0,335
21/11/2014	0,211	0,1806	0,186	0,324
24/11/2014	0,190	0,1821	0,172	0,326
28/11/2014	0,207	0,1873	0,186	0,351
01/12/2014	0,159	0,1403	0,141	0,269
05/12/2014	0,162	0,1550	0,138	0,253
09/12/2014	0,188	0,1546	0,144	0,281

BIOPÉLÍCULA SECA				
FECHA	ACRILÍCO	PLÁSTICO	TELA VERDE	GEOTEXTIL
	g/cm²	g/cm²	g/cm²	g/cm²
28/10/2014	0,159	0,0834	0,104	0,186
31/10/2014	0,166	0,0813	0,081	0,155
04/11/2014	0,165	0,1116	0,117	0,200
07/11/2014	0,167	0,1125	0,116	0,202
10/11/2014	0,182	0,1092	0,124	0,189
12/11/2014	0,185	0,1077	0,123	0,189
14/11/2014	0,186	0,1092	0,120	0,200
18/11/2014	0,190	0,1246	0,127	0,217
21/11/2014	0,192	0,1257	0,165	0,306
24/11/2014	0,183	0,1558	0,165	0,295
28/11/2014	0,190	0,1530	0,172	0,297
01/12/2014	0,156	0,1335	0,134	0,249
05/12/2014	0,153	0,1445	0,123	0,217
09/12/2014	0,168	0,1495	0,135	0,252

Anexo J. Estudios con biodiscos, enfatizando en el material de construcción del medio de soporte en diferentes tipos de agua residual

			Remociones						Autor	Referencia
Tipo de agua residual	Tamaño	Material de los discos	DQO	DBO	NTK	SST	Coliformes totales y fecales	Fósforo		
Industria papelera	Pequeña Escala	Polipropileno	85.3%	97.5%		88.2 %			(Dautant y López, 1997)	(Pérez, 2010)
Industria papelera	Escala Real	Polipropileno	90.0%	96.0%					(Dautant y López, 1997)	(Pérez, 2010)
Lixiviado	Pequeña Escala	láminas de acetato perforado	70.0%						(Castillo et al., 2007)	(Pérez, 2010)
Lixiviado	Pequeña Escala	lijados							(Álvarez y Suarez, 2006)	(Pérez, 2010)
Lixiviado maduro	Escala Real	Discos de polietileno	16%	86%	85%	0%			(Moghabgab, 1997)	(Pérez, 2010)
Industria cárnica	Pequeña Escala	láminas de plástico corrugado	87.9%						(Behling et al, 2003)	(Pérez, 2010)
Industria petrolera	Pequeña Escala	cloruro de polivinilo corrugado	76.1%						(Behling et al., 2003)	(Pérez, 2010)
Industria de explosivos	Pequeña Escala	discos de polietileno	87.4%	97.8%	30.5 %			25.6%	(Burrows et al., 1986)	(Pérez, 2010)
Lixiviado	Pequeña escala	acrílico	68%	95%	74%	70%		38%	(Perez, 2010)	
Lixiviado	Pequeña escala	acrílico	40%	40%		30%			(Ordoñez y Betancour, 2003)	
AR Industrial		acetato							(Diez y Gómez, 1999)	
ARS con concentraciones salinas		Polipropileno							(Kargi y Dincer, 1999)	(Pérez, 2010)
ARS con Metales pesados	Pequeña escala	poliestireno							(Costley y Wallis, 2000)	
Diferentes tipos	Pequeña escala	Hierro y otros metales hasta antes de 1950							(Bezanilla, 1993)	
AR conserva de alimentos	Pequeña escala	Hojas de acrílico transparente	93,7%	96%					(Nafajpour, 2005)	

			Remociones						Autor	Referencia
	Pequeña escala	Láminas de acrílico							(Singh y Mittal, 2012)	
ARI	Pequeña escala	polimetilmetacr ilato							(Pakshiraj an y Kheria, 2012)	
	Pequeña escala	PVC							(Di Palma y Verdone, 2008)	
	Pequeña escala	policarbonato							(Yamaguc hi, 1999)	
ARS con fenoles	Pequeña escala	Polietileno de alta densidad							(Yucel, 1989)	
	Pequeña escala	Plexiglás							(Datta y Philip, 2014)	
	Pequeña escala	acrílico							(Chavan y Mukherji, 2007)	
	Pequeña escala	Poliuretano							(Malachov a et al, 2013)	
ARS	Pequeña escala	PVC							(Amorim et al, 2013)	
ARS	Pequeña escala	PVC							(Duqe et al, 2011)	
ARS	Pequeña escala	polipropileno							(Nahid et al, 2001)	
ARD	Pequeña escala	Plexiglás							(Sassi et al, 1996)	
Componen tes farmaceuti cos	Pequeña escala	polipropileno							(Vasiliado u et al, 2014)	
ARS	Pequeña escala	Hojas de aluminio perforado							(Sahinkaya y Dilek, 2006)	
ARS	Pequeña escala	Polietileno de alta densidad							(Kubsad, et al, 2004)	

Anexo K. Seguimiento microbiológico y registro fotográfico del sistema RBC

Microscopio de Investigación de transluz. Marca NIKON. Modelo MICROPHOT. Con cámara para microfotografía y contraste diferencial de interferencia y de fase, campo oscuro

Técnica: contraste de fases y campo oscuro - tinción de Gram

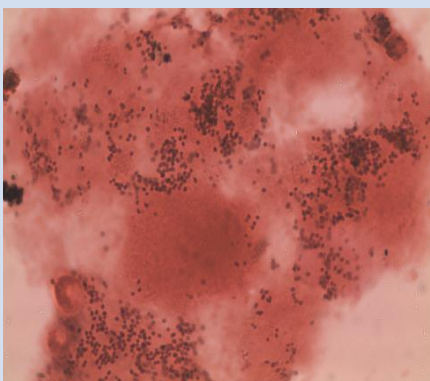


Foto 1.

Observación: bacterias Gram positivas (color purpura) y bacterias Gram negativas (rojo)- parte interna, material: geotextil
Fecha: 11 de noviembre de 2014

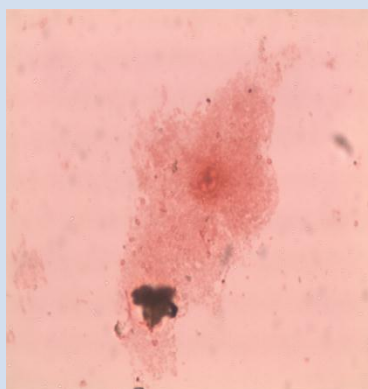


Foto 2.

Observación: bacterias Gram positivas (color purpura) y bacterias Gram negativas (color rojo) predominantes – parte externa geotextil
Fecha: 11 de noviembre de 2014

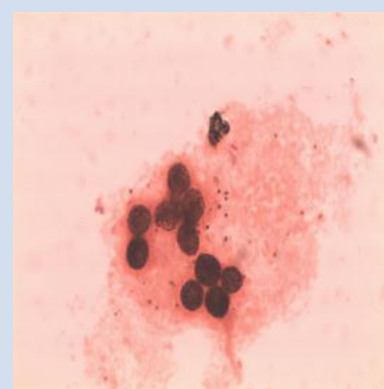


Foto 3.

Observación: bacterias Gram positivas (color purpura) y bacterias Gram negativas (color rojo)- parte central geotextil
Fecha: 11 de noviembre de 2014

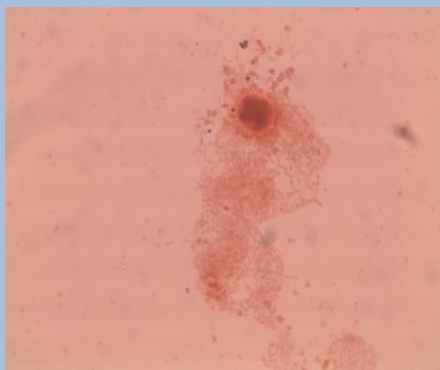


Foto 4.

Observación: bacterias Gram negativas (color rojo) – parte interna, material tela verde
Fecha: 11 de noviembre de 2014

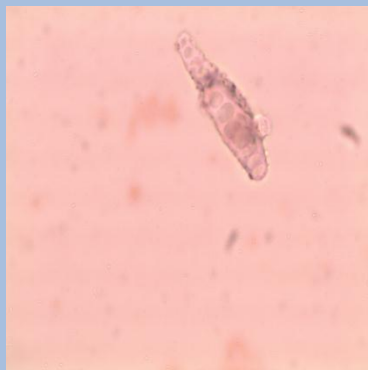


Foto 5.

Observación: Rotífero – parte externa, material tela verde
Fecha: 11 de noviembre de 2014

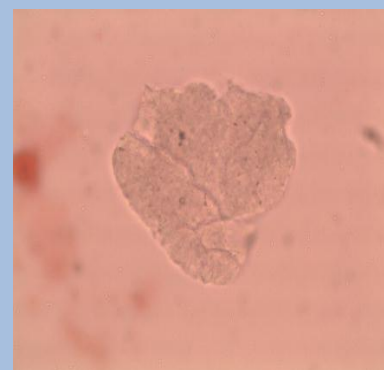


Foto 6.

Observación: parte central, material tela verde
Fecha: 11 de noviembre de 2014

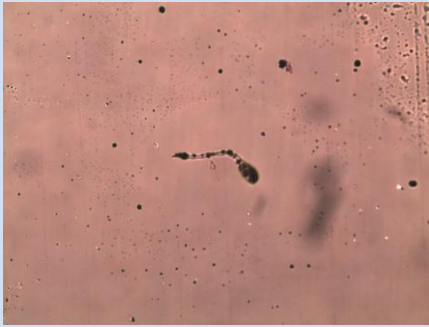


Foto 7.

Observación: Euglena – parte interna, material plástico

Fecha: 11 de noviembre de 2014

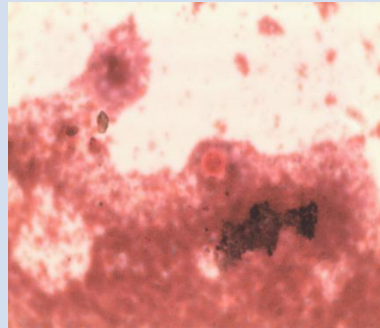


Foto 8.

Observación: Bacterias Gram negativas (color rojo)- parte externa, material plástico

Fecha: 11 de noviembre de 2014

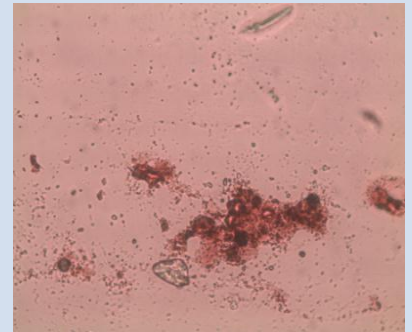


Foto 9.

Observación: bacterias Gram positivas (color purpura) y bacterias- Gram negativas (rojo) parte central, material, plástico

Fecha: 11 de noviembre de 2014

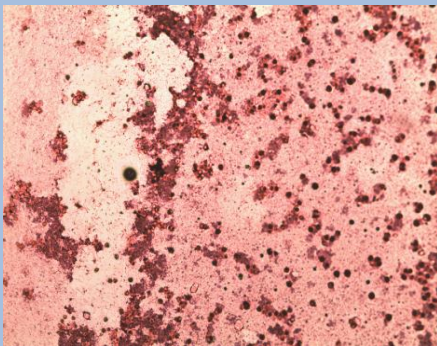


Foto 10.

Observación: bacterias Gram positivas (color purpura) y bacterias Gram negativas (color rojo)- parte interna, material acrílico

Fecha: 11 de noviembre de 2014



Foto 11.

Observación: bacterias Gram positivas (color purpura y bacterias Gram negativas (color rojo) y nematodo, parte externa, material acrílico

Fecha: 11 de noviembre de 2014

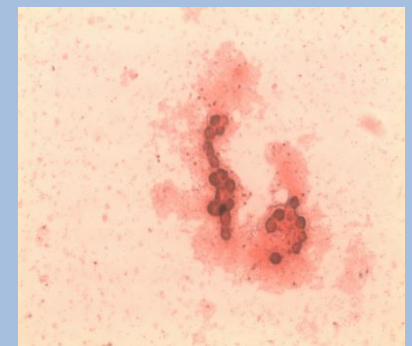


Foto 12.

Observación: bacterias Gram positivas (color purpura) y bacterias Gram negativas (color rojo)- parte central material acrílico

Fecha: 11 de noviembre de 2014

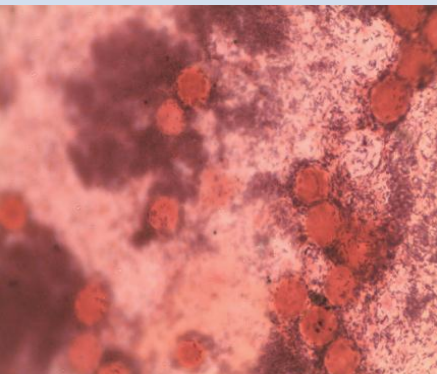


Foto 13

Observación: bacterias Gram positivas (color purpura) y bacterias Gram negativas (color rojo), parte externa, material geotextil

Fecha: 11 de noviembre de 2014

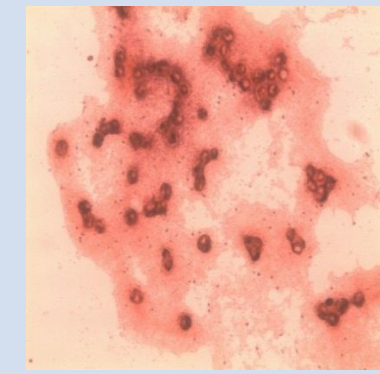


Foto 14.

Observación: bacterias Gram positivas (color purpura) y bacterias Gram negativas (color rojo) – parte externa material tela verde

Fecha: 11 de noviembre de 2014

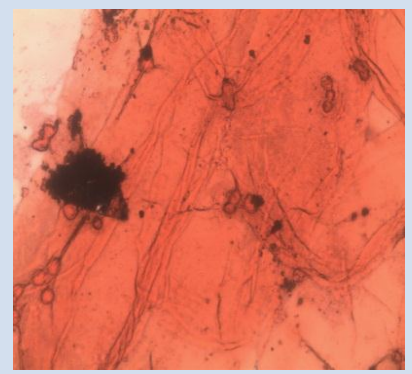


Foto 15.

Observación: bacterias Gram positivas (color purpura) y bacterias Gram negativas (color rojo)- parte externa, material plástico

Fecha: 11 de noviembre de 2014

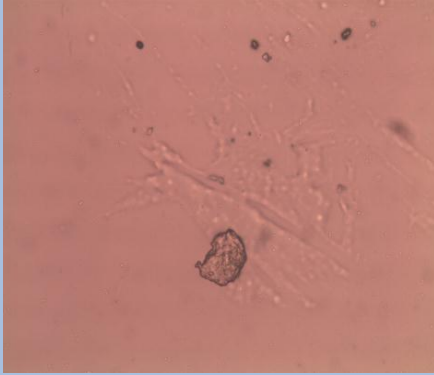


Foto 16.
Observación: bacterias Gram positivas (color púrpura) y bacterias Gram negativas (color rojo) predominantes, parte externa, material acrílico
Fecha: 11 de noviembre de 2014

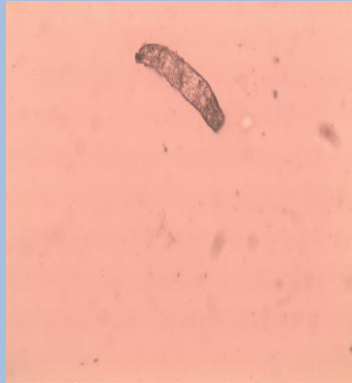


Foto 17.
Observación: bacterias Gram positivas (color púrpura) y bacterias Gram negativas (color rojo) – parte interna, material geotextil
Fecha: 11 de noviembre de 2014

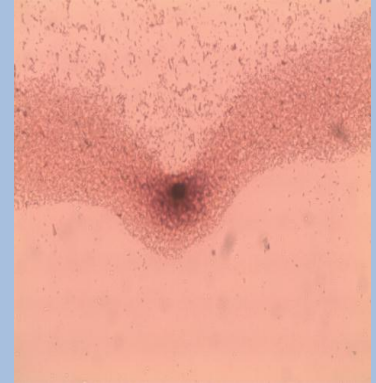


Foto 18.
Observación: bacterias Gram positivas (color púrpura) y bacterias Gram negativas (color rojo) predominantes – parte interna, material tela verde
Fecha: 11 de noviembre de 2014

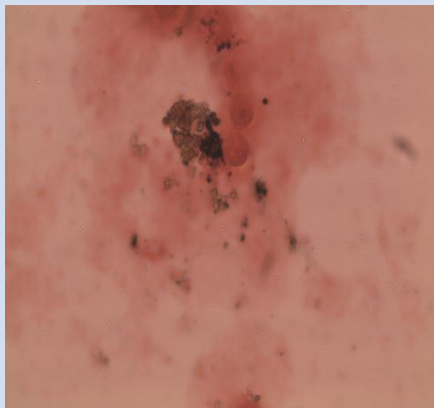


Foto 20.
Observación: bacterias Gram positivas (color púrpura) y bacterias Gram negativas (color rojo) predominantes- parte interna, material plástico
Fecha: 11 de noviembre de 2014

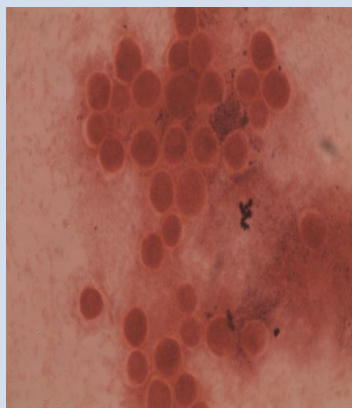


Foto 21.
Observación: bacterias Gram negativas (color púrpura)- parte central material geotextil
Fecha: 11 de noviembre de 2014

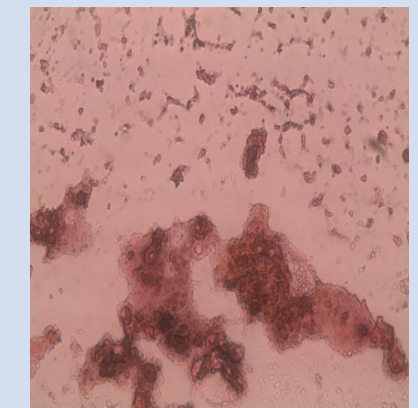


Foto 22.
Observación: bacterias Gram positivas (color púrpura) – parte central, material acrílico
Fecha: 11 de noviembre de 2014



Foto 23.
Observación: Aislamiento, parte interna, material geotextil
Fecha: 7 de noviembre de 2014



Foto 24.
Observación: aislamiento – parte externa material plástico
Fecha: 7 de noviembre de 2014



Foto 25.
Observación: aislamiento – parte central, material tela verde
Fecha: 7 de noviembre de 2014

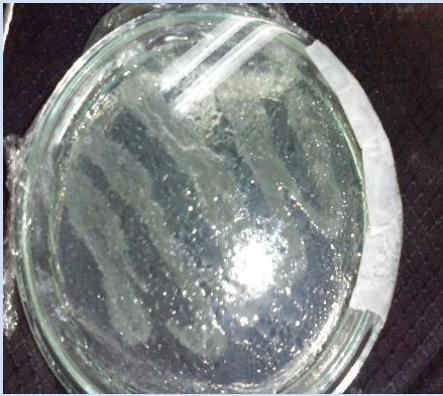


Foto 34.
Observación: aislamiento – parte interna, material acrílico
Fecha: 7 de noviembre de 2014



Foto 35.
Observación: aislamiento- crecimiento difuso – parte central, material tela verde
Fecha: 14 de noviembre 2014



Foto 36.
Observación: aislamiento- crecimiento difuso- parte externa, material plástico
Fecha: 14 de noviembre 2014



Foto 32.
Observación: : Bacterias filamentosas – parte externa, material tela verde
Fecha: 28 de noviembre de 2014

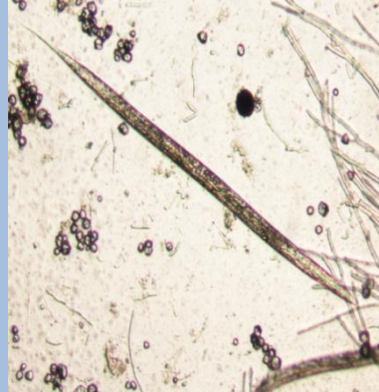


Foto 33.
Observación: Nematodos, relación con bacterias filamentosas parte interna, material plástico
Fecha: 28 de noviembre de 2014

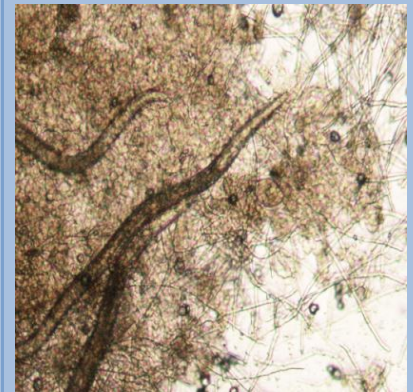


Foto 34.
Observación: Nematodos y Bacterias filamentosas, parte central, material acrílico
Fecha: 28 de noviembre de 2014



Foto 35.
Observación:,Protozoo - ciliados : Euplotes affinis- parte externa, material geotextil
Fecha: 28 de noviembre de 2014

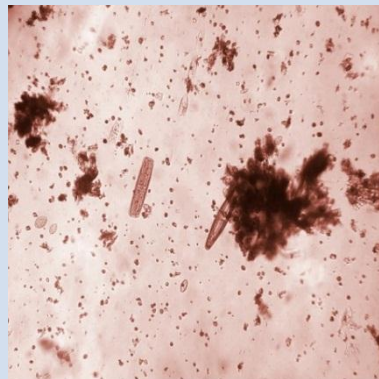


Foto 36.
Observación: Algas unicelulares Diatomeas- parte central, material tela verde
Fecha: 28 de noviembre de 2014

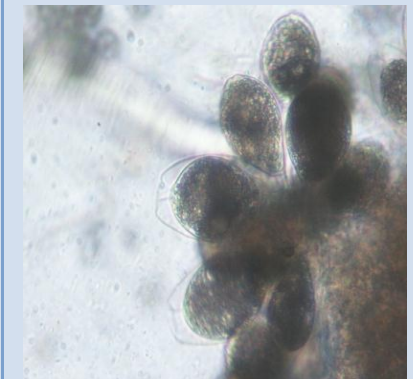


Foto 37.
Observación: Ciliados fijos – parte interna, material tela verde
Fecha: 28 de noviembre de 2014

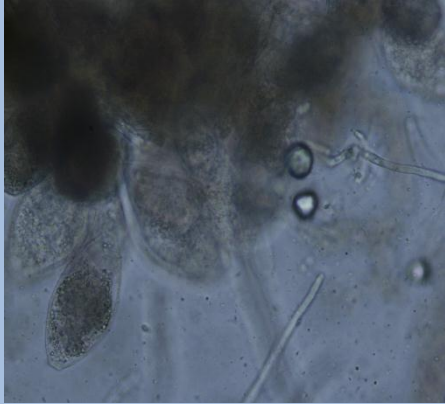


Foto 38.
Observación: Ciliados fijos, parte interna, material acrílico
Fecha: 28 de noviembre de 2014

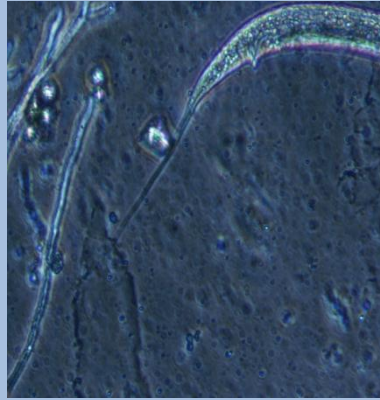


Foto 39.
Observación: nematodo, parte externa, material plástico
Fecha: 28 de diciembre de 2014

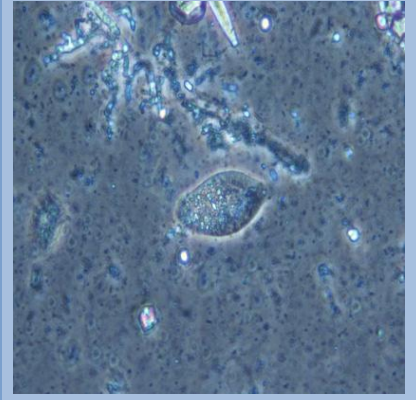


Foto 40.
Observación: Rotifero : Lecane - parte externa, material tela verde
Fecha: 28 de diciembre de 2014

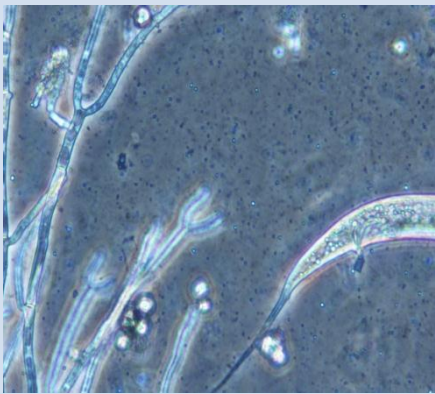


Foto 41.
Observación: Bacterias filamentosas – parte externa, material acrílico
Fecha: 28 de noviembre de 2014



Foto 42.
Observación: Euglena – parte central, material plástico
Fecha: 28 de noviembre de 2014

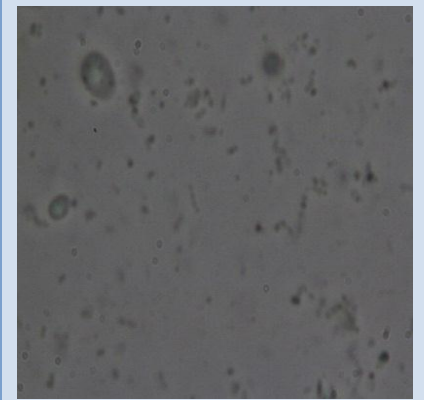


Foto 43.
Observación: espiroquetas, cocos, vibrios y bacilos – parte externa, material geotextil
Fecha: 28 de noviembre de 2014

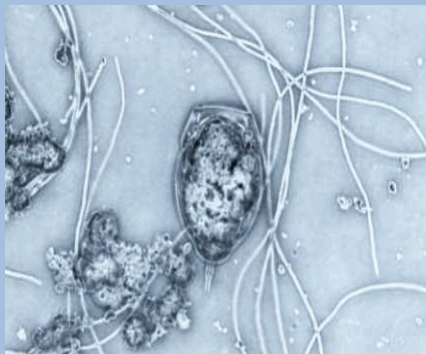


Foto 44.
Observación: Rotifero: Lecane- parte interna, material tela verde
Fecha: 28 de noviembre de 2014



Foto 45.
Observación: Protistos: Paramecios- parte central, material tela verde
Fecha: 28 de noviembre de 2014

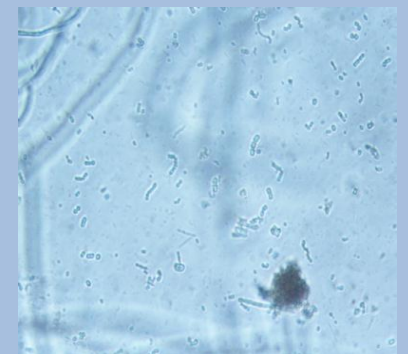


Foto 46.
Observación: Bacterias: espiroquetas – parte interna, material plástico
Fecha: 28 de noviembre de 2014

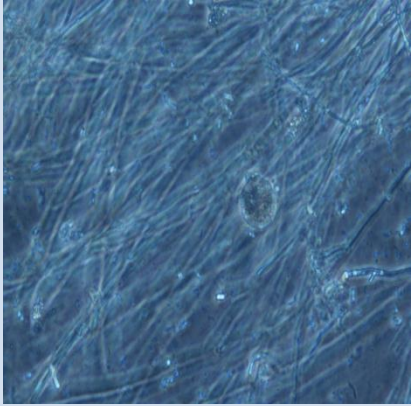


Foto 46.
Observación: Bacterias filamentosas - parte central, material geotextil
Fecha: 11 de diciembre de 2014

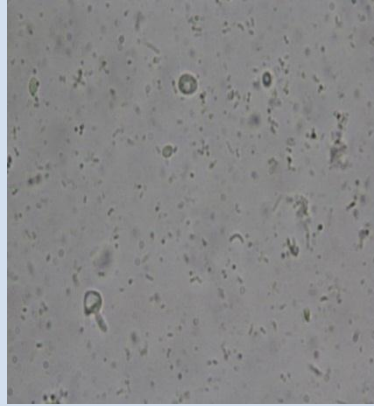


Foto 47.
Observación: Bacterias : cocos, bacilos, espirilos y espiroquetas, parte interna, material tela verde
Fecha: 11 de diciembre de 2014

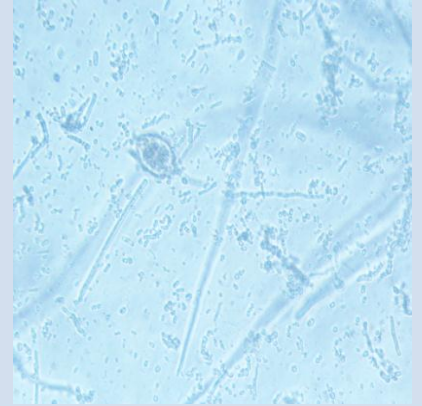
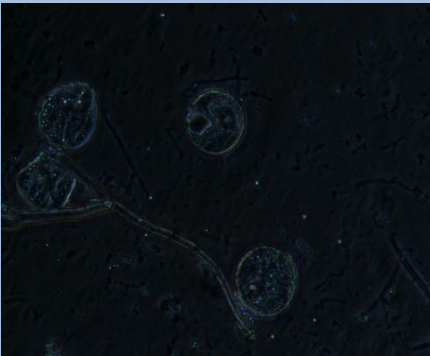


Foto 48.
Observación: Rotifero : Lecane - parte externa material geotextil
Fecha: 11 de diciembre de 2014



ÑGFoto 49.
Observación: Microscopia en campo oscuro- parte interna, material tela verde
Fecha: 11 de diciembre de 2014



Foto 50.
Observación: Protistas: Paramecio – parte externa, material plástico
Fecha: 11 de diciembre de 2014

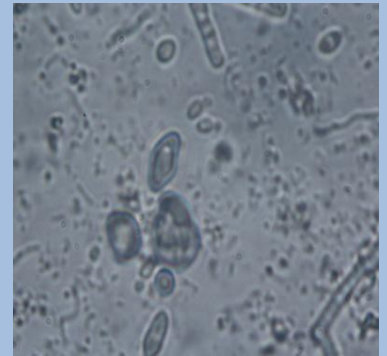


Foto 51.
Observación: Protistos: Paramecios- parte interna, material acrílico
Fecha: 11 de diciembre de 2014



Foto 52.
Observación: Rotifero: Lecane – parte interna, material tela verde
Fecha: 11 de diciembre de 2014



Foto 53.
Observación: Bacterias filamentosas – parte interna material acrílico
Fecha: 11 de diciembre de 2014

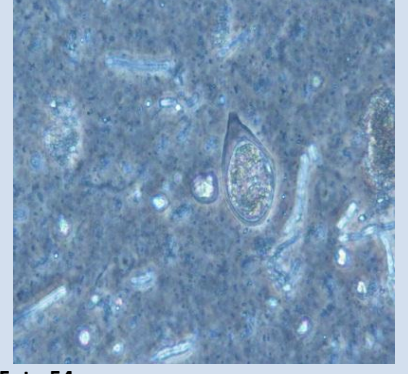


Foto 54.
Observación: Rotifero : Lecane – parte central material tea verde
Fecha: 11 de diciembre de 2014

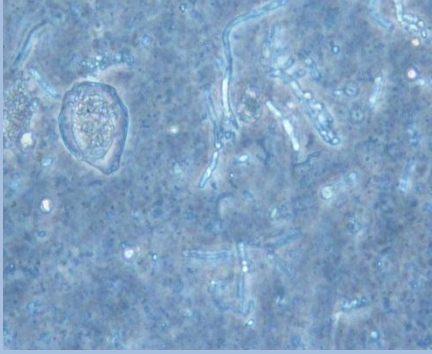


Foto 55.
Observación: Rotífero: Lecane- parte central,
material plástico
Fecha: 11 de diciembre de 2014



Foto 56.
Observación: protozoos :
Cryptosporidium, parte interna,
material geotextil
Fecha: 11 de diciembre de 2014

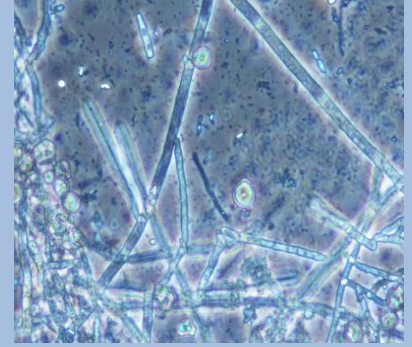


Foto 57.
Observación: Bacterias filamentosas,
parte externa, material acrílico
Fecha: 11 de diciembre de 2014

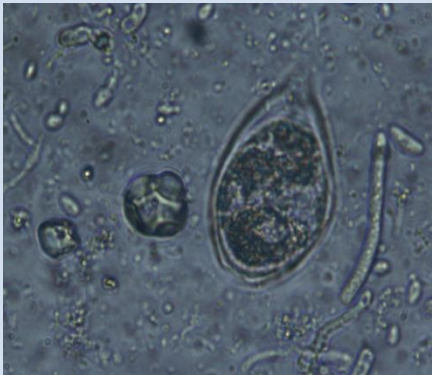


Foto 58.
Observación: Rotífero: Lecane- parte
externa, material tela verde
Fecha: 11 de diciembre de 2014



Foto 59.
Observación: Paramecio 100x – parte
externa, material geotextil
Fecha: 11 de diciembre de 2014

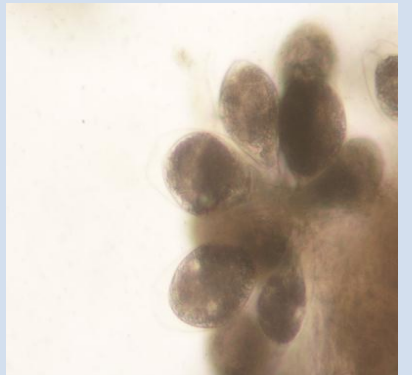


Foto 60.
Observación: Ciliados fijos- parte interna,
material tela verde
Fecha: 11 de diciembre de 2014



Foto 26.
Observación: tinción de Gram
Fecha: 11 de noviembre de 2014

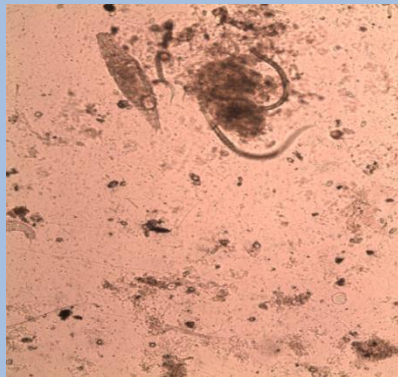


Foto 27.
Observación: Rotíferos y nematodos,
parte central, material geotextil
Fecha: 11 de diciembre de 2014

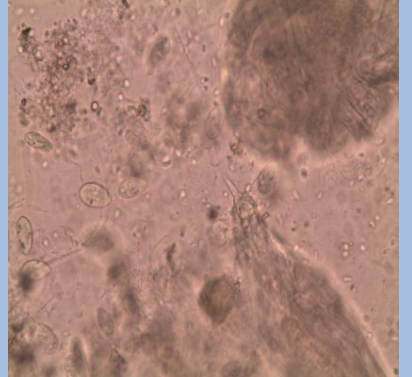


Foto 28.
Observación: Ciliados – parte externa,
material geotextil
Fecha: 11 de diciembre de 2014

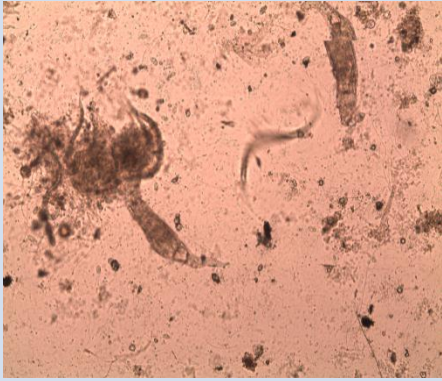


Foto 29.

Observación: Rotíferos- cuerpo extendido, relación con nematodos – material geotextil parte central

Fecha: 11 de diciembre de 2014

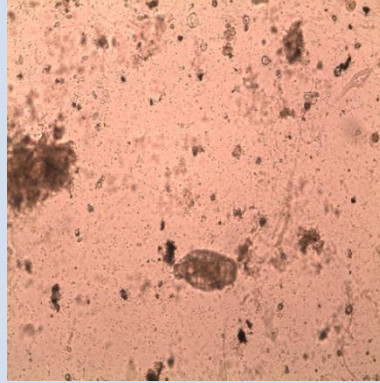


Foto 30.

Observación: Rotífero cuerpo contraído, material geotextil ,parte central

Fecha: 11 de diciembre de 2014

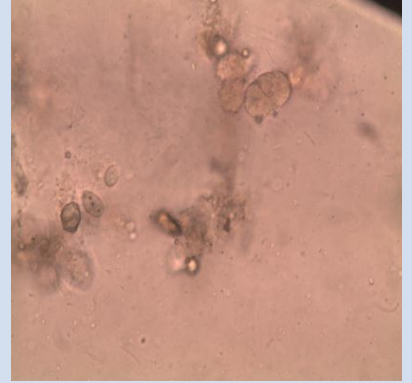


Foto 31.

Observación: Ciliados, parte externa , material plástico

Fecha: 11 de diciembre de 2014