

EVALUACIÓN DE TIEMPOS DE RETENCIÓN Y EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE UN REACTOR DE CONTACTORES BIOLÓGICOS ROTATIVOS CON DISCOS DE GEOTEXTIL PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL SINTÉTICA A ESCALA DE LABORATORIO.



TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TITULO DE INGENIERÍA AMBIENTAL

LAURA YUGUE CRUZ
LUIS ALEJANDRO OSPINA REYES

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

2016

EVALUACIÓN DE TIEMPOS DE RETENCIÓN Y EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE UN REACTOR DE CONTACTORES BIOLÓGICOS ROTATIVOS CON DISCOS DE GEOTEXTIL PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL SINTÉTICA A ESCALA DE LABORATORIO.



LAURA YUGUE CRUZ
LUIS ALEJANDRO OSPINA REYES

Director

MSc. MAURICIO ÁGUIRRE GÓMEZ

Codirector

MSc. NAPOLEON ZAMBRANO

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

2016

Nota de aceptación

Director: _____
MSc. Civil Mauricio Hernán Aguirre Gómez

Jurado: _____
MSc. Mónica Alexandra Luna Imbacuan

Jurado: _____
MSc. Darwin Eliutt Hoyos Martinez

Popayán, 26 de Julios de 2016

DEDICATORIA.

A Dios por iluminar el camino y la senda de mi vida.

A mi familia por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, en toda mi educación, tanto académica, como de la vida, porque a pesar de la distancia siempre me apoyaron, por su incondicional amor, y comprensión brindada a lo largo de este camino. Gracias por los sabios consejos, fuerza, optimismo, que me enseñaron a luchar y a salir adelante durante todos estos años de estudios, esta es otra meta alcanzada con su ayuda.

A ustedes, mi familia les dedico este día, los quiero mucho.

Laura Yugue Cruz

A Dios, por su continua guía en la vida que me ha dado.

A la universidad del Cauca y profesores, por darme los conocimientos necesarios para ser el profesional que soñé desde niño.

A mi familia, por ser siempre ese primer pilar que constituyo mi pensamiento, mi persona y mi comprensión del mundo, a mi Padre por impulsarme desde niño a pensar lógicamente el mundo que me rodea, a mi madre por ser esa persona cariñosa que me apoyó tanto, a mi hermana por cada risa que compartimos en la vida y a mi primo-hermano por esa niñez que compartimos llena de alegrías y tragedias, a todos los mencionados muchas gracias por ser esas personas que están y estarán siempre presentes en lo que hoy soy, muchas gracias por todo el apoyo.

A mis amistades por volver un día frío en uno lleno de color y calor, muchas gracias.

Luis Alejandro Ospina Reyes.

Agradecimientos

Esta tesis está dedicada a la Universidad Del Cauca, por brindarnos las instalaciones para el desarrollo del presente trabajo, a nuestros maestros por su apoyo y motivación para culminación de nuestros estudios profesionales y para la elaboración de este trabajo.

Queremos agradecer a los ingenieros:

Cristina Ledezma, por sus comentarios, continuas asesorías y apoyo incondicional en cada fase de la investigación, así como el apoyo moral brindado.

Javier Ernesto Fernández, por su disponibilidad y acompañamiento continuo durante el desarrollo de este trabajo, por sus comentarios, conocimientos, y sugerencias que enriquecieron el desarrollo de la tesis, además por facilitarnos los equipos de laboratorio que agilizaron el proyecto de investigación.

Hernán Mauricio Aguirre Gómez como director del presente trabajo, por sus valiosos aportes, orientaciones, asesorías, opiniones y correcciones; las cuales permitieron cumplir con cada uno de los objetivos propuestos

Napoléon como co-director, al brindarnos los medios necesarios para la realización de este proyecto.

A la Corporación Regional del Cauca, por su apoyo técnico en las pruebas de laboratorio, en especial a Diego Fernando Zuluaga encargado de agilizar las pruebas de laboratorio

A nuestros familiares, quienes han sido un apoyo incondicional y han contribuido enormemente en la realización del presente trabajo de grado.

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

Laura Yugue Cruz y Luis Alejandro Ospina Reyes

INFORMACIÓN GENERAL DEL PROYECTO.

TÍTULO	EVALUACIÓN DE UN REACTOR DE CONTACTORES BIOLÓGICOS ROTATIVOS CON DISCOS DE GEOTEXTIL PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL SINTÉTICA A ESCALA DE LABORATORIO
ESTUDIANTE	LAURA YUGUE CRUZ LUIS ALEJANDRO OSPINA REYES
DIRECTOR UNIVERSIDAD DEL CAUCA	ING. MAURICIO HERNÁN AGUIRRE
ASESOR	MSC. NAPOLEÓN ZAMBRANO
LUGAR DE EJECUCIÓN	LABORATORIOS DE INGENIERÍA AMBIENTAL DE LA UNIVERSIDAD DEL CAUCA
DURACIÓN DEL PROYECTO	OCHO (8) MESES
FINALIZACIÓN	
TIPO DE PROYECTO	TRABAJO DE INVESTIGACIÓN
FINANCIAMIENTO	UNIVERSIDAD DEL CAUCA, CRC Y ESTUDIANTES.

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN.....	1
2	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
3	JUSTIFICACIÓN	4
4	OBJETIVOS.....	5
4.1	OBJETIVO GENERAL.....	5
4.2	OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	5
5	MARCO REFERENCIAL	6
5.1	FUENTE DE LAS AGUAS RESIDUALES.....	6
5.1.1	Caracterización del agua residual doméstica, ARD.....	6
5.1.2	Mecanismo de depuración biológica de efluentes líquidos	7
5.1.3	Tecnologías empleadas para el tratamiento del ARD.....	7
5.1.3.1	Lodos activados.....	7
5.1.3.2	Filtro percolador	8
5.1.3.3	Humedales construidos.	8
5.1.4	Contactor Biológico Rotacional.....	9
5.1.4.1	Ventajas.....	9
5.1.4.2	Desventajas	9
5.1.4.3	Componentes de un sistema de RBC	10
5.1.4.4	Biopelícula.....	10
5.1.4.5	Tipos De Contactor Biológicos Rotativo.....	11
5.1.4.6	Parámetros operacionales	11
5.1.5	Análisis estadístico	12
5.1.5.1	Diagrama De Cajas	13
5.1.5.2	Prueba t-student para muestras relacionadas.....	13
5.1.5.3	Regresión	14
6	ESTADO DEL ARTE	15
6.1	HISTORIA	15
6.2	ESTUDIOS Y APLICACIONES CON BIODISCOS	16
7	METODOLOGÍA.	19
7.1	UBICACIÓN.....	19
7.2	SISTEMA DE TRATAMIENTO.....	19

7.3	ALIMENTACION-AGUA RESIDUAL SINTETICA.....	20
7.4	OPERACIÓN DEL REACTOR.....	20
7.4.1	Etapa de aclimatación y estabilización.....	20
7.5	SEGUIMIENTO Y CONTROL DEL SISTEMA	21
7.5.1	Punto de muestreo y muestra	22
7.6	ANÁLISIS DE LA MUESTRA.....	22
7.7	EL MUESTREO.....	23
8	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	25
8.1	COMPORTAMIENTO DEL pH EN EL REACTOR DE BIODISCOS	25
8.2	COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA EN EL REACTOR DE BIODISCOS.....	27
8.3	COMPORTAMIENTO DEL OD EN EL REACTOR DE BIODISCOS.....	28
8.4	COMPORTAMIENTO DE LA DBO ₅ Y LA DQO.....	30
8.5	CARGA ORGÁNICA.....	33
8.6	INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS EN LA REMOCIÓN DE MATERÁ ORGÁNICA 33	
8.7	EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE DBO	35
8.8	RESULTADOS PRUEBA T-STUDENT.....	36
8.9	ANÁLISIS DE CURVA DE REGRESIÓN DE PORCENTAJE DE REMOCIÓN VERSUS TRH	37
8.10	TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICO	39
9	CONCLUSIONES.....	40
10	RECOMENDACIONES.....	42
11	BIBLIOGRAFIA.....	44
	ANEXO A. NOTACIÓN Y SÍMBOLOS	48
	ANEXO B. EXPRESIONES USADAS.....	49
	ANEXO C. METODOLOGÍA EMPLEADA PARA LA DBO ₅	50
	ANEXO D. RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	51
	ANEXO E. RESULTADOS ESTADÍSTICOS CON EL PROGRAMA SPSS	54
	ANEXO F. FASE DE ACLIMATACIÓN Y OPERACIÓN DEL RBC.	58

Lista de Tablas

Tabla 1 Características típicas del agua residual	6
Tabla 2 Composición del agua residual sintética.....	20
Tabla 3 Carga Hidráulica y Orgánica	22
Tabla 4 Número de pruebas tomadas	22
Tabla 5 Tiempos de retención Hidráulico usados.....	23
Tabla 6 Volumen de agua residual empleado en la muestra de DBO ₅	24
Tabla 7 Parámetros analizados, unidades y métodos	24
Tabla 8 Resultados prueba de normalidad	37
Tabla 9 Resumen de datos, para la prueba T de muestras relacionadas	37
Tabla 10 Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros.....	37
Tabla 11 Variación de los parámetros en el RBC para cada TRH.....	51
Tabla 12 Eficiencia de remoción de DBO ₅	52
Tabla 13 Comportamiento de la DQO en el RBC para cada TRH	52
Tabla 14 Comportamiento de la CH y CO.....	53
Tabla 15 Estadísticos de control fisicoquímicos Afluente.....	54
Tabla 16 Estadísticos de control fisicoquímicos TRH 6.....	54
Tabla 17 Estadísticos de control fisicoquímicos TRH 12.....	54
Tabla 18 Estadísticos de control fisicoquímicos TRH 18.....	55
Tabla 19 Estadísticos de control fisicoquímicos TRH 24.....	55
Tabla 20 Estadísticos para MO TRH 6.....	55
Tabla 21 Estadísticos para MO TRH 12.....	56
Tabla 22 Estadísticos para MO TRH 18.....	56
Tabla 23 Estadísticos para MO TRH 24.....	56
Tabla 24 Estadísticos para CO	57

Lista de Gráficas

Gráfica 1 Comportamiento del pH.....	26
Gráfica 2 Comportamiento de la Temperatura.....	28
Gráfica 3 Comportamiento del OD.....	30
Gráfica 4 Concentración de la MO en términos de DBO el efluente del RBC.....	31
Gráfica 5 Comportamiento de la CO con respecto a le remoción de DBO.....	32
Gráfica 6 Remoción de la DBO.....	35
Gráfica 7 Regresión de la DBO.....	38

Lista De Figuras

Figura 1 Esquema de un reactor de Contactores Biológicos Rotativos	10
Figura 2 Representación de una gráfica de cajas y bigotes	13
Figura 3 Contactor Biológico Rotatorio.....	19
Figura 4 Montaje del RBC	21
Figura 6 Puesta en marcha del reactor.	58
Figura 7 Etapa de Latencia de la Biopelícula	59
Figura 8 Etapa de crecimiento Exponencial de la Biopelícula	60
Figura 9 Etapa de desarrollo y estabilización de la Biopelícula.....	60

1 INTRODUCCIÓN

El agua es un factor clave para el desarrollo de la infraestructura de un país, esto de alguna manera permitirá el desarrollo de la economía y del sector social, lo cual conlleva a disminuir los índices de pobreza de la región. En América Latina, AL, se plantea que en el 2010, se alcanzaba una población de 153 millones de habitantes y para el 2030 la población superará los 600 millones, el consumo de agua aumentará y por ende la producción de aguas residuales, AR, situación que obliga a aumentar las coberturas de servicios en el sector de agua potable y AR. Otra perspectiva útil para visualizar el entorno, es que en la región mencionada, en los últimos 50 años, ha aumentado la cobertura de agua potable y saneamiento de un 40% en 1950 a un 80% en el 2008, sin embargo, el tratamiento de AR en AL deja mucho que pensar pues solo alcanza un 30% en toda América Latina (CAF, 2011).

En Colombia y en AL, en las últimas décadas, se han obtenido importantes avances en la cobertura del sector de agua potable, tratamiento de AR y disposición de residuos sólidos, sin embargo, intentos de planificación y ordenación del recurso hídrico por parte de las autoridades ambientales, y en buena parte a la nueva reglamentación para el control de vertimientos bajo el enfoque de gestión integral del recurso hídrico, GIRH, resulta esencial implementar estrategias de regulación y control de contaminación hídrica orientadas al mejoramiento de la calidad del agua.

Según los datos de la superintendencia de servicios públicos domiciliarios, SSPD, en Colombia se tiene información de 545 municipios con sus sistemas de tratamiento de AR, STAR, (49.73% de los municipios del País), solo 480 municipios poseen STAR, no obstante 83 se encuentran fuera de servicio, 13 se encuentran en fase de construcción. De la totalidad de los STAR sólo el 17.3% están diseñados para realizar tratamiento preliminar y primario tratando el 43.2% de AR, mientras que el 82.7% abarcan hasta tratamiento secundario (SSPD, 2012).

En lo que se refiere a tipos de tecnologías de tratamiento de AR, las más usadas en países de AL como Brasil, Chile, Colombia, Guatemala, México y República Dominicana son: lagunas de estabilización 38%, lodos activados 26% y reactores UASB 17%. Actualmente las tecnologías aerobias como el reactor de contactores biológicos rotatorios (RBC, Rotating Biological Contactors), han empezado a emplearse como una alternativa que brinda resultados exitosos por sus eficiencias en remoción de cargas de DBO, bajos costos en energía, mínimos requerimientos de área para su construcción, facilidad de operación y mantenimiento, entre otros.

Los RBC constan de un material corrugado de plástico usualmente polipropileno, en el cual se forma un biopelícula, la cual está en continuo contacto con el aire, permitiendo la formación de bacterias de tipo aeróbicas. En el diseño de plantas con biodiscos, se prefiere usar como parámetro de diseño la carga hidráulica superficial, sin embargo, para aplicar cualquier método que utilice este parámetro, es necesario

determinar coeficientes cinéticos que difieren según el autor o modelo cinético utilizado y de la cual se tiene limitada información. En este trabajo se evaluó el tiempo de retención hidráulico, TRH, y la eficiencia de remoción de un RBC, el cual usa como material corrugado geotextil, con el fin de brindar una nueva herramienta para el diseño, además de posibilitar la disminución de costos para el tratamiento de aguas residuales, empleando la tecnología de RBC.

2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En Colombia se analizaron las principales cuencas del país en cuanto a caudales de AR vertidos, estas fueron Río Bogotá, Río Cauca, Río Medellín, Río Chinchiná, Río Otún, Río Fonce y Río Fuquene, dando como resultados 19.440 L/s, 11.800 L/s, 7.260 L/s, 998 L/s, 1353 L/s, 114 L/s, 256 L/s de AR vertidos a cada río respectivamente, de estos caudales, solo se tratan 34.1%, 57.9%, 18.0%, 0.0%, 0.0%, 13.9% y 20.1% respectivamente (SSPD, 2012).

Estas cifras de caudales evidencian el crecimiento y la inadecuada disposición de las AR, originadas sobre todo en el sector municipal llegando en muchos casos a sobrepasar la capacidad de autodepuración natural que tienen las corrientes superficiales, conllevando al deterioro y gradual desmejoramiento de la calidad del agua de los cuerpos receptores, limitando el uso potencial aguas abajo de las descargas y generando problemas de contaminación hídrica y de salud pública.

Al observar este panorama, se podría pensar que falta iniciativa política para controlar la calidad de estos vertidos. Sin embargo, en Colombia se han expedido gran cantidad de normas para el control de contaminación hídrica y la gestión integral de recursos hídricos, GIRH, pero no todas estas normas se han cumplido, en especial las que se refieren al tratamiento de AR, dado la falta de metodologías específicas, el desarrollo de procesos de concertación durante su formulación, la falta de programas de seguimiento en los proyectos de STAR, bajos recursos destinados para el control y la falta de tecnologías de bajo costo que esté dispuesta a pagar la comunidad para tratar sus AR (MINISTERIO DE AMBIENTE, 2004).

Los biodiscos RBC recientemente han cobrado importancia como alternativa de tratamiento de AR en LA, ya que es un proceso aeróbico con bajo requerimiento de energía, pero tiene limitada aplicación en nuestro medio, dado a las limitadas metodologías de diseño.

3 JUSTIFICACIÓN

Aunque se disponga de recursos para la gestión ambiental y el control de vertimientos, es necesario invertir y desarrollar en nuevas tecnologías para el tratamiento de AR. Últimamente la tecnología de RBC logra eficiencias de materia orgánica, similares a la de lodos activados, filtros percoladores; los biodiscos cuentan con una ventaja que consiste en los bajos consumos de energía para el proceso, haciéndolos más costo efectivos frente a procesos convencionales.

Por otra parte, la ventaja frente a reactores anaerobios, radica en que los procesos aeróbicos de los RBC brindan una mejor calidad del efluente, además de no generar olores, el cual es característico en sistemas de lagunas anaerobias.

La utilización de los RBC ofrece un número significativo de ventajas sobre otros sistemas de tratamiento secundario, entre otras: originan efluentes de buena calidad, bajos costos (Griffin & Findlay, 2000), además es accesible en el tratamiento de AR, debido a su facilidad de operación, mantenimiento (Douglas B. Spengel, 1991), y podrá tener una amplia aplicabilidad en pequeñas y medianas poblaciones.

Originalmente los biodiscos fueron construidos con materiales como madera o hierro, que dificultaron su utilización por el peso y duración de estos materiales. Actualmente se utilizan discos de material corrugado como polipropileno, pero estos son importados y de alto costo, restringiendo la utilización de esta tecnología.

Recientemente en la Universidad Del Cauca, Facultad De Ingeniería Civil, departamento de Ingeniería ambiental y sanitaria, se ha venido evaluando esta tecnología, el geotextil como material alternativo de bajos costos para ser empleado como lecho de soporte en el RBC (Molina & Montenegro, 2015), Compararon el geotextil frente a otros materiales no convencionales, observando que el geotextil permitió mayor fijación del lecho bacteriano, facilitando la formación y adherencia de biomasa, con lo cual se dispone de mayor área específica y volumen de microorganismos, haciendo más eficiente este tipo de reactores, por otro lado, (Erazo & Gomez, 2015), evaluaron las eficiencias de remoción de N y P en el geotextil como medio de soporte.

Partiendo de los anteriores estudios y con el fin de brindar una alternativa de diseño más económica y diferente a los métodos basados en carga hidráulica, se evaluó el desempeño del geotextil en los biodiscos, en términos de tiempo de retención hidráulica, TRH, y eficiencia de remoción de MO, las variables evaluadas permiten corroborar el óptimo funcionamiento del geotextil como medio de soporte del RBC.

4 OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

- Evaluar a escala de laboratorio las eficiencias de remoción de cargas contaminantes para cada tiempo de retención hidráulico, utilizando geotextil como material de los RBC.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Determinar el tiempo de retención hidráulico óptimo en el RBC para remoción de materia orgánica haciendo seguimiento a los parámetros de DBO y DQO.
- Evaluar el efecto de la carga orgánica sobre el comportamiento del reactor para cada tiempo de retención hidráulico.
- Ajustar mediante un análisis de regresión, una curva que represente la variación de las eficiencias de remoción de DBO en un RBC con geotextil.

5 MARCO REFERENCIAL

5.1 FUENTE DE LAS AGUAS RESIDUALES

Las AR son las aguas servidas y los sólidos que por uno u otro medio se introducen en las cloacas y son transportados mediante el sistema de alcantarillado hasta en un cuerpo receptor. Los efluentes líquidos se pueden clasificar de diversas formas, sin embargo lo clásico es hacerlo de acuerdo a su procedencia.

En general, se consideran *aguas residuales domésticas*, ARD, los líquidos provenientes de las viviendas o residencias, edificios comerciales e institucionales. Se denominan *aguas residuales municipales* los residuos líquidos transportados por el alcantarillado de una ciudad o población y tratados en una planta de tratamiento municipal, y se llaman *aguas residuales industriales* las aguas residuales provenientes de las descargas de industria de manufactura (Romero, 2008).

Una de las prácticas más comunes de disposición final de las AR ha sido la disposición directa sin tratamiento en los cuerpos de agua superficiales.

5.1.1 Caracterización del agua residual doméstica, ARD.

En la **Tabla 1** se muestran los parámetros más comunes que se miden a un ARD y su correspondiente clasificación, sin considerar el tamaño de población, además de pH, temperatura (T) y oxígeno disuelto (OD), que se midieron in situ.

Tabla 1 Características típicas del agua residual

PARÁMETRO	CONCENTRACIÓN mg/L		
	DEBIL	MEDIA	FUERTE
Sólidos Totales	350	720	1200
Disueltos Totales	250	500	850
Sólidos en suspensión	100	220	350
Sólidos sedimentables	5	10	20
DBO ₅	100	200	300
DQO	250	500	1000
Nitrógeno Total (NT)	20	40	85
Orgánico	8	15	35
Nitritos	0	0	0
Nitratos	0	0	0
Fósforo Total (PT)	4	8	15
Orgánico	1	3	5
Inorgánico	3	5	10
Oxígeno Disuelto	0,2	0,1	0

Fuente: Adaptado de Metcalf & Eddy (2004)

5.1.2 Mecanismo de depuración biológica de efluentes líquidos

Los tratamientos biológicos para la depuración de las AR se basan en la utilización de microorganismos capaces de asimilar las sustancias en suspensión o disueltas presentes en el AR, cuando las AR ingresan en una planta de tratamiento, se les somete a un pretratamiento en el que se retiran los sólidos gruesos de gran tamaño, así como las arenas y grasas.

Luego está, pasa al tratamiento primario, donde se eliminan sólidos en suspensión fácilmente sedimentables y parcialmente materia orgánica, MO, después la MO que queda disuelta y en suspensión es eliminada en el tratamiento secundario y finalmente es opcional, el tratamiento terciario para pulir el efluente.

El objetivo primordial del tratamiento de las ARD es producir un efluente que pueda ser descargado sin causar impactos negativos al medio receptor; los tratamientos biológicos aerobios son una muy buena opción para el tratamiento de estas aguas, dada su baja concentración orgánica. Entre estos procesos se tiene la tecnología de Contactor Biológico Rotacional. En estos sistemas se emplea la producción natural de una biopelícula para la degradación aeróbica del AR, la cual crece como medio adherido a la superficie de los discos (Navarro, Albertario, & Palladino, 2005)

5.1.3 Tecnologías empleadas para el tratamiento del ARD.

El objetivo de un tratamiento secundario es remover la DBO soluble que escapa de un tratamiento primario, además de remover cantidades adicionales de Sólidos Suspendidos. Estas remociones se efectúan fundamentalmente por medio de procesos biológicos; algunos de estos son: procesos de lodos activados, filtros percoladores, humedales construidos (pueden ser usados como tratamiento terciario para pulir el efluente) y biodiscos.

5.1.3.1 Lodos activados.

Es un sistema de mezcla completa, el cual consigue un ambiente aerobio por medio de unos aireadores mecánicos; los lodos activados cuenta con una variedad bacteriana en suspensión, este tratamiento de AR necesita recircular el flujo para garantizar una población bacteriana adecuada para la oxidación de la MO (Eduardo & López, 2008).

Las PTARs municipales como el salitre en Bogotá, Cañaveralejo en Cali y San Fernando en Medellín, fueron diseñadas y construidas con tecnologías de lodos activados, la PTAR de Popayán se proyectó con la tecnología de lodos activados, específicamente con zanjones de oxidación.

La PTAR de la ciudad Chelghoum Aïd en Argelia, trata ARD, AR de hospitales y AR industrial con la ayuda de un tratamiento biológico de lodos activados logrando remoción de DQO y DBO₅ de 98.41% y 94.35% respectivamente, en cuanto al comportamiento del pH observaron que el afluente como efluente de la PTAR presentó un comportamiento buffer (Ghizellaoui & Ghizellaoui, 2010).

Singh & Kazmi, (2016) reportan un estudio con un reactor de lodos activados de biopelícula fija (IFAS), el sistema fue alimentado con AR municipal, el TRH fue de 6,9 horas, obteniendo resultados de remoción de MO representada como DQO y DBO₅ del orden de 92% y 91%.

Los TR entendidos como periodos de aireación en sistemas de lodos activados están variando entre 4-8 horas para sistemas convencionales, y 18 a 36 horas para aireación oxidativa.

5.1.3.2 Filtro percolador

El filtro percolador moderno consiste en un lecho formado por un medio filtrante al que se adhieren los microorganismos, y a través del cual percola el AR, fenómeno por el cual recibe este nombre el proceso. El medio filtrante suele estar formado por piedras (diámetro 2,5 - 10 cm), o diferentes materiales de relleno. La profundidad del lecho varía en cada diseño entre 0,9 y 2,5 m, con una profundidad media de 1,8 m. Los de medio filtrante de piedra suelen ser circulares y los de material plástico tienen variedad de formas y con profundidades entre 4 y 12 m. Estos se clasifican en función de la CO en filtros de baja carga, filtros de media y alta carga, filtros de muy alta carga, filtros de desbaste, y filtros de dos etapas (Becerra, 2001).

En los sistemas con Filtros Percoladores, no se reportaron tiempos de retención hidráulica, si no velocidad de aplicación o cargas hidráulicas de baja, intermedia o alta tasa. Para proceso estándar, pueden variar entre 1-4 m³/m²/d, 4-9 m³/m²/d, 9-37 m³/m²/d.

5.1.3.3 Humedales construidos.

Son sistemas que tratan el AR por medio de fitodepuración, en los humedales, las raíces de las plantas se aferran a un medio de grava; la depuración se hace circulando el AR lentamente en el medio de grava, lográndose una serie de interacciones físicas, químicas y biológicas que mejoran la calidad del efluente (Delgadillo, Camacho, & Serie, 2010).

Fountoulakis et al., (2009) evaluaron el comportamiento de dos tipos de humedales para tratar AR de las ciudades de Heraklion, Creta y, Grecia el primero de flujo superficial, el segundo de flujo subsuperficial horizontal, logrando una remoción de DQO de 33,4% y 62,0% respectivamente. Para los humedales de flujo superficial se requieren TR entre 3-4 días para remoción de N.

Los humedales construidos también se estudiaron para tratar el AR del norte del Cairo-Egipto, el humedal era de flujo vertical con un área total de 457.6 m², esta unidad operó con un TRH de 7,7 días, la cual tuvo como eficiencia en términos de DBO₅ y DQO un 90% y 88% (Abou-Elela & Hellal, 2012).

5.1.4 Contactor Biológico Rotacional

El RBC, también denominado biodisco, es un sistema de tratamiento biológico secundario, para ARD e industriales biodegradables (Romero, 2008).

Los microorganismos responsables del tratamiento se adhieren a los discos, los cuales giran permitiendo el contacto de biomasa con el sustrato y el oxígeno, este último se necesita para la conversión de la MO y es provisto por la rotación continua del disco, una vez que la biocapa o biopelícula queda fuera del efluente, ésta se encuentra en contacto con el aire, propiciando la transferencia de oxígeno y manteniendo a la biomasa bajo condiciones aerobias (Crites y Tchobanoglous, 2000), la capa de microorganismos (biopelícula) adsorbe el oxígeno necesario del mismo para metabolizar la materia carbonácea y nitrogenada a través del biofilm (Agua, 2015)

El Color de la biopelícula en las etapas iniciales de un Biodisco, utilizado en el tratamiento de efluentes domésticos, es generalmente grisáceo o gris amarronado y filamentoso, mientras que en etapas posteriores es amarronado o rojizo amarronado, gelatinoso y menos filamentoso (Alleman, 1982)

Entre los principales factores que influyen sobre el proceso se mencionan:

- Características del agua residual.
- Carga hidráulica CH.
- Carga orgánica CO.
- Velocidad rotacional de los discos.
- Profundidad de sumergencia
- Tiempo de retención hidráulico TRH.
- Temperatura del agua residual.

5.1.4.1 Ventajas

Entre las ventajas de los biodiscos están las siguientes (Romero, 2008):

- Alta eficiencia de remoción de carbono y nitrógeno
- Simplicidad.
- Confiabilidad (con pre-tratamiento apropiado, generalmente sedimentación), resistencia a cargas choque y tóxicas.
- Tiempos de retención cortos.
- Poco consumo energético, bajos costos de operación y mantenimiento.
- Lodos de buena sedimentabilidad.
- Generalmente no hay recirculación de efluente ni de lodos.
- Construcción modular.

5.1.4.2 Desventajas

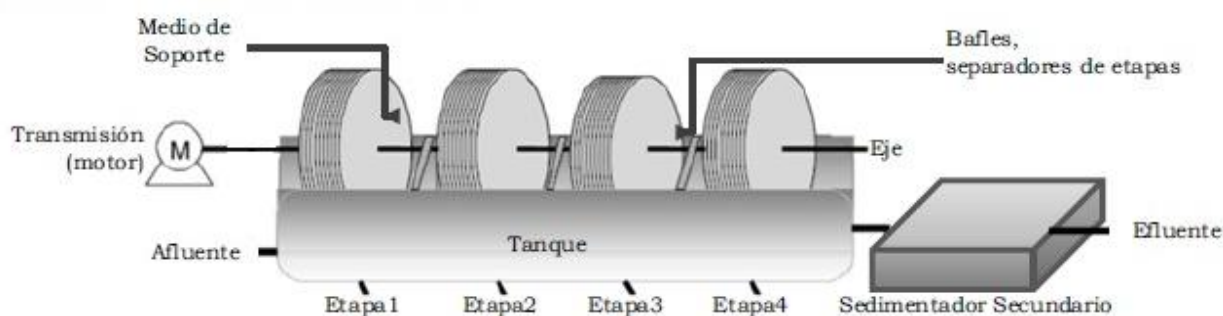
Entre las desventajas se puede señalar:

- Fallas en los discos, los ejes y los motores (daños mecánicos).
- Fugas de lubricantes.
- Criterio de diseño muy disímiles aún.
- Carga

5.1.4.3 Componentes de un sistema de RBC

Las principales unidades del reactor RBC son: los discos, el eje, la transmisión, el tanque, cerramientos y el tanque de sedimentación (Tchobanoglous, Burton, & Stensel, 2003). En la **Figura 1** se presenta el esquema de un RBC.

Figura 1 Esquema de un reactor de Contactores Biológicos Rotativos



Fuente: (Aristizábal, 2010)

5.1.4.4 Biopelícula

Se encuentra compuesta por 2 fases, una fase de base, en la cual, hay una concentración de microorganismos adheridos al medio, la segunda fase, es la superficial, cuya función es servir de transición entre la base y el medio acuoso, lográndose por medio de exopolisacáridos segregados por las bacterias, dichas estructuras son canales intersticiales, que ayudan a la circulación de nutrientes (Beatriz, Alejandra, & Alberto, 2004).

La formación de la biopelícula se da en tres etapas, la primera es la fijación de los microorganismos a la superficie del disco, en la segunda las bacterias adheridas comienzan a segregar material celular (exopolisacáridos) para ayudar al anclaje de nuevas células, que termina con la tercera etapa, la cual es la colonización microbiológica de las bacterias en el medio.

La biopelícula al desarrollarse, aumenta el espesor de las diferentes capas, y provoca que la base de la biopelícula se comporte anaeróbicamente, dado a que el OD en el medio acuoso no alcanza a penetrar. Al continuar el crecimiento en la fase superficial, genera el desprendimiento de la biopelícula ocasionado por la velocidad de giro y el esfuerzo cortante con el agua (Aristizábal, 2010).

Las comunidades microbiológicas identificadas en los RBC son bacilos, cocoides, espirilos, vibrios, filamentosas, hongos y algunos protozoos (Mata, 2012);

cabe resaltar que las especies de microorganismos varían en función del AR o del inóculo y de la alimentación que tenga el reactor, como también de la etapa en la que se encuentre presente en los RBC, más específicamente, en la primera etapa se tiene la presencia de bacterias filamentosas; en la segunda etapa protozoos y metazoos; la tercera etapa se encuentran nematodos, bacterias filamentosas, paramecios, ciliados reptantes, protozoos y metazoos; en la cuarta etapa se encuentra la misma población bacteriana de la tercera etapa, pero con rotíferos y ácaros (Aristizábal, 2010).

5.1.4.5 Tipos De Contactador Biológicos Rotativo

Hay dos tipos de RBC, el Integral y el modular. El integral consiste en una unidad que combina el tratamiento primario y secundario, es decir cuenta con una zona de sedimentación primaria y un biofilm en los discos del RBC, alterno a ello en la misma unidad hay un clarificador secundario que tiene como objetivo remover los sólidos producidos por el desprendimiento de la biopelícula; el Modular cuenta con todas las operaciones por separado, clarificador primario, RBC, clarificador secundario y tratamiento de sólidos, esto permite procesos más flexibles, pero el peso y el tamaño limitan el diámetro de los discos a 3.5m. El RBC integral es para una población equivalente, PE, menor de 200, por otro lado la PE del RBC modular es para más de 1000 (Hassard et al., 2015).

5.1.4.6 Parámetros operacionales

Para evaluar la eficiencia se deben tener en cuenta los siguientes parámetros:

- La Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), es un parámetro empleado para medir la calidad del agua, con este, se determina la cantidad de oxígeno requerido para degradar biológicamente la MO presente en el agua (Romero, 2008).

El método empleado para medir la DBO fue de tipo respirométrico volumétrico, el cual mide el consumo de oxígeno en cambios incrementales de volumen mientras se mantiene una presión constante en el tiempo de lectura.

Los limitantes para esta prueba son:

- Formación de gases diferentes al CO_2 afectan la presión en el medio, lo cual lleva a una lectura equívoca del equipo, estos se puede resolver agregando concentraciones de absorbentes alcalinos, que ayudan a mantener el CO_2 como gas principal del medio.
- Variaciones en la composición de residuos, concentración de sustratos, mezcla y concentraciones de oxígeno de una fuente de AR a otra, esto lleva a que no se pueda hacer una relación lineal entre el consumo de oxígeno y la DBO_5 a 20°C .

- La Demanda Química de oxígeno (DQO) es un parámetro que indica la concentración de MO en AR, es obtenido después unas tres horas de laboratorio (Romero, 2008). El valor de la DQO es siempre superior al de la DBO, porque muchas sustancias orgánicas pueden oxidarse químicamente, pero no biológicamente. (Romero, 2008).
- Los Sólidos Suspendidos Totales (SST). El contenido de sólidos de un agua afecta directamente la cantidad de lodo que se produce en el sistema de tratamiento o disposición y puede conducir al desarrollo de condiciones anaerobias (Romero, 2008).
- El oxígeno disuelto (OD) es utilizado para la oxidación de la MO carbonosa 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 un OD mayor a 0,5 mg/L (Romero, 2008). La baja disponibilidad de OD limita la capacidad autopurificadora de los cuerpos de agua y hace necesario el tratamiento de las AR para su disposición en ríos y embalses etc. La concentración de saturación de OD es función de la T, de la presión atmosférica y de la salinidad del agua.
- La Temperatura, influye en el desempeño del reactor debido a la afectación que puede ocurrir en los procesos biológicos. Un incremento de T puede aumentar la actividad microbiana y por ende aumenta la tasa de remoción de contaminantes. Cuando la T está por debajo de 13°C los procesos de remoción de carbono y nitrógeno se ven muy afectados. Aunque el aumento de T contribuye a la actividad microbiológica, la T no puede ser muy alta porque afecta la solubilidad del OD en el agua y puede ser factor limitante para el proceso microbiológico (Aristizábal, 2010). La T afecta al RBC como a cualquier otro tipo de tratamiento biológico.
- El pH es otro factor clave 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 (Aristizábal, 2010).
- TRH: Hace referencia al tiempo que tarda en recorrer el AR desde la entrada del reactor hasta la salida. Los TRH característico de los biodiscos son de 50-70 min (Romero, 2008).
- La CO para la primera etapa el rango óptimo de funcionamiento del RBC se encuentra entre 50-60 g DBO/m²/d

5.1.5 Análisis estadístico

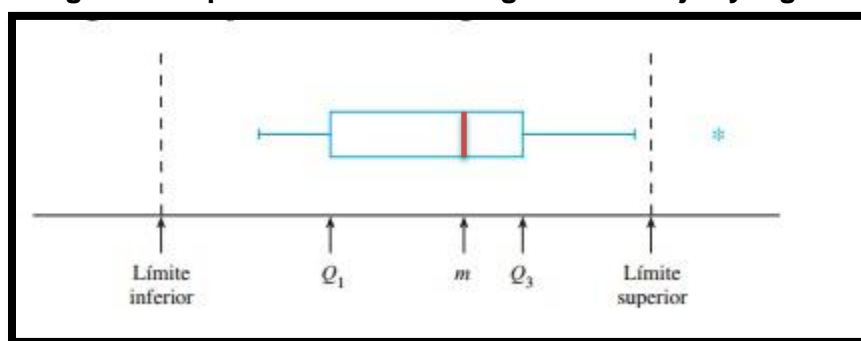
Para el análisis estadístico se empleó el programa SPSS versión 21, el cual es amplio y flexible en la gestión de información, éste es capaz de trabajar con datos

procedentes de distintos formatos generando, desde sencillos gráficos de distribuciones y estadísticos descriptivos hasta análisis estadísticos complejos que permiten descubrir relaciones de dependencia e interdependencia, establecer clasificaciones de sujetos y variables, predecir comportamientos, etc.

5.1.5.1 Diagrama De Cajas

El **diagrama de caja** es una presentación visual que describe al mismo tiempo varias características importantes de un conjunto de datos. Esta gráfica fue desarrollada en 1977 por John Tukey, en la cual resume 6 medidas estadísticas: el valor mínimo, el primer cuartil (Q1), la mediana, la media, el tercer cuartil (Q3) y el valor máximo, esto se representa en la **Figura 2**.

Figura 2 Representación de una gráfica de cajas y bigotes



Fuente: (Mendenhall, Beaver, & Beaver, 2010)

La caja muestra el 50% de los datos. La línea roja representa la mediana (m). El límite inferior de la caja es el primer cuartil (Q_1) y el límite superior es el tercer cuartil (Q_3).

Junto a la caja se une una línea a cada lado llamadas "bigotes". Los bigotes son dibujados desde el límite del cuartil hasta 1,5 veces el **rango intercuartílico (IQR)**, siendo IQR la diferencia entre Q_3 y Q_1 . Datos que están a más de 1,5 veces del IQR son considerados **atípicos** y son representados como pequeños * individuales (Mendenhall et al., 2010).

5.1.5.2 Prueba t-student para muestras relacionadas.

La prueba t para muestras relacionadas, es una prueba que compara los resultados de las medias (U) de cada muestreo, con el fin de ver si se cumple con los supuestos de las hipótesis.

El procedimiento para comparar medias nos permite la aplicación de distintos estadísticos inferenciales apropiados para contrastar hipótesis relativas a la diferencia existente entre dos o más medias, o relativas a la posibilidad de que una muestra

pertenezca a una población que presenta una media determinada; las hipótesis relativas son:

Hipótesis alternativa: $U_1 \neq U_2$

Hipótesis nula: $U_1 = U_2$

- **SI** la significancia asintótica (bilateral) $> 0,05$ (α) no hay diferencia significativa y se acepta la hipótesis nula.
- **SI** la significación asintótica (bilateral) $\leq 0,05$ (α) entonces hay diferencia significativa y se rechaza la hipótesis nula.

Para llevar a cabo esta prueba se requiere que los datos a analizar tengan un comportamiento normal. En el caso de estudio la variable U se relaciona con la media de la remoción de materia orgánica.

5.1.5.3 Regresión

El análisis de regresión es una de las técnicas estadísticas más ampliamente usadas para el estudio de datos y utiliza ecuaciones para expresar la relación entre un grupo de variables.

El procedimiento Regresión Polinomial está diseñado para construir un modelo estadístico que describa el impacto de un solo factor cuantitativo X en una variable dependiente Y. Se ajusta a los datos un modelo polinomial que involucra a X y potencias de X. Se realizan pruebas para determinar el orden apropiado del polinomio. Se puede graficar el modelo ajustado con intervalos de confianza y/o predicción. También se pueden graficar residuos e identificar observaciones influyentes.

Para el caso de estudio se trabajó con un modelo de regresión de tipo polinomio de una variable, para tratar de expresar matemáticamente la relación entre el TRH y la eficiencia de remoción en el biodisco experimental.

Por ejemplo un polinomio de segundo orden en una variable es de la forma:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 X^2 + \varepsilon$$

Donde Y es la variable de respuesta, y X es la variable regresora.

En este modelo de tipo cuadrático el valor esperado de Y es:

$$\varepsilon_{(Y)} = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 X^2$$

Donde Y es la variable dependiente a predecir, X es la variable independiente, ϵ el error y $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ son parámetros del modelo (Montgomery, Peck, & Vining, 2001).

6 ESTADO DEL ARTE

6.1 HISTORIA

El primer contactor biológico rotatorio (RBC) fue desarrollado en Alemania por Weigand en 1900, donde el medio de soporte giratorio estaba formado por planchas de madera y describe un cilindro. La segunda patente fue desarrollada por Poujoulat en 1916 donde el medio estaba formado por un cilindro de material poroso que giraba sobre su eje horizontal. Siguiendo la línea así iniciada, distintos investigadores estudiaron el medio soporte giratorio. J. Doman, en 1929, informó sobre el desarrollo de un filtro de contacto que usaba placas de acero galvanizado sumergidas (Lazcano, 2013).

En la década de 1930, Bach e Imhoff lo probaron como sustituto para el tanque Emscher. Estas unidades experimentaron severos problemas debidos a obstrucciones en las planchas, por lo que las investigaciones no continuaron. Nada había sido desarrollado en Europa hasta finales de 1950 cuando primero Hartman y después Popel, en la Universidad de Stuttgart, realizaron pruebas exhaustivas usando discos de plástico de 1.0 m de diámetro. Casi al mismo tiempo el poliestireno expandido se empezó a usar como un material de construcción barato. Con este nuevo material el trabajo desarrollado por Hartman y Popel concluyó en un nuevo proceso de tratamiento de AR (Tchobanoglous et al., 2003).

En 1957, la compañía J. Conrad Stengelín en Tuttligen, Alemania, comenzó a fabricar discos de poliestireno expandido de 2 y 3 m de diámetro para el uso en plantas de tratamiento de AR. La primera instalación comercial entró en operación en 1960, y su uso se extendió rápidamente en toda Europa por su simplicidad y bajo consumo de energía. En 1980 existían 1,000 instalaciones localizadas principalmente en Alemania, Suiza y Francia, las demás se encuentran en Italia, Austria, Gran Bretaña y Escandinavia. La mayoría de estas instalaciones son para poblaciones menores a 1,000 habitantes, sólo había unas cuantas instalaciones con capacidad de hasta 10,000 habitantes. Aunque ofrece gran simplicidad en su operación y bajos consumos de energía, el sistema de discos de poliestireno ha sido restringido a pequeñas instalaciones debido a los altos costos de construcción en comparación con el proceso de lodos activados (Solorio, 1988).

En el inicio de los años sesenta, en EUA, la división de investigación de la compañía Allis-Chalmers analiza el uso de discos rotatorios para diversas aplicaciones en procesos químicos. El procedimiento se denominó *Contactador de dos fases* (TPC) y fue utilizado para absorción de gases, extracción líquido-líquido, transferencia de masa y, eventualmente, para estudiar la transferencia de oxígeno. Experimentos posteriores

confirmaron los resultados favorables de estas pruebas. El proceso fue designado como *Rotating Biological Contactor*, RBC (Alleman et al., 1982).

En 1968, se establece un acuerdo de licencia entre la compañía Allis-Chalmers y los fabricantes alemanes para efectuar la producción, venta y distribución en EUA. La primera instalación comercial entró en operación en Estados Unidos para una pequeña fábrica de queso en 1969 (Solorio, 1988).

En 1970, Allis-Chalmers vende la tecnología del RBC a la Corporación Autotrol. El proceso aún no era competitivo debido al alto costo del poliestireno. Sin embargo, en 1972 Autotrol anuncia el desarrollo de un nuevo material de soporte construido con hojas corrugadas de polietileno. La densidad de área superficial ($52.5 \text{ m}^2/\text{m}^3$ del disco de poliestireno) aumenta a $121 \text{ m}^2/\text{m}^3$ con el nuevo material (Alleman et al., 1982).

Para 1978 ya se tenía 59 plantas de Biodiscos en Estados Unidos, 308 en 1980 y más de 600 en 1988, y para esa época ya había más de 3000 plantas de Biodiscos en el mundo (Romero, 2008).

Durante los años de 1980 a 2000 se desarrollaron estudios exhaustivos de aplicación de sistemas de CBR en AR municipales e industriales, sobre todo en la remoción de nutrientes, realizándose modificaciones de diseño y registrando su respectiva eficiencia. Las tendencias europeas actuales de este sistema se enfocan a la integración de sistemas compactos con altos valores de superficie de contacto, desarrollándose distintas patentes que proporcionan tratamiento desde 10 a 10,000 habitantes equivalentes. En Alemania y Suiza el empleo de discos rotatorios está ampliamente extendido en las plantas de tratamiento pequeñas. En EUA este tipo de plantas ha sido usado en plantas de todos los tamaños durante los años 70 (Henze, Harremoës, la Cour Jansen, & Arvin, 1997).

En la actualidad se han continuado los estudios para modificar los materiales con los que están fabricados los RBC.

6.2 ESTUDIOS Y APLICACIONES CON BIODISCOS

Bezanilla, (1993) realizó un estudio comparativo del funcionamiento de una planta de biodiscos (RBC) convencional y de otra planta RBC con alternancia en el sentido del flujo que funcionaron con AR sintética, distintas cargas orgánicas afluentes (COA) y periodos de alternancia de 24, 12, y 6 horas. La planta convencional mostró en todo momento mayores espesores de biopelícula, con altas cargas, 6mm, mientras en la planta con alternancia en el sentido del flujo no se alcanzaron nunca espesores mayores de 3,8 mm. El OD fue siempre mayor en la planta con alternancia de flujo.

Stover *et al* (1976) citado por Bezanilla (1993) estudió un reactor RBC usando agua sintética e informaron una eficiencia de remoción de más del 90% de DQO con

CO por debajo de $0,64 \text{ kg/m}^3/\text{día}$; luego usaron el mismo reactor con AR de matadero con igual CO y alcanzaron eficiencias del 70% de DQO.

Guinea et al (2000) estudiaron un RBC para determinar la distribución de los protozoos y metazoos, comunidades que habitan este tipo de biopelícula, y relacionarlos con la DBO_5 , el sistema fue eficiente con la eliminación de DBO_5 y SST a lo largo de la planta. Los resultados revelaron principalmente la importancia de protozoos ciliados en este sistema biológico.

Behling, Marín, Gutiérrez, & Fernández, (2003) estudiaron el reactor RBC, con dos efluentes industriales, bajo condiciones mesofílicas con un caudal de $5,2 \text{ ml/min}$ y TRH de 24 h. La CO promedio aplicada fue $2,04 \text{ g DQO/m}^2\text{d}$ y con el efluente cárnico se incrementó progresivamente ($7,59$; $12,09$; $20,01$ y $24,45 \text{ g DQO/m}^2\text{d}$). El resultado obtenido muestra que el sistema remueve eficientemente altas concentraciones de MO, obteniéndose 87,9% de remoción de DQO, para una CO promedio de $15,67 \text{ g DQO/m}^2\text{d}$. Para el efluente petrolero, se encontró 76,1% de remoción de DQO

Ordóñez & Perez, (2013) analizó la aplicación de la tecnología biodiscos como una alternativa para el tratamiento del lixiviado crudo, encontrando una remoción del 40% de DBO_5 y DQO, con cargas entre 8 y $28 \text{ g DBO}_5/\text{m}^2\text{d}$, y tiempos de residencia hidráulicos de $7,27$ a $12,3$ horas.

Behling et al., (2005) trataron un efluente sintético de glucosa y fenol como fuentes de carbono, donde obtuvieron eficiencias de remoción de DQO por encima del 97%.

El RBC es una tecnología empleada para soportar grandes cargas de efluentes industriales, como en el caso de efluentes de industria de palma de aceite, la cual tiene una DQO de $16\ 000 \text{ mg L}^{-1}$, con ayuda de los biodiscos se remueve un 88% de la DQO, con un TRH de 55 horas (Najafpour, Yieng, Younesi, & Zinatizadeh, 2005).

Para la misma tecnología, se estudió el efluente de una industria camaronera (planta procesadora), aplicando diferentes TRH y CO en condiciones mesofílicas. El sistema mostró una alta eficiencia en la remoción de la MO presente, obteniendo porcentajes de remoción de DQO hasta de 74,5% dependiendo del TRH (Behling, Rincón, Díaz, & Marín, 2008).

Aristizábal, (2010) construyó un sistema de Biodiscos a escala laboratorio para tratar aguas lixiviadas del Relleno Sanitario La Pradera y evaluó el comportamiento del reactor a una determinada carga de diseño ($18 \text{ g DQO/m}^2\text{d}$), los resultados fueron satisfactorios, obtuvieron eficiencias de 68% en remoción de DQO, 95% en DBO_5 , 70% en SST.

En otro artículo, se estudió la potencialidad de los sistemas de lodos activados y biodiscos como alternativas de tratamiento secundario del efluente primario convencional de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Cañaveralejo, ofreciendo eficiencias de reducción promedio de DQO, DBO_5 y SST superiores al 80%

y el RBC obtuvo el mejor desempeño para un TRH entre 2.0 y 4.0 horas (Torres et al., 2011).

Behling et al., (2012) estudiaron la influencia de la CO sobre la eficiencia de reactores RBC, aerobios de tres etapas con efluente industrial sintético, y DQO de entrada constante, y obtuvo mayor eficiencia de remoción de DQO con TRH de 12 horas (96,25%).

En otro estudio Borges et al., (2012) diseñaron y construyeron un RBC a escala piloto para el tratamiento de AR de rastro y determino la eficiencia a distintas CO a 30 rpm con diferentes TRH, obteniendo mejor eficiencia con la CO de 12.2 g DQO/m²/d, con una remoción como DQO de 98.35%, una DBO₅ de 97.96%.

Los RBC, también son empleados para tratar el agua de industrias textiles, PakshiSrajan & Kheria, (2012) evaluaron la cepa de *Phanerochaete chrysosporium* para la remoción de colorantes, revelando que si el agua no tiene una fuente de carbono o nutrientes el RBC no decolora eficientemente, pero si al afluente se agrega glucosa la decoloración es de un 80%; por otra parte, estudios realizados revelan que usar cepa de *Irpex-Lacteus* en los discos del RBC, ayudan a la decoloración del efluente, el azul de metileno empleado en el estudio fue removió a razón de 0.34 mg d⁻¹ (Malachova et al., 2013).

Borges, Ocampo, Novelo, Arturo, & Franco, (2013) evaluaron la eficiencia del RBC a escala piloto para el tratamiento de efluentes de fosas sépticas a diferentes CO y dos velocidades de rotación (15 y 30 rpm), los resultados demostraron que a menor CO aplicada, mayor eficiencia (casi 90% para DQO y DBO₅). La combinación más eficiente para la remoción de MO fue con 5.2 g DBO₅ m⁻²·d⁻¹ y con una velocidad de rotación de 30 rpm, que equivale a una velocidad tangencial de 16.49 m/min.

(Pariente et al., 2013) evaluaron un efluente proveniente de una agroindustria la cual tiene una relación DBO/DQO de 0.07, DBO₅ de 2100mg/L, DQO de 28067 mg/L, emplearon una oxidación catalítica con peróxido de hidrogeno húmedo para poder tratar el agua por vía biológica, obteniendo una DBO/DQO de 0.13, DBO₅ de 1860 mg/L y una DQO de 13693mg/L, el tratamiento biológico empleo los RBC pero con cargas diluidas del proceso anterior logrando una remoción de 78% de COT y 49% NT.

Padhi & Gokhale (2016) diseñaron una unidad de RBC para medir y analizar el benceno, el CO₂, biomasa, nutrientes y verificar la eficiencia de remoción del RBC, logrando una remoción de benceno cerca del 95%, lo cual es un 54% más eficiente en comparación con otros sistemas que reporta la literatura.

7 METODOLOGÍA.

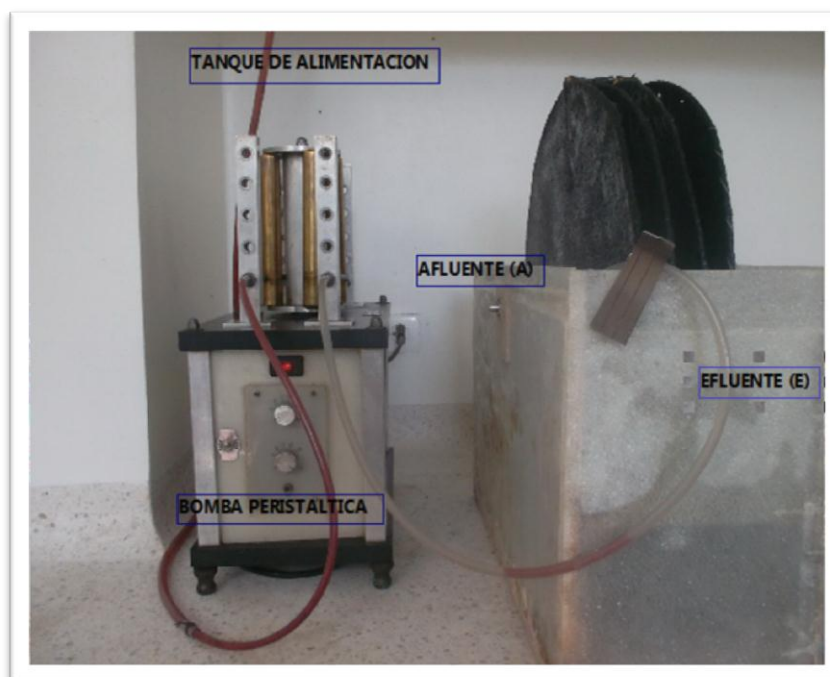
7.1 UBICACIÓN

La evaluación del RBC con discos de geotextil se llevó a cabo en el Laboratorio de Química Sanitaria de la Facultad de Ingeniería Civil- Universidad del Cauca, Popayán Cauca.

7.2 SISTEMA DE TRATAMIENTO

El reactor RBC de una sola etapa es de tipo integral, está conformado por 4 discos circulares (47.5 cm de diámetro), separados entre sí 2 cm y sumergidos un 15.29% del área del disco en el agua tratada. Los discos se soportaron en un eje de acero inoxidable para evitar la corrosión, el cual permitió girar los discos a 2,0 RPM, utilizando un motor. El tanque del reactor es de acrílico, el ancho y la longitud respectivamente son: 20 y 55 cm. El agua tratada fue AR sintética, de preparación sencilla y con compuestos de fácil adquisición, la cual se comporta bioquímicamente de forma análoga al agua residual doméstica, y que se usa en investigaciones a nivel de laboratorio y en reactores prototipo. El TRH se controló variando el caudal por medio de una bomba de funcionamiento peristáltico con capacidad variable de 1 L/día a 20 L/día, el esquema del RBC se puede apreciar en la **Figura 3**.

Figura 3 Contactador Biológico Rotatorio



Fuente: elaboración propia

7.3 ALIMENTACION-AGUA RESIDUAL SINTÉTICA.

Se empleó como afluente al reactor, AR sintética, se preparó en un tanque con capacidad de 40 litros para la alimentación diaria del reactor. En la **Tabla 2**. Se encuentran las características del AR sintética que se empleó en el reactor como simulación del ARD, para el caso de estudio, se tomaron las cantidades indicadas en la **Tabla 2** por triplicado, con el objetivo de obtener una caracterización del ARD media, para ello se empleó, una balanza electrónica analítica de METTLER TOLEDO de serie 1127372325. Luego de tener las masas se diluyeron en una solución acuosa que es llevada al tanque de alimentación, donde se afora a la capacidad del tanque, y finalmente se mezcla la solución.

Para el inóculo inicialmente se tomó agua del río Molino, pero el crecimiento de la biopelícula no fue notorio, motivo por el cual, se cambió a AR proveniente de un tanque séptico, con esta última se desarrolló una biopelícula blanca muy filamentosa, por ende se regresó al agua del río Molino, la cual ya formó una biopelícula adecuada para desarrollar el trabajo.

Tabla 2 Composición del agua residual sintética.

COMPUESTO	CANTIDAD mg/L	CANTIDAD USADA mg/L	OBSERVACIONES
Leche en polvo	100	300	La descremada es más rica en sales minerales, pero tiene menos contenido de grasas. Si no tiene azúcar, evaluar la necesidad de agregar glucosa. No usar deslactosada.
Gelatina sin sabor	35	105	Sin azúcar, evaluar la necesidad de agregar glucosa a la mezcla.
Almidón	170	510	Se puede usar fécula de maíz (maicena).
Sal común	7	21	NaCl
Azúcar	28	84	Glucosa (C ₆ H ₁₂ O ₆)
Urea	3	9	CO(NH ₂) ₂
Fosfato bicálcico	40	120	CaHPO ₄ ·2H ₂ O
Sulfato de magnesio	2,5	7,5	Conocida comercialmente como sal de EPSON
Inóculo	10-15 g SSV/L ó 70mL/L		Se puede usar lodo activado de un reactor de aguas residuales existente
Jabón de tocador	3 gotas	9 gotas	Líquido y no antibacterial. Para algunos ensayos puede prescindirse de él.

Fuente: Adaptado de (Rodríguez Sánchez & Lozano-Rivas, 2012).

7.4 OPERACIÓN DEL REACTOR

7.4.1 Etapa de aclimatación y estabilización.

Se desarrolló una etapa previa de aclimatación (**Figura 6, Anexo F**), del reactor, que tuvo una duración de 3 meses, con la finalidad de estimular la formación de la biopelícula sobre los discos (**Figura 7, Anexo F**), se alimentó el reactor cada día por medio de una bomba peristáltica donde se aumentó el caudal un cuarto cada 8 días para permitir el desarrollo de la biopelícula (**Figura 8, Anexo F**), y obtener el caudal

total para el TRH 6 horas, el cual es 48,84 mL/min, esto favoreció la fijación y el crecimiento de bacterias para la estabilización del reactor tal como se aprecia en la **Figura 9 (Anexo F)**, dándose cuando el valor de DBO_5 en el efluente fue constante por tres días consecutivos. Además se realizó pruebas de medición de caudal, por el método volumétrico.

7.5 SEGUIMIENTO Y CONTROL DEL SISTEMA

Se operó una planta piloto de RBC de 1 etapa (**Figura 4**), bajo las cargas hidráulicas (CH) y orgánicas de la **Tabla 3**. El TRH del sistema vario de 6, 12, 18, y 24 horas. Una vez estabilizado el sistema, se tomaron muestras puntuales en el reactor.

Figura 4 Montaje del RBC



Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3 Carga Hidráulica y Orgánica

TRH horas	CH m ³ /m ² d	CO g DBO/m ² d
6	0,325	14,575
12	0,173	7,394
18	0,120	4,380
24	0,094	3,606

Fuente: elaboración propia

7.5.1 Punto de muestreo y muestra

Se seleccionó como punto de muestreo el afluente y efluente del reactor, se determinó el comportamiento de remoción de MO en términos de DQO y DBO₅, además se tuvieron en cuenta los parámetros T, pH, OD y Caudal, (variable que se controló para obtener los distintos TRH) para comprobar la buena operación y desempeño de los Biodiscos.

Para efectos experimentales se empleó AR provenientes del río Molino, como fuente de microorganismos, dosificándose 3 litros cada ocho días, volumen suficiente para garantizar el crecimiento de microorganismos en los discos. El número de muestras para cada TRH se encuentran descritas en la **Tabla 4**, el volumen total de muestra tomado para realizar la prueba de DBO y DQO en el afluente y efluente fue de 350 y 500 mL respectivamente para cada muestra y se realizó en horas de la mañana.

Tabla 4 Número de pruebas tomadas

PUNTO DE MUESTREO	PARÁMETRO A MEDIR	NÚMERO DE PRUEBAS	TOTAL DE PRUEBAS	TRH horas
Afluente	DBO ₅	5	20	6, 12, 18 y 24
	DQO	2	8	6, 12, 18 y 24
Efluente	DBO ₅	5	20	6, 12, 18 y 24
	DQO	2	8	6, 12, 18 y 24

Fuente: Elaboración propia

7.6 ANÁLISIS DE LA MUESTRA

Para el análisis de muestras, estas se tomaron en el afluente y efluente del sistema RBC, su procesamiento se realizó en el laboratorio de Ingeniería Ambiental y Sanitaria de la Universidad del Cauca teniendo en cuenta los procedimientos reglamentados por "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20th Edition". El parámetro DQO fue analizado en el laboratorio de la Corporación Regional del Cauca, CRC, el cual se encuentra con acreditación vigente.

7.7 EL MUESTREO

- Aforo del Caudal (Q): los aforos se realizaron por medio del método volumétrico, se controló el caudal de entrada y salida del reactor para corroborar TRH.

El TRH es la piedra angular del estudio, las diferentes variaciones del mismo, generaron comportamientos del reactor, los cuales fueron causa de análisis en el trabajo realizado.

Se variaron los TRH para evaluar la eficiencia del sistema RBC, como se ve en la **Tabla 5**.

$$TRH = \frac{\text{Vol util del reactor}}{\text{Caudal efluente}}$$

$$TRH = \frac{16.5 \text{ L}}{15.28 \frac{\text{mL}}{\text{min}}} = \frac{16500\text{mL}}{15.28 \frac{\text{mL}}{\text{min}} * \frac{60 \text{ min}}{\text{Hora}}} = 17.99 \cong 18 \text{ Horas}$$

Tabla 5 Tiempos de retención Hidráulico usados

Tiempo de retención hidráulico (Horas)	Caudal efluente (mL/min)
6	48.84
12	22.92
18	15.28
24	11.46

Fuente: Elaboración propia

- T: se determinó la T para cada muestra por medio de la sonda multiparamétrica de marca HACH HQ40D.
- pH: se tomó un volumen de la muestra y se midió el pH a cada una de las muestras utilizando un potenciómetro SCHOTT 99400951
- OD: El parámetro fue medido por medio de una sonda multiparamétrica de HACH HQ40D.
- DBO₅ (Demanda Bioquímica de Oxígeno): para determinar la DBO₅ se empleó el DBO de VELP SCIENTIFICA F102B0133, se cuantificaron cinco muestras durante la semana. El volumen de dilución empleado depende del rango de la DBO esperada, cuyas características se encuentran en la **Tabla 6**; cada 24 horas el equipo mide los cambios de presión en la botella, lo traduce en términos de DBO y almacena el dato en la memoria, al 5 día se hace la lectura de los datos y el contenido de la botella se depura, para obtener resultados

satisfactorios se siguieron las indicaciones del manual con rigurosidad. La metodología empleada para la DBO_5 se registra en el **Anexo C**.

Tabla 6 Volumen de agua residual empleado en la muestra de DBO_5

RANGO mg/L DBO_5	VOLUMEN mL
0-90	400
90-250	250
250-600	150
600-1000	90

Fuente: (Velp, 2009)

- DQO (Demanda Química de Oxígeno): las muestras fueron llevadas al laboratorio Ambiental de la CRC ubicado en el Vivero CRC, Vereda González, Popayán. Las pruebas correspondientes a DQO se realizaron dos veces por semana y los resultados se recibieron a los quince días.

Los anteriores ensayos se encuentran resumidos en la **Tabla 7**.

Tabla 7 Parámetros analizados, unidades y métodos

Parámetro	T (° C)	pH Unidades	OD mg/L	DQO $\frac{mg}{l}$	DBO_5 $\frac{mg}{l}$
Método		Potenciométrico		Reflujo cerrado	Sensor VELP para DBO_5
Observación	sonda *		sonda *	SM 5220 D, modificado	F102B0133

*Sonda multiparamétrica de HACH HQ40D

Fuente: elaboración propia

8 RESULTADOS Y ANÁLISIS

Se presentan los resultados de las pruebas de laboratorios realizadas a las muestras del afluente y efluente del reactor RBC. Para el análisis estadístico de los datos obtenidos para los diferentes parámetros (pH, T, OD, CO, DBO₅ y DQO) se usó la gráfica de **cajas y bigotes (Box and Whisker Plots)** mediante un paquete estadístico.

El análisis estadístico se resume en las **Tablas 15** hasta la **24** del **Anexo E**, donde se muestran los valores media, desviación estándar, mínimos, máximos y varianza para cada TRH.

De acuerdo a los resultados obtenidos, para los diferentes diagramas de cajas que presentan datos atípicos, se puede inferir que no es posible suprimir datos debido a que la población de la muestra es baja (por los escasos recursos en la investigación, puesto que no hubo financiamiento de terceros, exceptuando la colaboración dada por la CRC en las pruebas de DQO), y no se tiene certeza de la procedencia de estos.

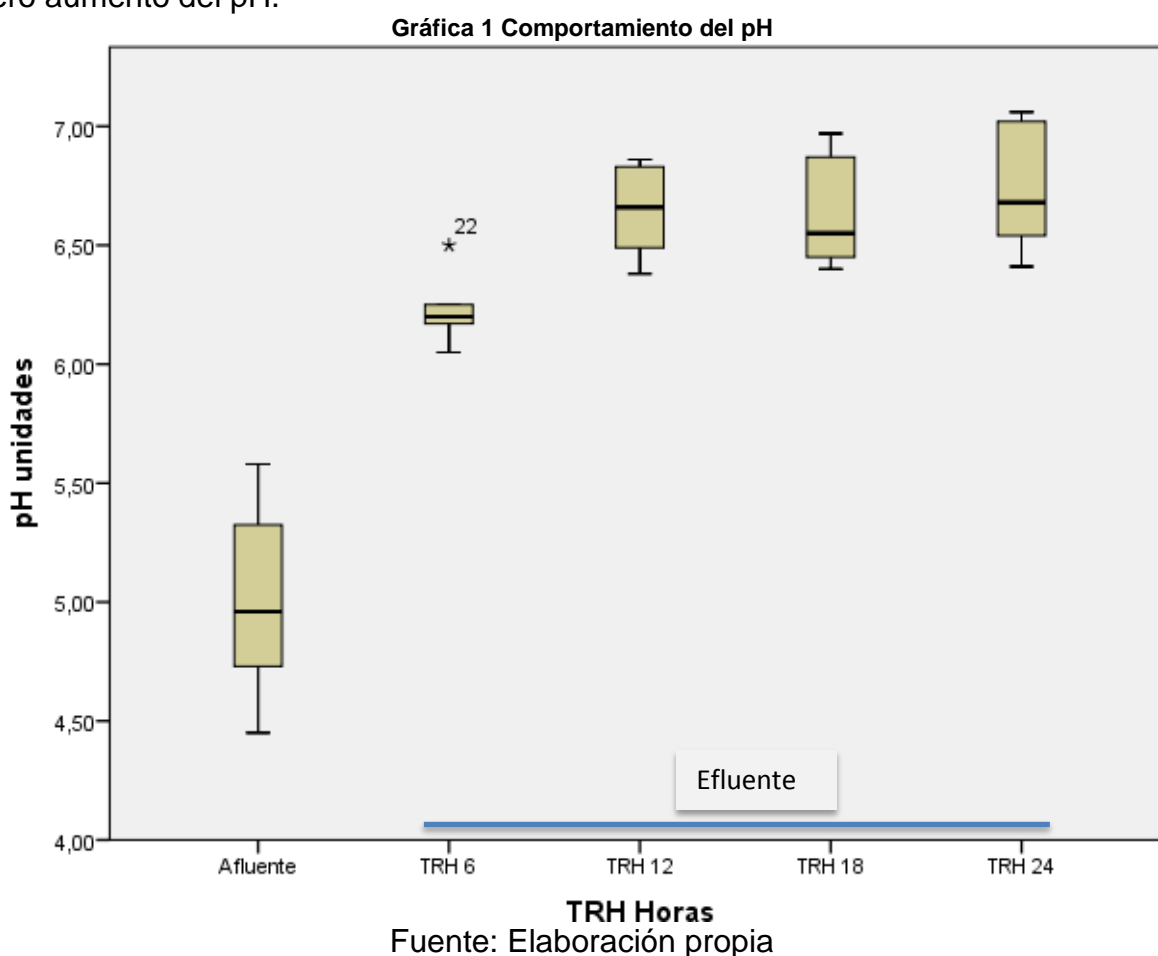
8.1 COMPORTAMIENTO DEL pH EN EL REACTOR DE BIODISCOS

Los puntos de muestreo para la medición de este parámetro fueron afluente y efluente del reactor, los resultados obtenidos para los diferentes TRH se presentan en la **Tabla 11 (Anexo D)**. Como se puede observar, el pH durante todo el proceso se comportó con variaciones para los cuatro TRH, siendo para todas las caracterizaciones mayor el pH a la salida que a la entrada del reactor; de acuerdo con los resultados obtenidos, el valor más alto de pH en el efluente del reactor fue de 6,97 y el más bajo 6,05 Unidades, lo que indica condiciones favorables para los microorganismos presentes en el sistema

Los valores de pH recopilados en el estudio (**Tabla 11**) se encuentran muy cerca al rango considerado óptimo para el crecimiento de los microorganismos aerobios y para el desarrollo de la película bacteriana, al tener en cuenta los datos de Cereceda, Serrano, & Guinea, (2000) y Aristizábal, (2010) que están en 7,4 y entre 6,5-7,5 unidades de pH respectivamente para el efluente, obteniéndose como consecuencia una buena actuación del RBC. Pero si el agua residual tuviera grandes concentraciones de ion hidrógeno sería difícil de tratar por medios biológicos o tendría que hacerse un acondicionamiento al agua de entrada.

Para el afluente del reactor, el valor más alto fue de 5,58 y el valor más bajo es 4,45 Unidades. Al observar la **Gráfica 1**, el TRH 6 horas presentó menos dispersión en los datos y tiene un dato atípico, el cual se representa con el número 22 según el paquete estadístico y corresponde al valor de 6,50 unidades de pH, por otro lado el TRH 24 horas presenta un comportamiento más disperso.

Como se puede observar en la **Gráfica 1** proporcionalmente al TRH , el pH presenta una marcada tendencia a estabilizarse en valores neutros, dicho aumento se ha presentado en otros estudios, Behling et al., (2003) observaron un incremento del pH, tendiendo a ser más básico; en el afluente petrolero encontraron un pH de 8,0 unidades a la salida del reactor 8,9 unidades de pH. En el caso de estudio, la media para el afluente estuvo en 5,01, las medias obtenidas para el efluente son: 6.23, 6.64, 6.65 y 6.74 unidades de pH para los TRH de 6, 12, 18 y 24 horas respectivamente, estos resultados revelan un comportamiento semejante entre su estudio y éste, por lo que se infiere que el RBC funciona como un reactor con comportamiento amortiguador, por tal motivo se debe analizar la alcalinidad del reactor. Otro aspecto interesante del análisis estadístico de medias es que al incrementar la CO o el TRH se observó un ligero aumento del pH.



Por otro lado, el comportamiento creciente del pH probablemente pueda atribuirse a la formación de hidróxido de amonio en el reactor, siguiendo la reacción de oxidación de la MO, esta es realizada por bacterias heterótrofas de composición (Gil-Rodríguez, 2006).

El Hidróxido de Amonio tiende a concentrarse en el cuerpo de agua del reactor, dado a que los discos solo se encuentran sumergidos un 15,29%, esto provoca que los

RBC oxigenen con mayor facilidad el cuerpo de agua, disminuyendo la probabilidad de tener microorganismos anaerobios, estos últimos son los encargados de llevar a cabo los procesos de desnitrificación, debido a que no se da lo anterior, el hidróxido de amonio tiende a aumentar su concentración, y por ende el pH podría ser ligeramente básico, en el caso de estudio neutro, Esto no se puede asegurar porque existen muchas sustancias que puedan elevar el pH.

8.2 COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA EN EL REACTOR DE BIODISCOS

La T del agua es un parámetro importante debido a sus efectos en reacciones químicas y tasas de reacción, la vida acuática y sus distintos usos generales. Un incremento en la T puede afectar considerablemente la solubilidad del OD en el agua, ya que a menor T mayor solubilidad (Mata, 2012). En el caso de la actividad biológica dentro del tratamiento de las aguas residuales las temperaturas óptimas se encuentran entre 25 y 35°C (Tchobanoglous et al., 2003); a su vez, la T determina el TRH, a mayor T mayor velocidad en la degradación de la MO; cambios en la T del cuerpo de agua pueden indicar incremento o descenso de la CO (Comisión Nacional del Agua México, 2007). Según Bezanilla, (1993) 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.

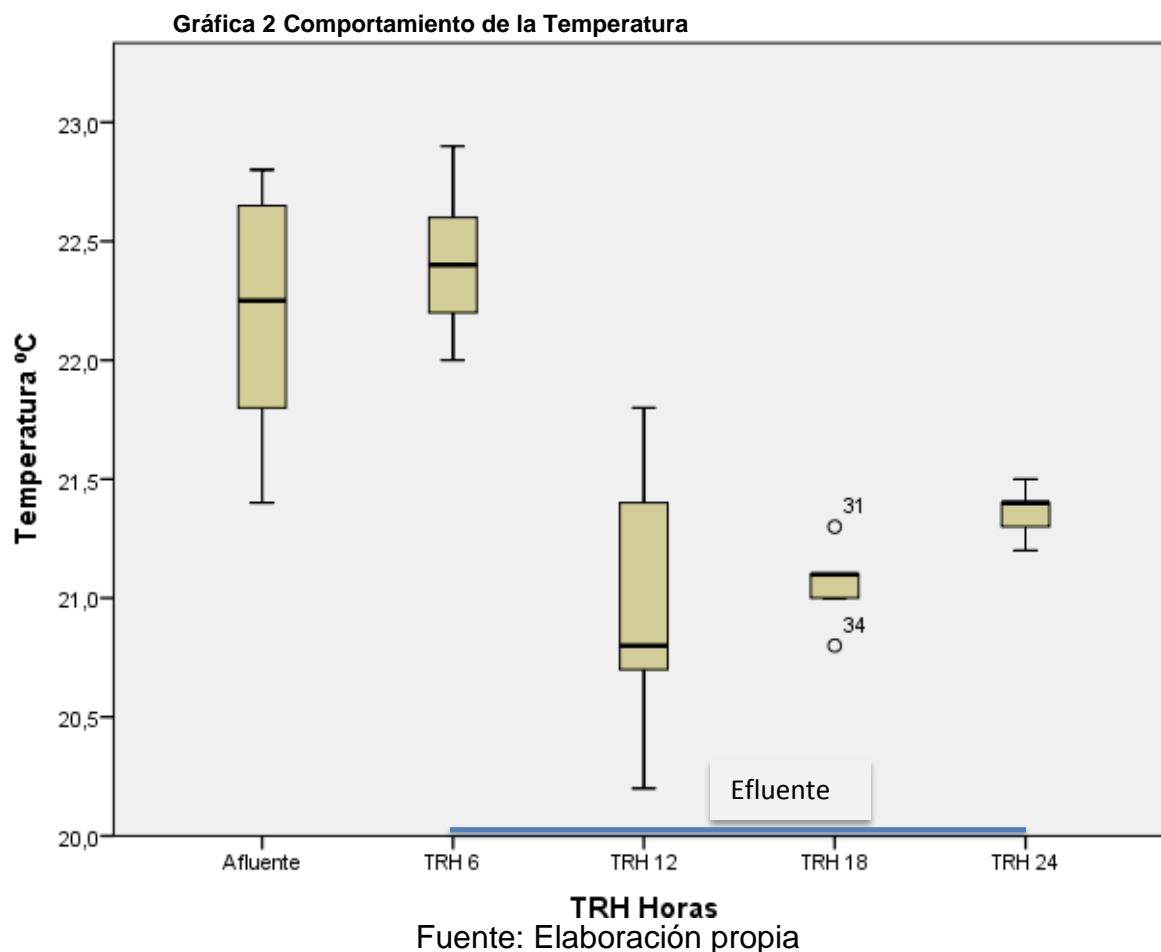
Para el caso de estudio, la media de la T en el afluente fue de 22,19°C, con desviación típica de 0,436 (**Tabla 11, Anexo D**), la cual demuestra una baja dispersión de las magnitudes de las muestras con respecto a la media; la T en el efluente se comporta de acuerdo a la **Gráfica 2**, donde la media y la desviación típica para cada TRH es de 22,42 y 0,344; 20,98 y 0,626; 21,06 y 0,182; 21,36°C y 0,181 para los TRH de 6, 12, 18 y 24 horas respectivamente; los resultados se encuentran por encima de 13°C, permitiendo mejor crecimiento biológico.

El reactor durante todo el estudio se comportó con pequeñas variaciones de T y los procesos de remoción no se vieron afectados, según el análisis estadístico y la **Gráfica 6** el TRH 6 y 12 horas presentan mayores variaciones en la T, dado a que el reactor no logra estabilizar la remoción de MO para esos TRH, caso contrario se puede ver con los TRH de 18 y 24 horas, en el primer caso de 18 horas, los datos se encuentran agrupados en sus valores inferiores y superiores los cuales concuerdan con el primer cuartil y el tercer cuartil, además se destaca la existencia de dos valores atípicos uno en el extremo superior representado con el número 21 y su valor es 21.3°C y el número 33 representa el dato atípico inferior cuyo valor es 20,8 °C, a su vez el TRH 24 horas presenta la mejor dispersión y la media concuerda con el tercer cuartil.

Este parámetro solo se monitoreo en el momento del muestreo, el cual fue en horas de la mañana (8-10 am) y en la tarde es muy probable que esta aumente o por el contrario disminuya, cabe aclarar, la T tanto en el afluente como efluente variaba en

función de la T ambiente (varía con la época estacional); si la T ambiente fuera estable en toda la fase experimental, se esperaría que la T fuera mayor en el TRH de 6 que en el TRH de 12, 18 y 24, dado a que, a mayor TRH mayor remoción de MO.

Por otro lado la T del agua residual interviene en la remoción de materia carbonácea y nitrogenácea ya que afecta al oxígeno disuelto y se dará a discutir en el siguiente apartado.



8.3 COMPORTAMIENTO DEL OD EN EL REACTOR DE BIODISCOS

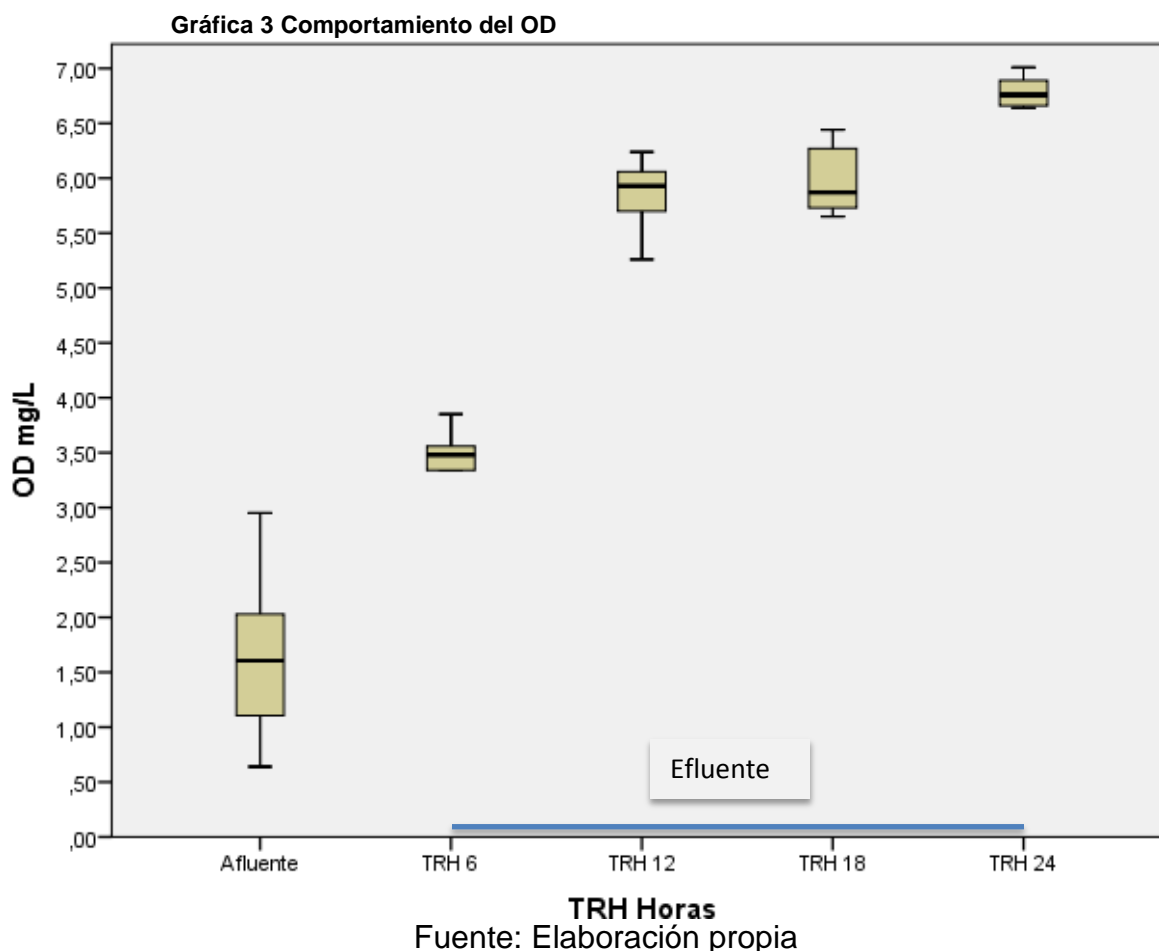
Con respecto al parámetro de OD se observa que para mayor TRH, mayor es la cantidad de OD presente en el efluente del reactor, además en ningún caso el OD del efluente llegó a estar por debajo de 2 mg/L (**Tabla 11, Anexo D**), esto quiere decir que el sistema se mantuvo siempre con los requerimientos de oxígeno necesarios dado que es un factor limitante en las primeras etapas de estos sistemas, para la degradación de la MO, según Nowak, (2000) en su estudio este parámetro es determinante para la oxidación del carbono y la nitrificación, y es el factor de diseño más importante en reactores RBC aerobios.

Cabe resaltar que la oxigenación del medio obedece a una hidrodinámica del RBC, en ella, la rotación de los discos genera una diferencia de presión que crea un intercambio entre aire /agua por convección, a su vez, a mayor velocidad tangencial tengan los discos aumenta la transferencia global de oxígeno (Hassard et al., 2015), en el caso de estudio, tal como se aprecia en la **Gráfica 3**, a mayor TRH y bajo la misma velocidad de giro en los discos, se obtiene un mejor intercambio de aire/agua para los periodos de retención más altos, para el TRH de 24 horas los niveles de OD fueron mayores frente a los demás TRH, donde el OD del TRH 24 es de 6.79mg/L frente a los TRH de 6, 12 y 18 horas cuyos valores medios son de 3.51, 5.83 y 5.99 mg/L, a su vez los TRH influyen en la oxigenación del RBC, teniendo como punto de referencia el valor medio del afluente 1.63mg/L.

La tendencia de los niveles de OD indica claramente que a medida que se incrementó el TRH, se midieron mayores concentraciones de OD en AR, favoreciendo las condiciones para remociones de COs por medio biológico, mediante un proceso aerobio, por otro lado los cambios de T no influyen en las concentraciones de OD, esto se ve para el TRH de 6 horas, la temperatura media es 22.42°C y el valor medio de OD es 3.51mg/L, mientras que los TRH de 12, 18 y 24 horas tienen una temperatura media de 20.98, 21.06 y 21.36°C frente a los niveles de OD de 5.89, 5.99 y 6.79mg/L, mostrando que cuando aumenta la temperatura, también lo hace los niveles de OD, por lo cual se infiere que el OD aumenta por el TRH que tenga el reactor.

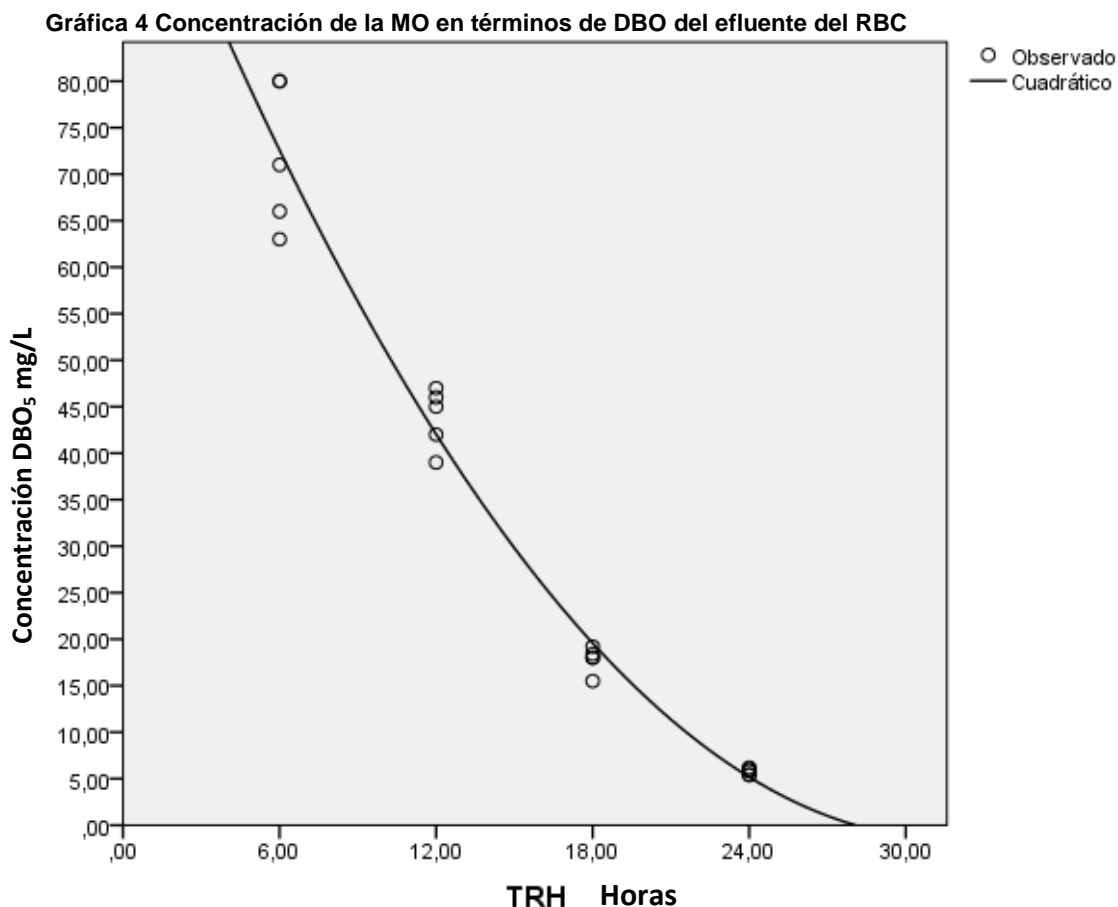
Por otra parte, las desviaciones típicas del efluente son: 0.21, 0.38, 0.35 y 0.16 para los TRH 6, 12, 18 y 24 horas, teniendo mayor dispersión el TRH 18 horas, el cual presenta los datos más agrupados en la parte superior entre el cuartil 2 y el cuartil 3, caso contrario se dio con el TRH 24 horas, donde se presenta un comportamiento pseudo simétrico y además el bigote inferior coincide con el cuartil 1, esto se asemeja en el TRH 6 horas, según el análisis estadístico no hay datos atípicos para este parámetro y la tendencia es acorde a lo encontrado en otros estudios.

Desde otra perspectiva, la **Gráfica 3**, los niveles de OD en el afluente se encuentran con una dispersión amplia en comparación con los valores del efluente para cada TRH, esto puede ser ocasionado por la presencia de sólidos provenientes de la composición del AR sintética, que tienden a disminuir los niveles de OD en el fondo del tanque de alimentación donde la bomba peristáltica succione, a su vez, también se puede atribuir esta variación a la presencia de probióticos presentes en la leche en polvo, los cuales pueden consumir el OD en su metabolismo, por lo anterior, se puede inferir los cambios presentes en la MO del afluente del RBC.



8.4 COMPORTAMIENTO DE LA DBO₅ Y LA DQO

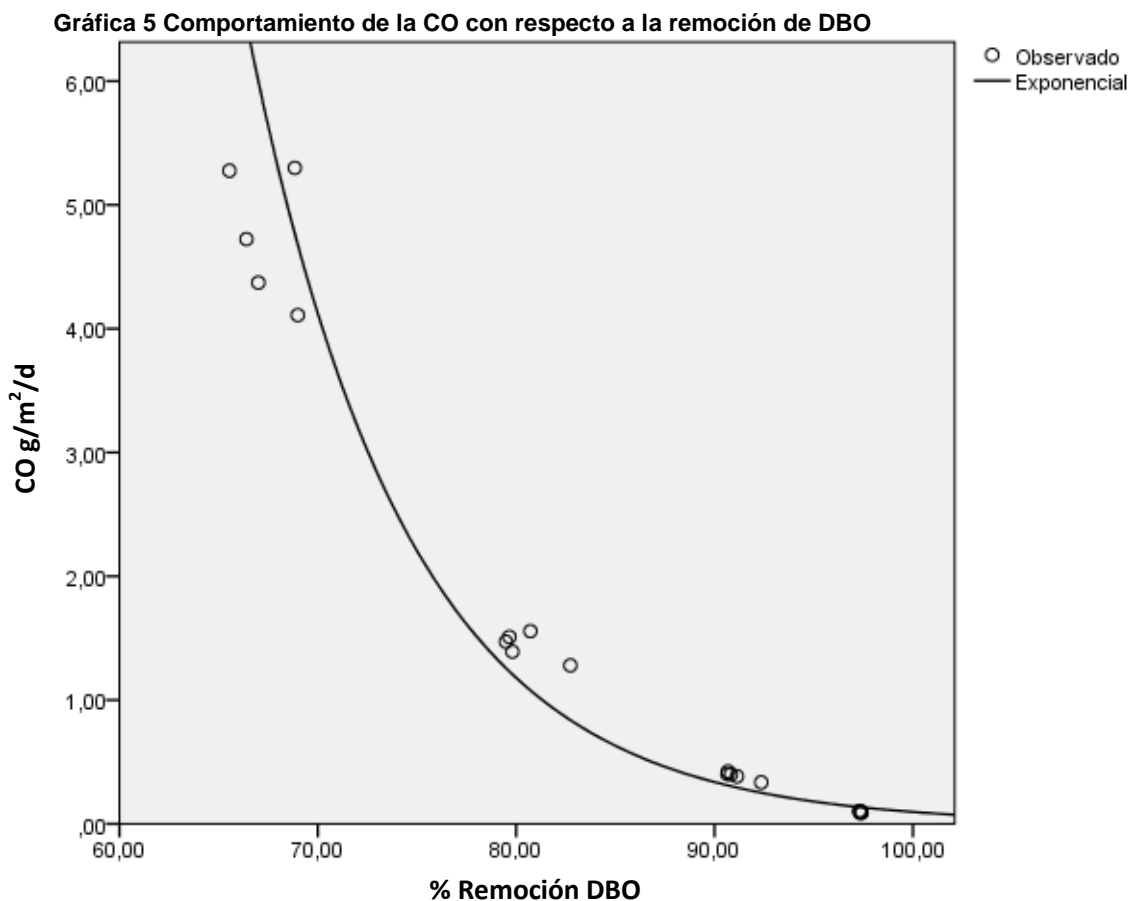
La disminución de la DBO₅ en el efluente es considerada como el principal parámetro en la determinación de la viabilidad del tratamiento de AR junto con la DQO. La **Tabla 12, anexo D** resume los datos obtenidos de la DBO₅ en el afluente y efluente del RBC, en el afluente los resultados para el TRH de 6, 12, 18 y 24 horas tiene una DBO₅ promedio de 206, 198, 169 y 177 mg/L respectivamente, estos valores caen en la escala de AR con concentración a media según la caracterización de Tchobanoglous et al., (2003), en el efluente las concentraciones medias fueron 72.0, 43.80, 17.82 y 5.76 mg/L de DBO₅ como se observa en la **Gráfica 4**, donde a mayor TRH las concentraciones de DBO₅ tienden a disminuir por acción del material biológico de los discos.



Fuente: Elaboración propia

En la **Gráfica 5** se observa el comportamiento de CO con respecto a la remoción de DBO para cada TRH; de esta, la eficiencia más alta es de 96,74% en el TRH 24 horas, para el TRH de 6, 12 y 18 horas se obtuvo una eficiencia de 65,09; 77,82 y 89,47% respectivamente, este notable decrecimiento también se observa en el estudio reportado por Behling et al., (2012), en el cual, la remoción más alta de DBO₅ se encuentra en la primera cámara con el TRH 24 horas se tiene una remoción de 97,9%, esta cámara contó con 12 discos y una velocidad de giro de 10 RPM.

Además se debe tener en cuenta la velocidad de rotación usada en el presente estudio fue baja (2 RPM) y se obtiene buenas eficiencias de remoción de materia carbonosa. Según E. Borges et al., (2013), en su estudio la velocidad de rotación resulta ser estadísticamente significativa sólo para la nitrificación, siendo 30 RPM la que favorece una mayor eficiencia y a menores velocidades se favorece la materia carbonosa. Desde otro punto de vista, a menor velocidad de giro presenten los discos, menor será la posibilidad de que el O₂ penetre la biopelícula, ayudando a la proliferación de los microorganismos aerobios, los cuales tienen una tasa de crecimiento bastante grande, y a mayor velocidad de giro, se tiende a desprender más rápido la biopelícula (Hassard et al., 2015).



Fuente: Elaboración propia

En términos de DQO se obtuvo una elevada remoción de la MO en el reactor, para el TRH 12, 18 y 24 horas se tuvo una eficiencia del 92,16%; 92,19% y 97,92%; respectivamente (**Tabla 12**), y finalmente para el menor TRH 6 horas la eficiencia se redujo a 74,52%; al comparar los resultados con el estudio de Behling et al., (2012) obtuvo una eficiencia para el TRH 6, 12, 24 horas de 90,95%; 95,98% y 93,21%, respectivamente. Para ambos estudios se obtuvieron eficiencias por encima del 90% de remoción para el TRH 12 y 24 horas.

En otro estudio, el TRH 24 horas presentó una eficiencia de 95,58% similar al presente estudio, además, el sistema RBC tiene eficiencias de remoción de MO medida como DQO por encima del 90% en casi todos los casos.

Al comparar los resultados obtenidos entre la presente experimentación y lo reportado por Behling et al., (2008) el reactor trabajó con 50 discos de plástico de punta de diamante corrugado, a una velocidad de giro de 2.5 RPM, este sistema muestra una similitud en la remoción de la MO, obteniendo para TRH de 12 horas una remoción de DQO de 92,3%, para una carga de 6,7 g DQOT/m²d y para este estudio, con el mismo TRH se tuvo una eficiencia de 92,16% y trabajó a una CO similar (6,521g DBO/m²d).

8.5 CARGA ORGÁNICA

Independientemente del TRH la CO del afluente disminuye conforme pasa por los discos, ya que esta es transformada en material celular, que incrementa el espesor de la biopelícula, siendo mayor el espesor del primer disco con respecto al cuarto, esto se debe a que en primera instancia el agua del afluente entra en contacto con el primer disco, continuando con el flujo del reactor hasta el vertimiento, por este motivo el biofilm del primer disco remueve mayor CO y presenta mayor densidad de biomasa en comparación con los otros discos.

La CO tiene un comportamiento semejante al de la concentración de DBO en el efluente (**Gráfica 4**), al comparar la CO con la remoción de DBO se puede observar, que a mayores remociones, menor CO se presenta, lo cual es esperado, dado a que la CO y la remoción de DBO son inversamente proporcionales, esto se puede ver en la **Gráfica 5**, según el análisis estadístico de la **Tabla 23**, la media y la desviación típica, para el TRH de 6, 12, 18 y 24 horas es 4.76 y 0.53; 1.44 y 0.11; 0.39 y 0.03; 0.09 g DBO/m²/día y 0.01 respectivamente, a menor TRH la CO presenta mayor dispersión, y viceversa, observándose que el RBC a mayor TRH tiende a estabilizar la CO, y a su vez la remoción de MO.

Najafpour et al., (2005) estudiando un reactor de tres cámaras, con área superficial de 10.7m² y 60 discos, observó que a medida que se incrementaba la CO, decrecía la eficiencia de remoción de DQO, estos investigadores concluyeron que la reducción de la eficiencia de remoción muestra insuficiente capacidad de eliminación, debido a condiciones limitantes en la transferencia de oxígeno en el biofilm, de lo anterior se puede decir, que la CO en el reactor no varió en gran medida, dado a que la remoción de MO para cada TRH presenta una desviación típica leve, para el TRH de 6, 12, 18 y 24 horas la desviación típica correspondiente fue de 1.605, 1.463, 0.768 y 0.066 respectivamente.

8.6 INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS EN LA REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA

El pH es un parametro que regula el estado del sustrato, como de los microorganismos, para el caso de estudio, este parámetros se mantuvo con un comportamiento cercano a la neutralidad, facilitando el medio adecuado para el desarrollo de los microorganismos, por fuera de ello, se resalta el comportamiento del pH en el efluente donde para TRH de 6 horas su valor fue de 6,23 y para el TRH de 24 horas es 6,74 unidades, en comparación de la remoción alcanzada para DBO, en el TRH de 6 horas se alcanzó una remoción de 65.091% y para el TRH de 24 horas se tuvo una remoción de 96.738% de DBO, lo cual revela que a pH con tendencia neutra hay una mejor interacción del sustrato con los microorganismos de la biopelícula, cabe resaltar que a mayores TRH pueden llevarse a cabo interacciones del biofilm con el agua circundante que permitan reacciones en las cuales las moléculas de carácter

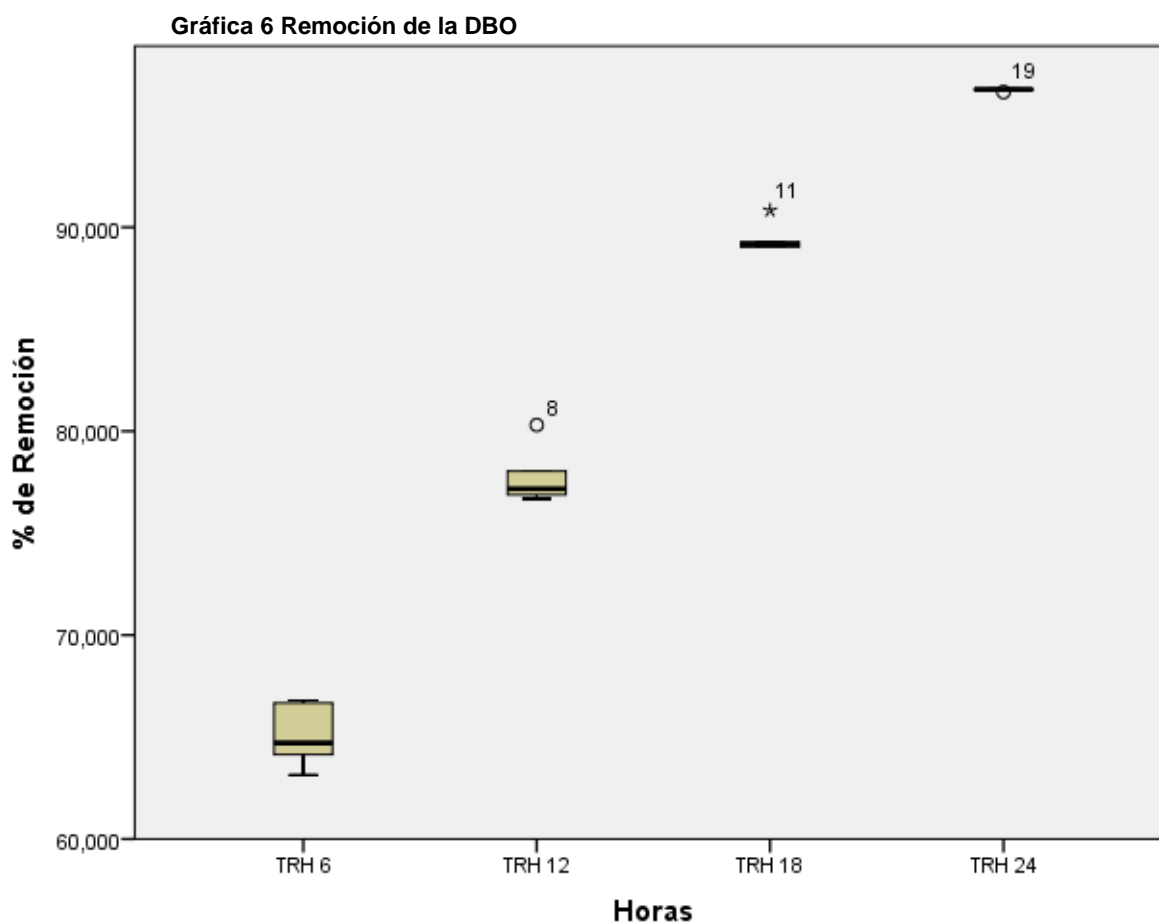
ácido se transforman en otras con pH no tan ácidos, o por lo contrario, que se disminuyan las concentraciones de las sustancias que ofrecen el pH bajos, como también que aumenten las concentraciones de sustancias de carácter básico.

El análisis del gráfico de la T, permite establecer que la T del afluente es muy cercana o ligeramente inferior a la del efluente con bajo TRH, sin embargo, al incrementarse el TRH de 12 a 24 horas la T del AR es significativamente inferior, pero conserva la tendencia de incrementarse a medida que se aumente el TRH. Este comportamiento no es el esperado dado que la T del ARD es mayor que la T ambiente, por lo cual se esperaría un decrecimiento de T a medida que se tenga mayor contacto con la T atmosférica, por otro lado el clima es el factor principal que modifica la T del agua del RBC, cabe resaltar la presencia de otros factores que también influyen en la T como son las reacciones endotérmicas y exotérmicas que ocurren dentro del reactor a partir de los procesos biológicos, pero estas, son insignificantes para la variación de la T (Aristizábal, 2010).

El OD al igual que la T y el pH, juega un papel fundamental en la actividad microbiológica, este es requerido para la oxidación de la MO como aceptor final de electrones; el OD en el reactor aumenta sus concentraciones conforme aumenta el TRH, esto se puede apreciar en la **Gráfica 3**, al comparar el OD frente a la remoción de DBO, se puede ver un comportamiento semejante, dado a que a mayor TRH, mayor remoción de MO, esto es un comportamiento esperado, explicándose con la hidrodinámica del reactor; al disminuir la concentración de la MO en el RBC, las concentraciones de OD en el efluente deben aumentar, ya que los discos continúan oxigenando el cuerpo de agua, lo anterior se puede confrontar con los estudios realizados por Behling et al., (2012), en su artículo, reportaron que a mayor tiempo de contacto mejora la difusión del sustrato en el biofilm y su consiguiente remoción del efluente, además cita a Najafpour et al., (2005), y Chen, Wen, Wang, & Li, (2006), quienes reportaron un comportamiento similar del OD en reactores RBC, durante el tratamiento de efluentes de comida enlatada y de aguas residuales municipales, respectivamente.

Las altas eficiencias de remoción de DBO, se podrían atribuir a la transferencia de OD en los discos del RBC, lo cual favorece un medio aerobio en la biopelícula y tiende a aumentar el tamaño de su biomasa rápidamente, para esto, necesita consumir OD en la oxidación de la MO, incrementando su población; por otro lado, el tanque del RBC funciona como decantador, en él, la MO proveniente del afluente tiende a sedimentar, y a mayores TRH mayor proceso de sedimentación, clarificando el efluente.

8.7 EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE DBO



De acuerdo al análisis estadístico de las **Tablas 19 a 22 (Anexo D)** las medias para el porcentaje de remoción de DBO, en los TRH de 6, 12, 18 y 24 horas son 65.09, 77.82, 89.47 y 96.74% respectivamente, como se aprecia en la **Gráfica 6**, el TRH de 6 horas presentó mayor dispersión en sus datos, en contraste los TRH de 12, 18 y 24 horas presentaron menos dispersión, además de tener un dato atípico simbolizado con el número 8 (80.30%), 11 (90.82%) y 19 (96.63%).

La **Gráfica 6** y la **Tabla 12 (Anexo D)**, presentan los resultados de la variación de las eficiencias de remoción de DBO a medida que se incrementan los TRH. De forma consistente con las curvas de concentraciones de DBO y OD a medida que se incrementa el TRH, aumenta el OD y se reducen las concentraciones de DBO y DQO, consiguiendo incrementos sustanciales en las remociones de los biodiscos a medida que el TRH aumenta.

El comportamiento de remoción de DBO y DQO fue similar en función del TRH, como es de esperar los porcentajes de remoción de DQO fueron superiores, dado a que la DQO oxida el material orgánico e inorgánico, por el contrario la DBO solo oxida

la MO. Los parámetros fisicoquímicos influyen en la depuración del efluente, a continuación se hace un análisis con respecto a la eficiencia de remoción de DBO, ya que el RBC es un tratamiento biológico.

8.8 RESULTADOS PRUEBA T-STUDENT

Para esta investigación según el **literal 5.1.5.2**, la hipótesis nula, hace referencia a la similitud entre las medias de la eficiencia de remoción de DBO para cada TRH, en caso de aceptarse esta hipótesis, los TRH no tendrían diferencia significativa en la remoción de la MO, por ende, se debería escoger el menor TRH, para aminorar los costos de operación del reactor. Por otro lado, al rechazar la hipótesis nula se debe elegir la hipótesis alternativa, en la cual cada TRH se comporta de manera diferente para la remoción de MO.

Para realizar la prueba t-student fue necesario verificar la normalidad de los datos en la variable porcentaje de remoción de DBO para cada TRH, empleando la prueba de Kolmogorov-Smirnov, los resultados se resumen en la **Tabla 8**, donde se aprecia que todos los TRH cumplen con una significancia mayor a 0.05, por lo cual, hay normalidad en los datos.

Como resultado del análisis estadístico de medias usando la t-student con una confianza del 95%, para muestras relacionadas en SPSS, **Tabla 9**, se obtuvo para la primera pareja (TRH 12-TRH 6), la media de las diferencias es 12,726% a favor del TRH 12 horas, al mirar la prueba de muestras relacionadas, la significancia arrojó un valor de 0,001 de lo que se deduce que para la primera pareja existe diferencia significativa en el TRH, corroborando que el TRH 12 horas mejoró su porcentaje de remoción al compararlo con el TRH 6 horas para un nivel de significación del 5%.

El mismo comportamiento se evidenció en las otras cinco parejas con una diferencia de las medias de: 24.38, 31.65, 11.65, 18.92, y 7.27, para las parejas de TRH de: 18-6, 24-6, 18-12, 24-12 y 24-18, de acuerdo a este análisis el que presentó menor diferencia de medias fue la pareja 24-18, con medias de 96,74 y 89,47 respectivamente, lo cual significa que sus medias estaban más cercanas. Por otro lado la pareja 24-6, con medias de 96,74 y 65.09% respectivamente, tenían las medias más alejadas y de allí el valor más grande entre las demás parejas. De esto ya se hizo énfasis en el **literal 7**.

Tabla 8 Resultados prueba de normalidad

		TRH 6	TRH 12	TRH 18	TRH 24
N		5	5	5	5
Parámetros normales	Media	65,090	77.816	89.469	96.739
	Desviación típica	1,605	1.4829	0.768	0.066
	Absoluta	0,237	0.268	0.394	0.229
Diferencias más extremas	Positiva	0,195	0,268	0.394	0.214
	Negativa	-0,237	-0,223	-0.281	-0.0229
Z de Kolmogorov-Smirnov		0,530	0.598	0.881	0.512
Sig. Asintót. (bilateral)		0,941	0.867	0.419	0.956

Fuente: elaboración propia

Tabla 9 Resumen de datos, para la prueba T de muestras relacionadas

		% Remoción DBO					Prueba de muestras relacionadas		
Par	TRH	Diferencias relacionadas					t	gl	Sig. (bilatera l)
		Media	σ	Error típ. media	95% Intervalo de confianza para la diferencia				
					Inferior	Superior			
1	12-6	12,73	2,87	1,28	9,16	16,29	9,907	4	0,001
2	18-6	24,38	1,33	0,60	22,72	26,03	40,891	4	0,000
3	24-6	31,65	1,58	0,71	29,69	33,61	44,825	4	0,000
4	18-12	11,65	1,86	0,83	9,34	13,96	13,993	4	0,000
5	24-12	18,92	1,49	0,67	17,07	20,78	28,345	4	0,000
6	24-18	7,27	0,75	0,33	6,34	8,20	21,705	4	0,000

 σ – desviación típica

Fuente: elaboración propia

8.9 ANÁLISIS DE CURVA DE REGRESIÓN DE PORCENTAJE DE REMOCIÓN VERSUS TRH

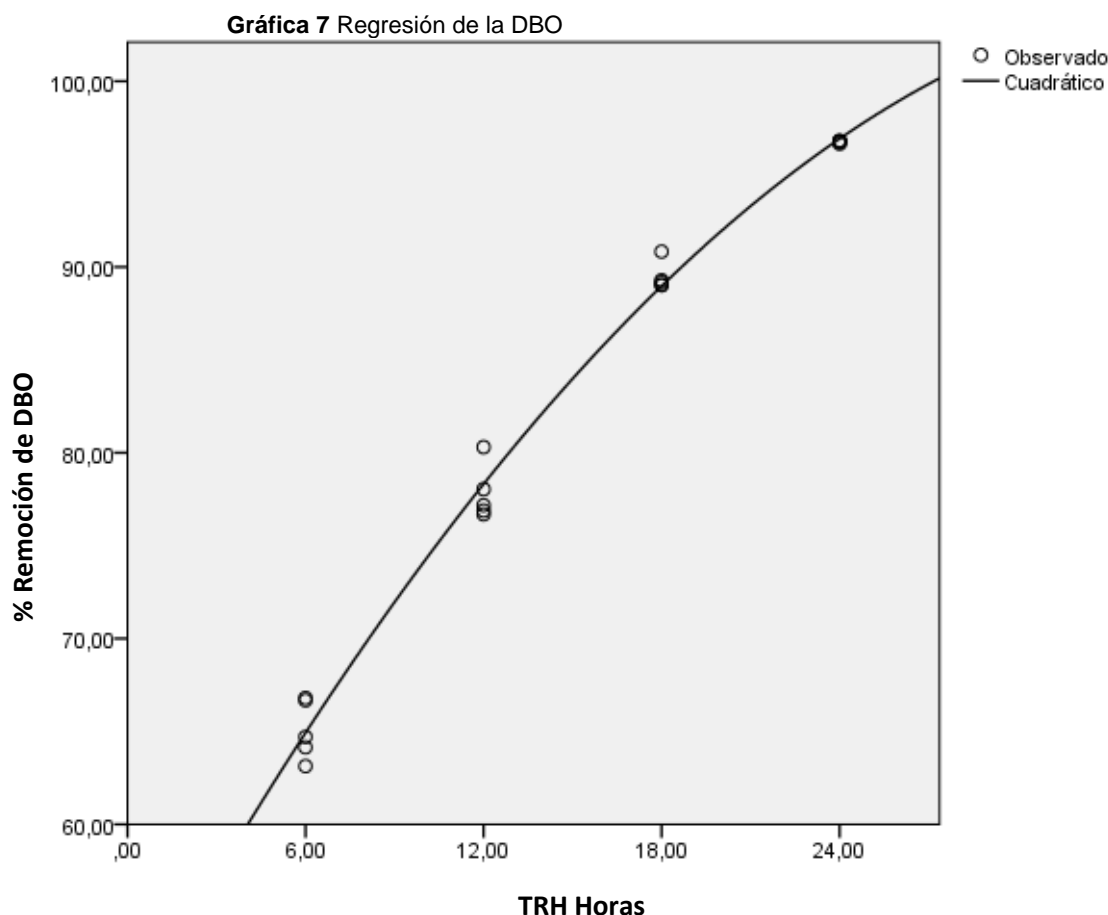
Tabla 10 Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros

Variable dependiente: % de remoción de DBO

Ecuación	Resumen del modelo					Estimaciones de los parámetros		
	R ²	F	gl1	gl2	Sig.	Constante	b1	b2
Cuadrático	0,992	1010	2	17	0,000	48,810	2,913	-0,038

La variable independiente es TRH.

Fuente: elaboración propia



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo al análisis estadístico (**Tabla 10**) los datos presentaron un mejor ajuste con la regresión cuadrática, **Gráfica 7**, las variables relacionadas son: en el eje X, el TRH, y para el eje Y, el porcentaje de remoción de DBO₅; obteniendo la siguiente ecuación:

$$Y = -0.0379X^2 + 2.9132X + 48.81$$

Es importante destacar que la ecuación es válida para valores de X en el rango de: $0 < X < 28$ horas; es de esperar que para un valor de $X = 0$ horas, el reactor no realice ninguna oxidación de la MO, pero para valores apenas mayores de 0 horas, el AR sintética se mezcla con el cuerpo de agua que ha estado depurando el RBC, lo cual permite una remoción cercana a 48.81%, desde otra perspectiva, para los X mayores o iguales a 28 horas, la remoción se encontrara por encima del 100%, lo cual hace descartar la validez de la ecuación para esos valores de X

Esta ecuación permite estimar la calidad del efluente a la salida del reactor para obtener la eficiencia de remoción en un determinado TRH. Para la anterior ecuación se obtuvo un coeficiente de correlación (R^2) que determina de algún modo la proporción de la variación explicada por la variable regresora X; el R^2 en el estudio fue de 0,992

donde existe una correlación positiva muy alta para el TRH y el porcentaje de remoción, cabe aclarar que la anterior regresión, sólo cumple para este reactor, bajo las mismas condiciones de pH, T° y OD; esta regresión es importante, ya que podría servir de referencia, para estimar el comportamiento de los RBC con discos de geotextil en el trópico y con ello mejorar los procesos y la operación.

8.10 TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICO

Los TRH evaluados presentaron un óptimo rendimiento, en términos de pH, los TRH de 6, 12, 18 y 24 horas tienen valores medios de 6.23, 6.64, 6.65 y 6.74 unidades de pH respectivamente, para los mismos TRH, los valores de DBO_5 en el efluente fueron 72.00, 43.80, 17.82 y 5.76 mg/L respectivamente, en términos de DQO, los valores medios fueron 102.00, 24.65, 33.95 y 5.45 mg/L para los TRH de 6, 12, 18 y 24 horas respectivamente, al comparar los resultados anteriores con la resolución 0631 de 2015, la cual establece que para vertimientos de ARD el pH debe estar entre 6-9 unidades, la DBO_5 de 90 mg/L o menos y la DQO con un valor menor o igual a 180 mg/L (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015), bajo esta resolución, todos los TRH cumplen los parámetros fisicoquímicos especificados para el vertimiento que exige el ministerio de ambiente, por tal motivo, se puede optar por emplear el TRH de 6 horas como el adecuado para el funcionamiento del RBC estudiado, este TRH, permite trabajar con una CH y CO en el afluente mucho mayores con respecto a los TRH de 12, 18 y 24 horas, cabe aclarar que estos TRH presentan mejores resultados en términos de la calidad del efluente, pero a mayores TRH, se presentan mayores costos energéticos en el funcionamiento del motor de los discos como de la bomba peristáltica, además que trabajan con caudales reducidos.

9 CONCLUSIONES

- El reactor RBC ha sido ampliamente usado para diferentes tipos de AR y constituye un tratamiento muy prometedor para estas; en cuanto a la evaluación del geotextil empleado como medio de soporte del biodisco, cumple a cabalidad cada uno de los objetivos para la remoción de MO. En el estudio se obtuvo el mejor desempeño en términos de DBO y DQO para el TRH de 24 horas con una remoción de 96,74% y 97,92% respectivamente, pero el TRH de 6 horas al cumplir con la normatividad, permite trabajar con CO mayores con respecto a los demás TRH.
- Con respecto al afluente, se presentan variaciones en las concentraciones de DBO₅, pero esto no afectó el funcionamiento del reactor. El AR sintética en términos de DBO₅ tuvo una clasificación intermedia entre baja y media según la caracterización de Tchobanoglous et al., (2003). A pesar de las fluctuaciones el reactor no presentó sobrecargas para cada uno de los TRH analizados, presentando un correcto funcionamiento.
- Utilizando diferentes TRH se alcanza significativamente una mayor eliminación de MO carbónacea para los mayores tiempos de contacto, influyendo en la eficiencia del sistema, esto evidencia los altos rendimientos obtenidos que alcanzan valores del 90% en términos de DQO, para TRH mayores o iguales a 12 horas, que son muy inferiores a los que requieren otro tipo de tecnologías como los humedales.
- La formación de la biopelícula durante la etapa experimental no fue uniforme, la variación se observó en la densidad de ésta en los discos, presentando mayor densidad a la entrada del reactor, disminuyendo a la salida del reactor, debido a que el agua ingresa con mayor CO y al continuar con su sentido de flujo, la carga contaminante disminuye.
- El rendimiento de eliminación de MO se ve altamente influenciado por parámetros como pH, T y OD, el último parámetro alcanza niveles de OD significativamente superiores a mayor TRH, este es un comportamiento directamente proporcional a la remoción de MO en función del incremento del OD presente en el reactor; del mismo modo, el pH tiene una tendencia cercana a la neutralidad conforme aumenta el TRH, esto favorece el crecimiento de los microorganismos que oxidan la MO, por último, la T regula el OD y el pH del reactor.
- Con la regresión cuadrática, se logra representar el comportamiento del reactor y estimar el porcentaje de remoción en función del TRH que se desea emplear, al tener un coeficiente de correlación de 0.99, se infiere que los datos obtenidos se ajustan de manera correcta para cada TRH, por ende, los valores que se

interpolan a partir de la regresión, tendrán un comportamiento cercano al esperado en el RBC.

10 RECOMENDACIONES.

La investigación se llevó a cabo en base a los estudios realizados con la tecnología de Biodiscos y usando el mismo reactor a escala de laboratorio:

Inicialmente, se evaluó la eficiencia de remoción del reactor en términos de MO (DBO₅ y DQO) para distintos materiales, después se continuó con el estudio de la remoción de los nutrientes presentes (Nitrógeno Amoniacal, Fósforo) y finalmente este estudio, para los tres casos, se usó la composición de agua residual sintética (**Tabla 2**) de Rodríguez Sánchez & Lozano-Rivas (2012), la cual simula un ARD, de acuerdo a lo anterior, es conveniente continuar con los estudios de esta tecnología, ya que es muy poca la información documentada que se ha encontrado para nuestro país, los RBC ofrecen buenos rendimientos para el tratamiento de ARD. Se recomienda realizar estudios con otro tipo de AR sintética o ARD, para mirar el comportamiento de la tecnología con diferentes afluentes. Por otro lado, a partir del estudio, surge la necesidad de tratar los lodos generados en el efluente, para su posterior tratamiento.

De continuar los estudios a escala de laboratorio, es recomendable realizar unos cambios en el reactor como: aumentar el número de etapas y discos, ya que se ha estado trabajando con una sola etapa de cuatro discos, en las nuevas etapas, se puede variar las profundidades de sumersión de los discos, logrando cambios en la población microbiana, con esto se puede remover la MO y nutrientes, con remociones bastante importantes. De acuerdo al análisis estadístico del literal 7, se puede evaluar el RBC a menores TRH de 24 horas ya que la remoción de DQO y DBO presentaron altas eficiencias para el TRH de 18 y 24 horas, y al aumentar el número de discos favorece la oxigenación, por ende, aumenta el porcentaje de remoción de MO.

Al continuar la línea investigativa con el RBC evaluado, se debe mejorar la geometría del tanque sobre el que reposan los discos, esta nueva forma debe ser curva, imitando la geometría circular sumergida de los discos de geotextil, esto con el fin de facilitar la extracción de lodos del RBC, así como también, contar con mayor profundidad en el tanque, para mejorar procesos de sedimentación, lo cual ayudaría a disminuir área superficial en el momento de construcción de este reactor, ya que a escala real, el RBC necesita un sedimentador secundario.

En el presente estudio, el área ocupada por la biopelícula por cara de disco fue de 0,0667 m², demostrando buenas eficiencias de remoción, motivo por el cual, con fines de abaratar costos de construcción se debe construir el RBC, teniendo en cuenta que los discos, solo deben tener el geotextil necesario para ocupar el área de biopelícula deseada para la remoción.

Se debe medir la alcalinidad y acidez, como la concentración del hidróxido de sodio del medio en varios TRH para evaluar el comportamiento del pH en el efluente, y de esta manera poder afirmar el motivo por el cual, el pH tiende a pasar de básico a

neutro, no es necesario controlar el pH del afluente dado a que el RBC funciona como sistema amortiguador.

Para futuros estudios, se debe realizar la caracterización microbiológica de la biopelícula en los discos del geotextil, y variar la velocidad de giro de los biodiscos, como también ajustar la curva de carga orgánica.

11 BIBLIOGRAFÍA

- Abou-Elela, S. I., & Hellal, M. S. (2012). Municipal wastewater treatment using vertical flow constructed wetlands planted with Canna, Phragmites and Cyprus. *Ecological Engineering*, 47, 209–213. <http://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.06.044>
- Agua, S. I. de la gectcion del. (2015). Núcleos de Población, (3). Retrieved from <http://servicios2.marm.es/sia/visualizacion/descargas/mapas.jsp>
- Alleman, J. E., Veil, J. A., & Canaday, J. T. (1982). Scanning electron microscope evaluation of rotating biological contactor biofilm. *Water Research*, 16(5), 543–550. [http://doi.org/10.1016/0043-1354\(82\)90074-4](http://doi.org/10.1016/0043-1354(82)90074-4)
- Aristizábal, J. D. P. (2010). Trabajo de grado juan david pérez aristizábal, 1–185.
- Beatr z, A., Alejandra, Y., & Alberto, J. (2004). La biopelícula en los procesos RBC, (1978), 1–17.
- Becerra, E. N. (2001). Procesos biológicos aplicados al tratamiento de agua residual. *INGENIERÍA HIDRÁULICA Y AMBIENTAL*, XXII(4), 52–56.
- Behling, E., Marín, J. C., Chirinos, A., Lizardo, N. R., Andrade, G. C., & Mesa, J. (2012). Influencia De La Carga Orgánica Sobre La Eficiencia De Reactores Rbc De Tres Etapas En El Tratamiento De Un Efluente. *Uma  tica Para Quantos?*, XXXIII(2), 81–87. <http://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>
- Behling, E., Marín, J. C., Gutiérrez, E., & Fernández, N. (2003). Tratamiento aeróbico de dos efluentes industriales utilizando reactores biológicos rotativos de contacto. *Multiciencias. Núcleo Punto Fijo. Universidad Del Zulia*, 3(2), 3–10.
- Behling, E., Rincón, N., Díaz, A., & Marín, J. (2008). Tratamiento Biológico De Aguas Residuales Industriales: Efluente Camaronero En Reactores. *Historia*, 42(2), 291–298.
- Behling, E., Weffer, G., Marín, J., Colina, G., Rincón, N., Díaz, A., & Fernández, N. (2005). Tratamiento De Un Efluente Sintético De Glucosa Y Fenol En Un Reactor Biológico Rotativo De Contacto, (3), 277 – 292.
- Bezanilla, J. A. (1993). Depuración De Aguas Residuales En Un Contactor Biológico Rotativo Con Alternancia En El Sentido Del Flujo, 1, 1–197.
- Borges, C., Elba, R., Rojas, B., Novelo, M., Roger, I., Rodríguez, O., ... Novelo, R. I. M. (2012). Remoción de materia orgánica en aguas residuales de rastro por el proceso de Contactor Biológico Rotacional. *Ingeniería*, 16(2), 83–91.
- Borges, E., Ocampo, B., Novelo, R., Arturo, S., & Franco, C. (2013). Tratamiento de efluentes de fosas sépticas mediante el uso de un sistema de contactor biológico rotatorio.
- CAF. (2011). La Infraestructura en el Desarrollo Integral de América Latina Agua potable y saneamiento, 9–16.
- Cereceda, M., Serrano, S., & Guinea, A. (2000). Biofilm communities and operational monitoring of a rotating biological contactor system. *Water, Air, and Soil Pollution*, 126(3-4), 193–206. <http://doi.org/10.1023/A:1005291015122>

- Chen, Z., Wen, Q., Wang, J., & Li, F. (2006). Simultaneous removal of carbon and nitrogen from municipal-type synthetic wastewater using net-like rotating biological contactor (NRBC). *Process Biochemistry*, 41(12), 2468–2472. <http://doi.org/10.1016/j.procbio.2006.06.003>
- Comisión Nacional del Agua Mexico. (2007). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Retrieved from www.conagua.gob.mx
- Delgadillo, O., Camacho, A., & Serie, M. A. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. Cochabamba. Retrieved from http://www.infoandina.org/sites/default/files/publication/files/depuracion_de_aguas_residuales_por_medio_de_humedales_artificiales.pdf \n<http://www.aguasresiduales.info/revista/libros/depuracion-de-aguas-residuales-por-medio-de-humedales-artificiales>
- Douglas B. Spengel, D. A. D. (1991). Treatment of Landfill Leachate with Rotating Biological Contactors: Bench-Scale Experiments. *Research Journal of the Water Pollution Control Federation*, 63(7), 971–981. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/25044095>
- Eduardo, F., & López, D. (2008). Tratamiento de aguas residuales mediante lodos activados a escala laboratorio Sewage treatment by activated sludge at laboratory scale, (2), 21–28.
- Erazo, L. F., & Gomez, L. F. (2015). Evaluación De La Eficiencia De Remoción De Nitrógeno Y Fósforo En Un Reactor De Contactores Biológicos Rotativos (RBC), A Escala De Laboratorio, Suministrado Con Agua Residual Sintética, 2.
- Fountoulakis, M. S., Terzakis, S., Chatzinotas, A., Brix, H., Kalogerakis, N., & Manios, T. (2009). Pilot-scale comparison of constructed wetlands operated under high hydraulic loading rates and attached biofilm reactors for domestic wastewater treatment. *Science of the Total Environment*, 407(8), 2996–3003. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.01.005>
- Ghizellaoui, S., & Ghizellaoui, S. (2010). Evaluation of the quality of waters treated by the activated muds station in Oued El Athmania. *Desalination*, 250(1), 438–443. <http://doi.org/10.1016/j.desal.2009.09.074>
- Gil-Rodríguez, M. (2006). Eliminación biológica de amonio y materia orgánica en la potabilización de aguas. *Revista Internacional de Métodos Numéricos Para Cálculo Y Diseño En Ingeniería*, 22, 427–436.
- Griffin, P., & Findlay, G. E. (2000). Process and engineering improvements to rotating biological contactor design. *Water Science and Technology*, 41(1), 137–144.
- Hassard, F., Biddle, J., Cartmell, E., Jefferson, B., Tyrrel, S., & Stephenson, T. (2015). Rotating biological contactors for wastewater treatment - A review. *Process Safety and Environmental Protection*, 94(C), 285–306. <http://doi.org/10.1016/j.psep.2014.07.003>
- Henze, M., Harremoës, P., la Cour Jansen, J., & Arvin, E. (1997). *Wastewater treatment Biological and chemical processes*. *Environmental Engineering*.

<http://doi.org/10.1007/978-3-662-22605-6>

- Lazcano, P. F. (2013). Tratamiento del agua residual generada en un edificio mediante contactores biológicos rotatorios, 1–94.
- Malachova, K., Rybkova, Z., Sezimova, H., Cerven, J., & Novotny, C. (2013). Biodegradation and detoxification potential of rotating biological contactor (RBC) with *Irpex lacteus* for remediation of dye-containing wastewater. *Water Research*, 47(19), 7143–7148. <http://doi.org/10.1016/j.watres.2013.07.050>
- Mata, L. A. (2012). Empleo de biodiscos en el tratamiento de aguas residuales generadas en un edificio de Ciudad Universitaria.
- Mendenhall, W., Beaver, R., & Beaver, B. (2010). *Introducción a la probabilidad y estadística* (13th ed.). Retrieved from http://investigadores.cide.edu/aparicio/data/refs/Mendenhall_Prob_Estadistica_13.pdf
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). Resolución 0631 de 2015. 17 De Marzo. Retrieved from http://www.fenavi.org/images/stories/estadisticas/article/3167/Resolucion_0631_17_marzo_2015.pdf
- MINISTERIO DE AMBIENTE, V. Y. D. T. (2004). Plan nacional de manejo de aguas residuales en Colombia. *Vasa*, 1–36. Retrieved from <http://medcontent.metapress.com/index/A65RM03P4874243N.pdf>
- Molina, J. D., & Montenegro, L. M. (2015). Evaluación de un Reactor de Contactores Biológicos Rotativos con Discos de Material no Convencional Para el Tratamiento de Aguas Residuales a Escala de Laboratorio, 1.
- Montgomery, D. C., Peck, E. A., & Vining, G. G. (2001). *Introduction to Linear Regression Analysis. Technometrics* (Vol. 49). <http://doi.org/10.1198/tech.2007.s499>
- Najafpour, G., Yieng, H. A., Younesi, H., & Zinatizadeh, A. (2005). Effect of organic loading on performance of rotating biological contactors using Palm Oil Mill effluents. *Process Biochemistry*, 40(8), 2879–2884. <http://doi.org/10.1016/j.procbio.2005.01.002>
- Navarro, A. F., Albertario, M. E., & Palladino, L. A. (2005). Influencia del área de discos y volumen de pileta en La operación de un sistema de biodiscos, 1–7.
- Nowak, O. (2000). Upgrading of wastewater treatment plants equipped with rotating biological contactors to nitrification and P removal. *Water Science and Technology*, 41(1), 145–153.
- Ordóñez, P. J., & Perez, A. B. (2013). Estudio Preliminar Para El Tratamiento De Lixiviados En Un Reactor De Biodiscos. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699. <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Padhi, S. K., & Gokhale, S. (2016). International Biodeterioration & Biodegradation Benzene control from waste gas streams with a sponge-medium based rotating biological contactor. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 109, 96–103. <http://doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.01.007>

- Pakshirajan, K., & Kheria, S. (2012). Continuous treatment of coloured industry wastewater using immobilized *Phanerochaete chrysosporium* in a rotating biological contactor reactor. *Journal of Environmental Management*, 101, 118–123. <http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.02.008>
- Pariante, M. I., Siles, J. A., Molina, R., Botas, J. A., Melero, J. A., & Martinez, F. (2013). Treatment of an agrochemical wastewater by integration of heterogeneous catalytic wet hydrogen peroxide oxidation and rotating biological contactors. *Chemical Engineering Journal*, 226, 409–415. <http://doi.org/10.1016/j.cej.2013.04.081>
- Rodríguez Sánchez, I. M., & Lozano-Rivas, W. A. (2012). Preparación, Composición y Uso de Agua Residual Sintética Para Alimentación de Reactores Prototipo y de Laboratorio. *Revista de Didáctica Ambiental*, (JUNE 2012), 10–16.
- Romero, J. (2008). TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES, Teoría y principios de diseño. Escuela Colombiana de Ingeniería. Colombia. (p.p. 38,54, 609-610)
- SSPD. (2012). *Informe Técnico Sobre Sistemas De Tratamiento De Aguas Residuales En Colombia. Línea Base 2010*. Bogotá. Retrieved from <http://www.superservicios.gov.co/content/download/4989/47298/version/1/file/Informe+Técnico+sobre++Sistemas+de+Tratamiento++de+Aguas+Residuales.pdf>
- Tchobanoglous, G., Burton, F. L., & Stensel, H. D. (2003). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse. Metcalf & Eddy, Inc. Engineering* (Vol. 4). Retrieved from <http://www.amazon.com/dp/007124140X>
- Torres, P., Vásquez, N., Vidal, A. P., Parra, C. A. M., Rodríguez, J. A., Ingeniería, E. De, & Naturales, D. R. (2011). Alternativas de tratamiento biológico aerobio para el agua residual doméstica del municipio de Cali, Colombia, 381–388.
- Velp, S. (2009). Sistema D.B.O. Demanda Bioquímica de Oxígeno. Retrieved from <http://www.ictsl.net/downloads/d.b.o.digitalcastellano.pdf>

ANEXO A. NOTACIÓN Y SÍMBOLOS

AL= América Latina.

AR= Agua Residual.

ARD=Agua Residual Domestica

CH = Carga hidráulica afluente (m/d)

CO = Carga orgánica (g DQO/m².d)

CO₂= Dióxido de Carbono EUA= Estados Unidos de América

DBO = Demanda bioquímica de oxígeno.

DBO A= Demanda biológica de oxígeno Afluente (mg DBO₅/L)

DBO E= Demanda biológica de oxígeno Efluente (mg DBO₅/L)

DQO = Demanda química de oxígeno

DQO A = Demanda química de oxígeno afluente (mg DQO/L).

DQO E = Demanda química de oxígeno efluente (mg DQO/L).

E = Eficacia (%).

EUA= Estados Unidos de América

GIRH= Gestión Integral de Recursos Hídricos

MO=Materia Orgánica

OD = Oxígeno disuelto (mg/L)

ODa = Oxígeno disuelto afluente (mg/L).

ODe = Oxígeno disuelto efluente (mg/L).

pHa = pH afluente.

pHe = pH efluente

PE= Población Equivalente

PTAR= Planta de Tratamiento de Agua Residual

Q = Caudal (L/d).

RBC= Rotating Biological Contactors o Contactor biológico rotativo.

SSPD=Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios.

SST= Sólidos Suspendidos Totales.

STAR= Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales.

T= Temperatura

T A= Temperatura Afluente (°C)

T E= Temperatura Efluente (°C)

TRH= Tiempo de Retención Hidráulico (horas)

UASB= *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* o Reactor anaerobio de flujo ascendente

ANEXO B. EXPRESIONES USADAS

La expresión utilizada para calcular la eficiencia de remoción de DBO₅ en función de:

$$\eta: \frac{S_o - S_i}{S_o} * 100$$

Ecuación 1.

Dónde:

η : Eficiencia %.

S_o = DBO₅ Afluente (mg/l).

S_i = DBO₅ Efluente (mg/l).

Para determinar la CH y CO se emplearon las siguientes expresiones.

$$CH: \frac{Q}{A}$$

Ecuación 2.

Dónde:

CH = Carga hidráulica (m³/m²*día)

Q = Caudal o Gasto (m³/día)

A = Área del biodisco (m²)

El cálculo de la carga orgánica se define como:

$$CO = \frac{Q * \delta O}{A}$$

Ecuación 3.

Dónde:

CO= Carga Orgánica (g DBO/m²*d)

Q = Caudal o Gasto (m³/día)

S_o = Concentración de la DBO del influente (g/m³)

A = Área del biodisco (m²)

Para hallar el TRH se empleó la siguiente ecuación:

$$\theta = \frac{Q}{V}$$

Ecuación 4.

Dónde:

Θ = Tiempo de retención hidráulico

Q = Gasto (m³/h)

V = Volumen del CBR

ANEXO C. METODOLOGÍA EMPLEADA PARA LA DBO₅

La botella a emplear para la medición de DBO, se lava con jabón y agua fría, se esteriliza con agua a alta temperatura, luego se lava con agua destilada.

El volumen de muestra se recoge en una pipeta volumétrica y se pasa a la botella (dentro se encuentra una barra agitadora), enseguida se agrega el inóculo, y esta muestra se pone a airear durante 30 min, al cumplir el tiempo, se coloca un tapón hermético en el cuello de la botella, para agregar hidróxido de sodio o soda cáustica en el interior del tapón hermético.

Después se sella la botella con el sensor de DBO de VELP SCIENTIFICA F102B0133, de antemano se ponen las pilas, este sensor, en la parte superior tiene una pantalla pequeña y dos teclas. Se presiona la tecla izquierda (A) para elegir el rango de la prueba, se pone la botella en la base del agitador, esta base se encuentra en la incubadora a 20 ± 1 °C (68 ± 1 °F), ambos se encuentran conectados a la corriente. Repita los anteriores pasos para las demás muestras.

Finalmente, se debe esperar *1 hora* (esto se hace con el fin de que el aire, en el interior de la botella, alcance un equilibrio termodinámico), se presiona la tecla derecha (B) para empezar la *recolección de datos*.

Los resultados para cada día se muestran en la pantalla del DBO de VELP SCIENTIFICA F102B0133, dejando presionado B por al menos 3 segundos, luego seleccionar el rango de la DBO con A y visualizar la lectura con B.

Se debe asegurar de que todas las barras agitadoras están rotando. Si no, levante la botella y colóquela de nuevo en su posición.

ANEXO D. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Tabla 11 Variación de los parámetros en el RBC para cada TRH

	TRH	pH A Unidades	pH E Unidades	T. A °C	T. E °C	OD A mg/L	OD E mg/L
20/11/2015	24	5,07	6,41	22,7	21,4	2,24	7,01
24/11/2015		5,52	6,54	22,4	21,2	2,93	6,89
25/11/2015		5,36	6,68	22,8	21,4	2,28	6,66
26/11/2015		5,54	7,02	22,4	21,5	2,41	6,64
27/11/2015		5,58	7,06	22,6	21,3	2,95	6,76
30/01/2016	18	4,87	6,87	21,9	21,3	1,67	5,87
31/01/2016		4,57	6,55	22,2	21,1	1,47	5,73
01/02/2016		4,81	6,4	21,8	21	1,82	5,65
02/02/2016		5,29	6,97	21,5	20,8	1,76	6,27
03/02/2016		4,87	6,45	22	21,1	1,58	6,44
09/02/2016	12	4,8	6,86	21,7	20,7	0,64	6,24
10/02/2016		4,56	6,66	22,3	21,4	0,71	5,93
11/02/2016		4,82	6,83	22,7	21,8	0,91	5,7
12/02/2016		4,45	6,49	21,4	20,2	0,82	5,26
13/02/2016		4,51	6,38	21,8	20,8	0,71	6,06
18/02/2016	6	5,27	6,25	22,7	22,2	1,3	3,34
18/02/2016		5,52	6,5	22,7	22	1,5	3,34
19/02/2016		4,66	6,05	22,1	22,6	1,57	3,48
19/02/2016		5,05	6,17	22,3	22,9	1,63	3,56
20/02/2016		5,16	6,2	21,8	22,4	1,75	3,85

Fuente: Elaboración propia

Tabla 12 Eficiencia de remoción de DBO₅

	TRH	DBO ₅ A mg/L	DBO ₅ E mg/L	EFICIENCIA %
20/11/2015	24	168	5,4	96,7857
24/11/2015		187	6	96,7914
25/11/2015		179	5,8	96,7597
26/11/2015		184	6,2	96,6304
27/11/2015		165	5,4	96,7272
30/01/2016	18	169	15,5	90,8284
31/01/2016		164	18	89,0244
01/02/2016		175	19,2	89,0286
02/02/2016		170	18,4	89,1765
03/02/2016		168	18	89,2857
09/02/2016	12	184	42	77,1739
10/02/2016		193	45	76,6839
11/02/2016		198	39	80,3030
12/02/2016		214	47	78,0374
13/02/2016		199	46	76,8844
18/02/2016	6	241	80	66,8050
18/02/2016		189	63	66,6667
19/02/2016		217	80	63,1336
19/02/2016		187	66	64,7059
20/02/2016		198	71	64,1414

Fuente: Elaboración propia

Tabla 13 Comportamiento de la DQO en el RBC para cada TRH

Fecha	TRH horas	DQO A mg/L	DQO E mg/L	EFICIENCIA %	EFICIENCIA PROMEDIO %
24/11/2015	24	249	6	97,59	97,92
25/11/2015		280	4,9	98,25	
02/02/2016	18	425	38,4	90,965	92,19
03/02/2016		448	29,5	93,415	
09/02/2016	12	280	17,9	93,607	92,16
10/02/2016		338	31,4	90,71	
18/02/2016		461	103	77,657	
19/02/2016	6	353	101	71,388	74,52

Fuente: Elaboración propia

Tabla 14 Comportamiento de la CH y CO

	TRH	CH A m ³ /m ² /d	CH E m ³ /m ² /d	CO A g/m ² /d	CO E g/m ² /d
20/11/2015	24	0,094	0,076	3,435	0,089
24/11/2015		0,093	0,075	3,770	0,098
25/11/2015		0,093	0,076	3,609	0,096
26/11/2015		0,096	0,078	3,842	0,104
27/11/2015		0,094	0,077	3,374	0,09
30/01/2016	18	0,120	0,100	4,38	0,335
31/01/2016		0,121	0,103	4,298	0,402
01/02/2016		0,12	0,102	4,536	0,423
02/02/2016		0,118	0,100	4,357	0,40
03/02/2016		0,119	0,098	4,33	0,384
09/02/2016	12	0,173	0,153	6,889	1,391
10/02/2016		0,171	0,151	7,170	1,471
11/02/2016		0,173	0,151	7,413	1,28
12/02/2016		0,174	0,153	8,074	1,557
13/02/2016		0,172	0,151	7,422	1,51
18/02/2016	6	0,325	0,306	17,005	5,299
18/02/2016		0,323	0,301	13,254	4,110
19/02/2016		0,325	0,304	15,312	5,276
19/02/2016		0,327	0,306	13,249	4,372
20/02/2016		0,327	0,307	14,056	4,723

Fuente: Elaboración propia

ANEXO E. RESULTADOS ESTADÍSTICOS CON EL PROGRAMA SPSS

Tabla 15 Estadísticos de control fisicoquímicos Afluente

		OD	T	pH
N	Válidos	20	20	20
	Perdidos	0	0	0
	Media	1,63	22,19	5,01
	Desv. típ.	0,68	0,44	0,37
	Varianza	0,47	0,19	0,14
	Mínimo	0,64	21,4	4,45
	Máximo	2,95	22,8	5,58

Fuente: Elaboración propia

Tabla 16 Estadísticos de control fisicoquímicos TRH 6

		OD	T	pH
N	Válidos	5	5	5
	Perdidos	0	0	0
	Media	3,51	22,42	6,23
	Desv. típ.	0,21	0,35	0,16
	Varianza	0,04	0,12	0,028
	Mínimo	3,34	22,0	6,05
	Máximo	3,85	22,9	6,50

Fuente: Elaboración propia

Tabla 17 Estadísticos de control fisicoquímicos TRH 12

		OD	T	pH
N	Válidos	5	5	5
	Perdidos	0	0	0
	Media	5,84	20,98	6,64
	Desv. típ.	0,38	0,63	0,21
	Varianza	0,14	0,39	0,04
	Mínimo	5,26	20,2	6,38
	Máximo	6,24	21,8	6,86

Fuente: Elaboración propia

Tabla 18 Estadísticos de control fisicoquímicos TRH 18

		OD	T	pH
N	Válidos	5	5	5
	Perdidos	0	0	0
	Media	5,99	21,06	6,65
	Desv. típ.	0,34	0,18	0,26
	Varianza	0,12	0,03	0,07
	Mínimo	5,65	20,8	6,40
	Máximo	6,44	21,3	6,97

Fuente: Elaboración propia

Tabla 19 Estadísticos de control fisicoquímicos TRH 24

		OD	T	pH
N	Válidos	5	5	5
	Perdidos	0	0	0
	Media	6,79	21,36	6,74
	Desv. típ.	0,16	0,11	0,29
	Varianza	0,02	0,01	0,08
	Mínimo	6,64	21,2	6,41
	Máximo	7,01	21,5	7,06

Fuente: Elaboración propia

Tabla 20 Estadísticos para MO TRH 6

		DBO ₅ A	DBO ₅ E	η DBO ₅	DQO A	DQO E	η DQO
N	Válidos	5	5	5	2	2	2
	Perdidos	0	0	0	3	3	3
	Media	206,40	72,00	65,09	407,00	102,00	74,52
	Desv. típ.	22,69	7,842	1,60	76,37	1,41	4,43
	Varianza	514,80	61,50	2,58	5832,00	2,00	19,65
	Mínimo	187,0	63,0	63,13	353,0	101,0	71,39
	Máximo	241,0	80,0	66,80	461,0	103,0	77,66

Fuente: Elaboración propia

Tabla 21 Estadísticos para MO TRH 12

		DBO ₅ A	DBO ₅ E	η DBO ₅	DQO A	DQO E	η DQO
N	Válidos	5	5	5	2	2	2
	Perdidos	0	0	0	3	3	3
	Media	197,60	43,80	77,82	309,00	24,65	92,16
	Desv. típ.	10,92	3,27	1,48	41,01	9,54	2,05
	Varianza	119,30	10,70	2,20	1682,00	91,12	4,19
	Mínimo	184,0	39,0	76,68	280,0	17,9	90,71
	Máximo	214,0	47,0	80,30	338,0	31,4	93,61

Fuente: Elaboración propia

Tabla 22 Estadísticos para MO TRH 18

		DBO ₅ A	DBO ₅ E	η DBO ₅	DQO A	DQO E	η DQO
N	Válidos	5	5	5	2	2	2
	Perdidos	0	0	0	3	3	3
	Media	169,20	17,82	89,47	436,50	33,95	92,190
	Desv. típ.	3,96	1,39	0,77	16,26	6,29	1,73
	Varianza	15,70	1,92	0,59	264,50	39,60	3,00
	Mínimo	164,0	15,5	89,02	425,0	29,5	90,96
	Máximo	175,0	19,2	90,82	448,0	38,4	93,41

Fuente: Elaboración propia

Tabla 23 Estadísticos para MO TRH 24

		DBO ₅ A	DBO ₅ E	η DBO ₅	DQO A	DQO E	η DQO
N	Válidos	5	5	5	2	2	2
	Perdidos	0	0	0	3	3	3
	Media	176,60	5,76	96,74	264,50	5,45	97,92
	Desv. típ.	9,71	0,36	0,06	21,92	0,78	0,47
	Varianza	94,30	0,12	0,004	480,50	0,60	0,22
	Mínimo	165,0	5,4	96,63	249,0	4,9	97,59
	Máximo	187,0	6,2	96,79	280,0	6,0	98,25

Fuente: Elaboración propia

Tabla 24 Estadísticos para CO

TRH		6	12	18	24
N	Válidos	5	5	5	5
	Perdidos	0	0	0	0
	Media	4,76	1,44	0,39	0,09
	Desv. típ.	0,53	0,11	0,03	0,01
	Varianza	0,28	0,01	0,001	$3 \cdot 10^{-5}$
	Mínimo	4,11	1,28	0,34	0,09
	Máximo	5,30	1,56	0,42	0,10

Fuente: Elaboración propia

ANEXO F. FASE DE ACLIMATACIÓN Y OPERACIÓN DEL RBC.

Figura 5 Puesta en marcha del reactor.

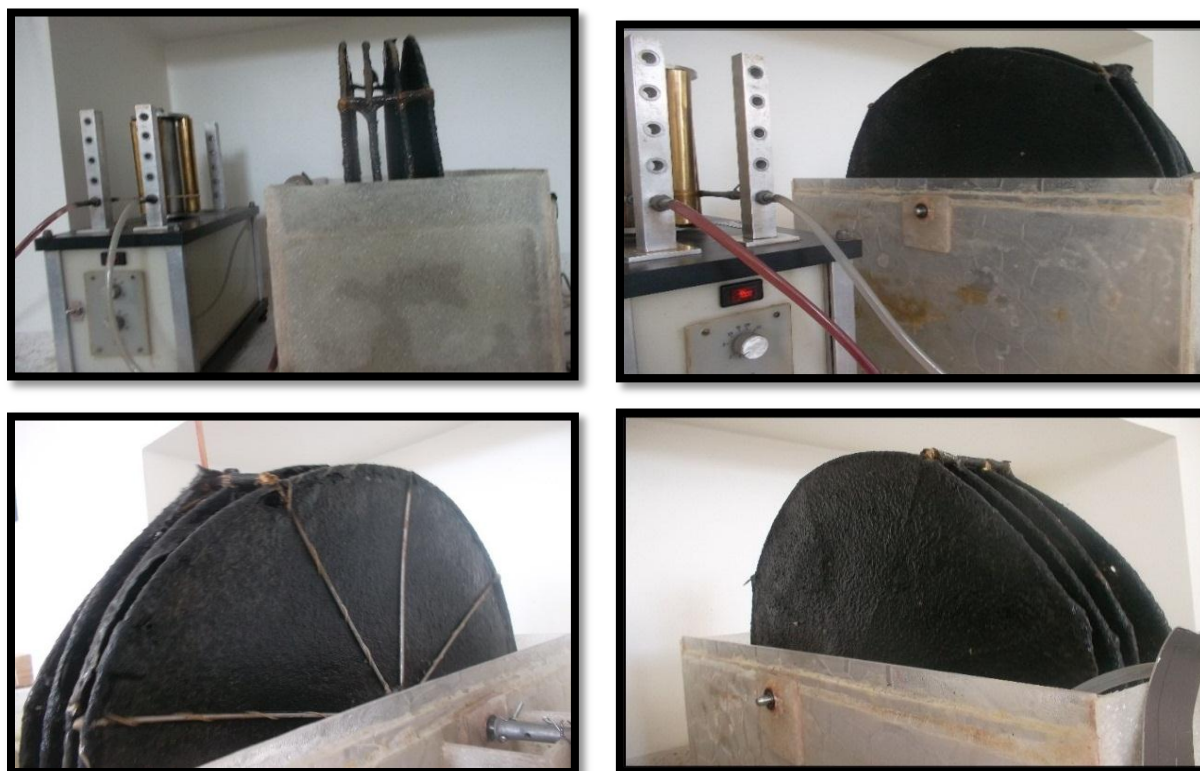


Figura 6 Etapa de Latencia de la Biopelícula



Figura 7 Etapa de crecimiento Exponencial de la Biopelícula



Figura 8 Etapa de desarrollo y estabilización de la Biopelícula

