

**ESTUDIO DE UN REACTOR ANAERÓBICO DE PLACAS VERTICALES  
PARALELAS EN ACRÍLICO Y FLUJO ASCENDENTE**

**Trabajo de grado**

**Documento final presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Ambiental**

**Danharry A. Martínez I.**

**Darío Fernando Burbano**

**Director**

**GUILLERMO CHAUX FIGUEROA**

**Ingeniero Civil**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA**

**PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL, GIIA**

**POPAYÁN**

**JUNIO DE 2007**

## 1. INTRODUCCIÓN

En términos generales se puede afirmar que en el Departamento del Cauca existen grandes deficiencias frente al manejo adecuado de los residuos líquidos municipales, agroindustriales y la escorrentía superficial urbana. Esta situación es una de las principales causas de diferentes problemas tales como las afecciones sobre la salud humana, la contaminación de las corrientes superficiales, pérdida de diversidad íctica y limnológica, mayores costos en la potabilización y deterioro del paisaje, lo que motiva el compromiso inmediato por parte de los actores responsables para adelantar acciones de solución frente al tema.

Alrededor de 10 Municipios del Departamento tienen sistemas de tratamiento consistentes en Unidades de Sedimentación primaria y filtros anaeróbicos como tratamientos biológicos, la mayoría de estos filtros tienen piedra como medio soporte y algunos han presentado dificultad para su arranque inicial, problemas de obstrucción, deterioro del medio , dificultad para el retiro de lodos y altos costos del mismo.

Mediante la presente investigación, se explora la eficiencia de un sistema alternativo de filtración anaeróbica, donde el relleno consiste en placas paralelas verticales en acrílico, medio que minimiza los problemas de obstrucción y brinda la posibilidad de reemplazo del mismo para mayor facilidad en la operación y mantenimiento del reactor.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GENERAL**

Evaluar la eficiencia de remoción de parámetros fisicoquímicos y biológicos de un reactor anaeróbico montado a escala de laboratorio, utilizando como medio de soporte placas paralelas en acrílico para tratar aguas residuales.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Estudiar la variabilidad de la eficiencia de remoción de sólidos suspendidos totales, DBO y DQO durante el periodo de arranque del filtro.

Evaluar la eficiencia de remoción del reactor con respecto a demanda bioquímica de oxígeno ( $DBO_5$ ), demanda química de oxígeno (DQO) y sólidos suspendidos totales.

Comparar las eficiencias de remoción en dos puntos de muestreo a diferentes alturas del filtro (90 cm y 180 cm respectivamente).

Evaluar la influencia de parámetros como: Temperatura, pH, y tiempo de retención del flujo en el filtro.

### 3. JUSTIFICACIÓN

En el año 2002, existían 237 plantas de tratamiento de aguas residuales construidas en 235 municipios (21,7% del total de municipios del país), que trataban cerca del 8% de los vertimientos producidos por éstos (Documento CONPES 3177 de 2002).

Un informe mas detallado (Mindesarrollo, 2003), específico para aguas residuales domésticas, revela que solamente cuatro grandes ciudades tienen solucionado el problema de manera parcial, ya que los sistemas construidos en estas solo cubren un 30% de la población, con un alcance de tratamiento primario en Cali y Bogotá, y tratamiento secundario en Medellín. De igual modo cuentan con PTAR:

- 9 de las 33 ciudades con más de 100000 habitantes (27% de cobertura).
- 3 de las 16 ciudades que tienen entre 70000 y 100000 Habitantes (19% de cobertura).
- 44 de los 171 Municipios con poblaciones entre 12500 y 60000 habitantes (26% de Cobertura).
- 75 de los 846 municipios con poblaciones menores de 12500 habitantes (9% de cobertura).

Según esto, solamente 133 de los 1070 Municipios cuentan con PTAR, lo cual implica una cobertura del 12%.

Pero el problema no solo es de cobertura: Los datos del funcionamiento de plantas de aguas residuales en Colombia, son muy dispersos debido a limitaciones en los diseños, errores en la construcción, inadecuado monitoreo, inadecuada

preparación del personal operativo y falta de experiencia en proyectos de tratamiento de aguas residuales (Peña, 2002).

En el departamento del Cauca no son pocos los proyectos de tratamiento de aguas residuales que se están llevando a cabo, sin embargo muchos de ellos consisten únicamente en la importación de tecnología, dejando de lado aspectos tan importantes como lo son la evaluación, adaptación y desarrollo de la misma en las condiciones específicas de nuestra región (Penagos, CRC 2002).

Más de 10 Municipios del Departamento del Cauca (Ver tabla 1), tienen filtros anaeróbicos con medio de piedra como sistema de tratamiento biológico de aguas residuales y la mayoría han presentado dificultad para su arranque inicial, problemas de obstrucción, deterioro del medio, dificultad para el retiro de lodos y altos costos del mismo (Penagos, CRC 2002).

Tabla 1. Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales del Departamento del Cauca.

	Municipio	Población año 2005	Carga per cápita	Carga total DBO (kg/día)	Tecnología de tratamiento
1	Corinto	16,620	0.042	698	LAGUNAS
2	Suárez	10,002	0.042	420	TS - FAFA
3	Silvia	7,467	0.042	314	TS - Filtro Percolador
4	Caloto	6,455	0.042	271	TS - FAFA
5	Puracé	4,840	0.042	203	TS - FAFA
6	Padilla	4,480	0.042	188	LAGUNAS
7	Morales	4,072	0.042	171	TS - FAFA
8	Toribío	3,908	0.042	164	TS - FAFA
9	Caldono	3,494	0.042	147	TS - FAFA
10	Cajibío	3,313	0.042	139	TS - FAFA
11	El tambo	3,029	0.042	127	TS - FAFA
12	Buenos Aires	2,121	0.042	89	TS - FAFA
13	Jambaló	1,971	0.042	83	TS - FAFA
14	Totoró	1,876	0.042	79	TS - FAFA
	TOTAL	73,648		3,093	

Fuente CRC

Las razones planteadas, justifican la búsqueda de soluciones alternas de Tratamiento que minimicen los problemas de obstrucción, y faciliten la operación y el mantenimiento, por ello, en la presente investigación se evaluó un filtro anaeróbico que en vez de piedra utiliza placas de acrílico como medio de soporte, el cual no presentó problemas de obstrucción y generó procesos simples de operación y mantenimiento, como alternativa de tratamiento para los desechos líquidos domésticos de pequeñas comunidades.

## 4. MARCO TEÓRICO

En un proceso anaeróbico, la materia orgánica, principal contaminante presente en las aguas residuales, se convierte mediante procesos biológicos en productos amigables con el ambiente como el metano y el dióxido de carbono, (Castaño Rojas, 2003), transformación que se realiza en las siguientes etapas:

### HIDRÓLISIS

Etapa llevada a cabo por bacterias hidrolíticas cuyas enzimas extracelulares (polisacaridas, proteasas y lipasas) rompen los enlaces de los compuestos poliméricos presentes en las aguas residuales (como carbohidratos, proteínas, grasas, etc.) transformándolos en compuestos solubles más simples (como azúcares, aminoácidos y alcoholes) de tal manera que puedan servir como fuente de energía y carbono celular (Madigan, 1997).

### ACIDOGÉNESIS

Etapa llevada a cabo por las llamadas bacterias acidogénicas, que transforman los monómeros orgánicos productos de la hidrólisis en ácidos grasos de cadena corta como acetato, propionato, butirato, etc. además  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2$  (Metcalf & Eddy, 1996).

### ACETOGÉNESIS

Los ácidos grasos así formados se convierten en sustrato o alimento del grupo de bacterias acetogénicas, que los transforman a ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono. La acidogénesis y la acetogénesis terminan siendo partes del proceso conocido como fermentación (Metcalf & Eddy, 1996).

### METANOGÉNESIS

En esta etapa las bacterias estabilizan el residuo, en el tratamiento anaeróbico de aguas residuales se destacan dos rutas metabólicas principales en esta

transformación, la primera llevada a cabo por bacterias específicas que reducen el CO<sub>2</sub> con el Hidrogeno. En la segunda las bacterias que utilizan como sustrato el ácido acético, cuentan con unas tasa de crecimiento muy bajo, lo que hace de su metabolismo el factor limitante de todo el proceso de digestión anaerobio, lo cual cobra especial importancia en la etapa de arranque de un biorreactor anaeróbico (Romero Rojas, 1999).

Tal proceso se desarrolla dentro de un reactor libre de oxígeno. El agua residual cruda o previamente sedimentada se introduce de forma continua y se retiene dentro del reactor por periodos variables de tiempo, después de los cuales el agua residual que sale del reactor tiene un contenido orgánico reducido y un menor contenido de microorganismos patógenos (Tchobanoglous y Burton, 1991).

Existen básicamente tres mecanismos por los que es posible retener la biomasa dentro del sistema: 1) Floculación, 2) Granulación ó 3) Adhesión a soportes. Generalmente en los procesos anaeróbicos se mezclan los tres, por lo que en la práctica suelen clasificarse los diferentes reactores en tres grandes grupos, atendiendo a que la biomasa se encuentre en suspensión, adherida a un soporte o bien se trate de sistemas múltiples que pretendan aprovechar las ventajas de las tecnologías puras (J. L. Bueno, H. Sastre, A. G. Lavin, 1997).

Con base en lo anterior, los procesos anaerobios se clasifican en procesos de crecimiento en suspensión y procesos de película bacterial adherida. En los primeros, el agua residual fluye libremente dentro del reactor y las bacterias suspendidas en el flujo se encargan de consumir la materia orgánica, transformándola en productos mas sencillos; en los segundos, el agua fluye dentro de un reactor provisto de un medio inerte (Piedra, plástico, cerámica, etc.), donde parte de las bacterias se adhieren al material del medio formando una película biológica donde degradan la materia orgánica y las restantes consumen la



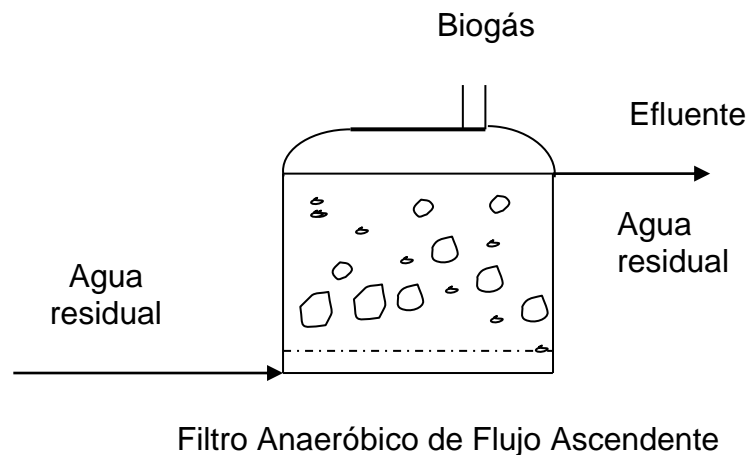
materia orgánica presente en los espacios libres entre partículas (Intersticios o vacíos del medio).

El proceso de tratamiento de película bacteriana adherida más común es el proceso de filtro anaerobio de flujo ascendente usado para el tratamiento de desechos carbonáceos donde se incluyen aguas residuales domésticas e industriales (Campos, 1990).

El filtro anaerobio es una columna llena con varios tipos de medios sólidos que se utilizan para que se adhieran las bacterias (Ver Figura 1). El desecho fluye hacia arriba a través de la columna y entra en contacto con el medio, sobre el cual crecen y se retienen bacterias anaeróbicas que se adhieren al mismo, se acumulan en los espacios entre partículas (Intersticios) y no escapan con el efluente, lo que garantiza tiempos altos de permanencia de las mismas en el reactor (Tiempo de retención celular), periodos suficientes para que degraden y transformen la materia orgánica (Substrato), del líquido a tratar (Tchobanoglous, Crites, 2000).

Las mayores tasas de remoción de materia orgánica ocurren en los niveles bajos del lecho, siendo esa región rica en sustrato y con grandes concentraciones de sólidos biológicos. Los sólidos biológicos que se forman en las capas inferiores del lecho se mantienen en suspensión en forma de flocs o grumos y pueden presentar una elevada capacidad de degradación del sustrato. Un filtro anaeróbico en condiciones apropiadas de funcionamiento puede presentar una eficiencia elevada en la remoción de materia orgánica y debido al bajo nivel de sólidos del líquido afluente no requiere de sedimentación complementaria (Campos, 1990).

Figura 1. Esquema Filtro Anaeróbico.



El sistema consta de un recipiente relleno de un material sobre la superficie del cual se adhieren los microorganismos, al aumentar el espesor de esta película biológica se desprenden del soporte y abandonan el filtro como lodos, aunque una gran parte permanece activa retenida en los espacios huecos del relleno.

Los filtros anaerobios también pueden ser útiles para desnitrificar efluentes ricos en nitratos o como pretratamiento en plantas de purificación de agua. El proceso no utiliza recirculación ni calentamiento y produce una cantidad mínima de lodo; las pérdidas de energía a través del lecho son mínimas, menores de 7.5 cm en unidades de laboratorio de 15 cm de diámetro y 1.8 m de altura. La mayor parte de la biomasa se acumula en los vacíos intersticiales existentes entre el medio (Romero Rojas, 1999).

Los aspectos mas significativos de este reactor son los referentes a las características del material de relleno (superficie específica, geometría, estructura micro o macroporosa, rugosidad, etc.) y su disposición (fracción hueca, pérdida de carga, etc.).

Como material de relleno se ha utilizado desde materiales naturales (piedras, conchas de moluscos, piedra pómez, etc.) hasta rellenos comerciales

convencionales (anillos y esferas de cerámica o vidrio poroso, tubos de plástico corrugado, paneles modulares plásticos, etc.).

Los inconvenientes que presenta son los típicos de un reactor de lecho fijo: la formación de caminos preferentes, la obturación de los distribuidores y la colmatación por sólidos. Frente a esto, tiene la ventaja de que permite tratar todo tipo de efluentes con alta DQO soluble y puede trabajar a altas cargas utilizando una corriente de recirculación. Entre sus ventajas es de destacar su rápida puesta en marcha, gran resistencia a sobrecargas orgánicas e hidráulicas, la posibilidad de trabajar intermitentemente (muy útil cuando se trata de depurar residuos procedentes de industrias estacionales) y su estabilidad frente a las sustancias tóxicas y a repentinas variaciones en el pH (J. L. Bueno, H. Sastre, A. G. Lavin, 1997).

En el presente trabajo, se muestran los resultados obtenidos al explorar un filtro anaerobio que tiene como medio soporte placas paralelas verticales en acrílico.

Los principales parámetros utilizados para la evaluación de los rendimientos de este tipo de reactores son la DBO (Total y Soluble), la DQO (Total y Soluble) y los Sólidos Suspendidos Totales.

La Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) se define usualmente como la cantidad de oxígeno que requieren las bacterias aeróbicas durante la estabilización de la materia orgánica susceptible de descomposición, la prueba de DBO se utiliza para determinar el poder contaminante de los residuos domésticos e industriales, en términos de la cantidad de oxígeno que requieren si son descargados a las corrientes naturales de agua en las que existen condiciones aeróbicas. Esta prueba es una de las más importantes en las operaciones de control de la contaminación de corrientes. También tiene gran importancia para establecer los criterios de regulación, y para realizar estudios que evalúan la capacidad de purificación de cuerpos de agua receptores (Sawyer, McCarty y Parkin, 2001).

La DBO total se indica la cantidad de materia orgánica biodegradable presente en una muestra sin filtrar. La DBO soluble indica la cantidad de materia orgánica biodegradable presente en una muestra previamente filtrada a través de papel de una micra de diámetro de abertura de poro. La remoción de DBO soluble está estrechamente relacionada con los mecanismos biológicos de degradación que se dan al interior de un reactor. La diferencia entre la DBO total y la DBO soluble representa la cantidad de materia orgánica biodegradable que se puede remover por medios físicos.

La prueba de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) es ampliamente usada como una forma de medir la concentración de la materia orgánica e inorgánica en los residuos domésticos e industriales. Esta prueba permite medir en un residuo la cantidad total de oxígeno que se requiere para la oxidación de la materia orgánica a dióxido de carbono y agua. Se basa en que todos los compuestos orgánicos, con unas pocas excepciones, pueden ser oxidados por la acción de agentes oxidantes fuertes en condiciones ácidas. La principal ventaja de la prueba de la DQO es el poco tiempo que se necesita para la evaluación (3 horas aproximadamente), comparado con los cinco días de la DBO. Con frecuencia, los datos de la DQO se pueden interpretar en términos de valores de DBO, después de que se ha acumulado suficiente experiencia para establecer factores de correlación confiables. Tiene particular valor en estudios diseñados para determinar y controlar las salidas a los sistemas de desagüe. Conjuntamente con la prueba de la DBO, la de la DQO es útil para indicar las condiciones tóxicas y la presencia de sustancias orgánicas biológicamente resistentes (Sawyer, McCarty y Parkin, 2001).

La DQO total indica la cantidad de materia orgánica total más algo de inorgánica presente en una muestra sin filtrar. La DQO soluble indica la cantidad de materia orgánica más algo de inorgánica presente en una muestra que se ha hecho pasar a través de papel de filtro de una micra de diámetro de abertura de poro. La

remoción de DQO soluble está estrechamente relacionada con los mecanismos biológicos de degradación que se dan al interior de un reactor. La diferencia entre la DQO total y la DQO soluble representa la cantidad de materia orgánica particulada que se puede remover por medios físicos.

Los sólidos se relacionan con la materia que queda como residuo después de la evaporación y el secado entre 103 °C y 105 °C de una muestra de agua. La determinación de sólidos suspendidos es de gran valor en el análisis de aguas contaminadas; además, es uno de los principales parámetros para evaluar la concentración de las aguas residuales domésticas y para determinar la eficiencia de las unidades de tratamiento. En las operaciones de control de la contaminación de las corrientes, se considera que todos los sólidos suspendidos se sedimentan puesto que el tiempo no es un factor limitante. Se espera que la sedimentación se lleve a cabo por floculación biológica y química, y por lo tanto la medición de los sólidos suspendidos se considera por lo menos tan indicativa como la DBO (Sawyer, McCarty y Parkin, 2001).

## 5. ANTECEDENTES

El interés por el filtro anaeróbico se debe en principio a una publicación de Young y McCarty en 1968, elaborada con base en datos de una investigación realizada desde 1963, en la cual mostraron los resultados obtenidos con la operación de este tipo de reactores, verificando una eficiencia en remoción de materia orgánica superior al 80% para tiempos de retención hidráulicos inferiores a 24 horas.

Tal publicación fue precedida por trabajos de Coulter, Saneda y Ettinger (1957), Winnenberger y Saad (1961) y Stander (1963), que despertaron menor interés en su época.

Tales investigaciones demostraron que el filtro anaerobio poseía buenas condiciones incluso para tratar desechos solubles con concentraciones relativamente bajas (Young, McCarty, 1968).

Una de las primeras instalaciones de filtro anaeróbico a escala real fue construida en 1970, para el tratamiento de aguas residuales provenientes del almidón obteniendo remociones promedio de materia orgánica del 75%. El funcionamiento de esta instalación se interrumpió debido a que se obstruyó el lecho filtrante.

Inicialmente se utilizó piedra como material de soporte o filtrante, debido a su bajo costo, pero por requerimientos estructurales y problemas de taponamiento del lecho con algunos residuos líquidos recientemente se comenzó a usar material sintético como medio soporte (Young, McCarty, 1964).

Young & McCarty (1969) demostraron la importancia y potencial del proceso del filtro anaeróbico para tratar con éxito una concentración mediana (1500-6000 mg L<sup>-1</sup> DQO) de desperdicios sintéticos a 25°C, a proporciones de descargas que van desde 0.06 a 0.212 lb DQO ft<sup>-3</sup> del volumen del filtro. Su trabajo simuló numerosas investigaciones para determinar la conveniencia del proceso para tratar una

variedad de tipos de medio para desperdicios industriales de concentración alta y desperdicios sintéticos (H. A. Kobayashi, M. K. Stenstrom y R. A. Mah, 1983).

Varios investigadores se suman a Young y McCarty, que han examinado la teoría y cinética del filtro anaeróbico. Dewalle & Chian (1976) evaluaron en primer orden el modelo del estado cinético. El Shafie y Bloodgood (1973) investigaron sobre el daño del desperdicio sintético para los ácidos grasos volátiles, por ejemplo un sistema de filtros operado en serie. Clark & Speece (1973) experimentalmente investigaron el efecto del pH bajo en la operación de filtros anaeróbicos y su estabilidad. Muelle & Manzini (1975) investigaron los efectos de la inhibición debido a la unión de ácidos volátiles y pH bajo, para condiciones permanentes, usando el modelo de inhibición propuesto por Andrews (1969) para mezclar completamente los digestores anaeróbicos. Jennings (1976) teóricamente investigó los efectos de la difusión en un reactor de flujo de pistón, debajo de las condiciones permanentes, usando la cinética de Monod (H. A. Kobayashi, M. K. Stenstrom y R. A. Mah, 1983).

En una investigación realizada en El Centro de Investigaciones y Extensión (CIE), se evaluó la utilización de la *Guadua angustifolia Kunt* para el tratamiento de aguas residuales domésticas bajo dos enfoques: como medio de soporte en Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente a escala piloto, y como especie sembrada en Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial. En el primer caso se comparó su desempeño con el de un medio filtrante convencional como la grava, en cuanto a remoción de carga contaminante. Así mismo, se comparó diversas configuraciones de filtros (unidades individuales y sistemas en serie), a fin de determinar el impacto del tiempo de retención hidráulico (TRH) sobre la eficiencia de los sistemas. También efectuaron estudios de trazadores para establecer el comportamiento hidrodinámico de los filtros y determinar su influencia con respecto a la eficiencia. Para tiempos de retención de hasta 8 horas, se han alcanzado remociones de 44% a 55% para la DQO, de 52% a 56% para la DBO<sub>5</sub>,

de 59% a 66% para los sólidos suspendidos totales (Castaño Rojas, Villegas Gómez, Guerrero Erazo, 2003).

En otro estudio realizado por la misma institución, se evaluaron diferentes alternativas tecnológicas para el tratamiento de aguas residuales en pequeños y medianos municipios de Colombia, que incluyen Tanque Séptico (TS), Filtro Anaeróbico de Flujo Ascendente (FAFA), y Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial (HAFSS). Se empezó por estudiar el efecto de diferentes medios de soporte en FAFAs (fragmentos de llanta, anillos de guadua) alternativos al medio tradicional de grava, en unidades operando a tiempos diferentes de residencia (4, 6, 8 y 12 horas). No se encontraron diferencias significativas entre tratamientos en cuanto a remoción, en grava y anillos de guadua variaron aproximadamente entre 50% y 70% para  $DQO_T$ , y 40% y 55% para  $DBO_5$ . En las unidades con fragmentos de llanta, la eficiencia media no superó el 50% para todos los parámetros. Posteriormente, descartando los fragmentos de llanta, se estudió el efecto de duplicar el tiempo de retención, ya fuera conectando una segunda unidad en serie, o alimentando la mitad del caudal a una unidad de igual volumen. Nuevamente no se encontraron diferencias significativas entre tratamientos en cuanto a eficiencias de remoción de  $DQO_T$ , y  $DBO_5$  (49.5% y 56.6% en promedio respectivamente). (Castaño Rojas, Guerrero Erazo, 2003).

Como un nuevo intento, en el presente trabajo, se evalúo el potencial de las placas de acrílico, colocadas en posición vertical y paralelas como medio soporte alternativo en sistemas de filtración Anaeróbica.



## 6. METODOLOGÍA

6.1 MONTAJE DEL REACTOR: Se procedió a armar un reactor que en esencia consta de las siguientes partes:

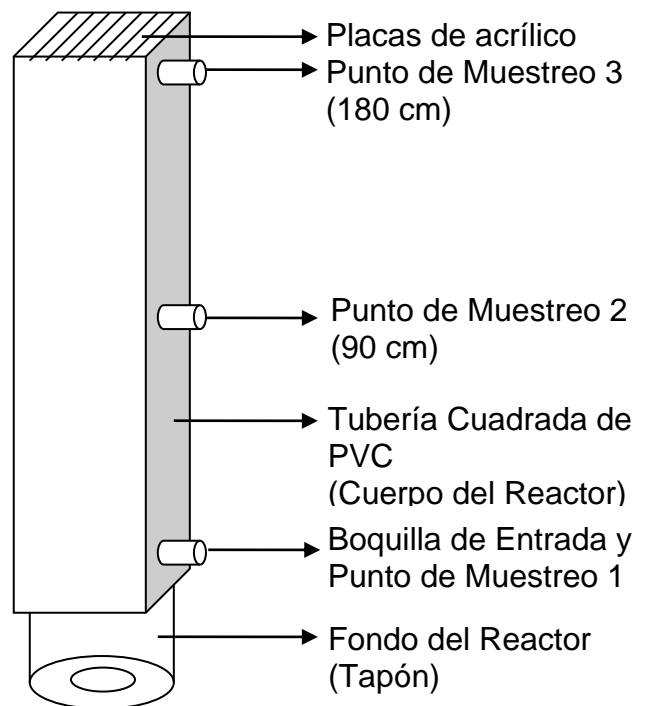
### 6.1.1 Tubería

Una tubería con sección recta en forma rectangular en donde se colocaron las placas paralelas entre sí y con una longitud de 1.88 m, una sección rectangular de 6,1 cm \* 6,2 cm. Esta tubería se colocó verticalmente para formar un ángulo de 90 grados con cualquier línea horizontal.

### 6.1.2 Placas

Las placas son puestas con el propósito de hacer parte de la superficie de adherencia para los microorganismos, encargados de descomponer la materia orgánica, durante el proceso de estabilización de la misma. Se alojaron dentro de la tubería 6 placas paralelas separadas 6 mm. Las placas están construidas en acrílico con dimensiones de 5.8 cm x 181.5 cm y 3 mm de espesor.

Figura 2: Esquema del reactor



### 6.1.3 Bomba Peristáltica.

La labor de suministro de agua residual a tratar fue realizada por una bomba de funcionamiento peristáltico con capacidad variable desde un 1 L/día hasta 20 L/día, la variación del caudal se logró con un temporizador que permite variar los tiempos de encendido y apagado para tener de esta manera un caudal constante.

### 6.1.4 ILUSTRACIONES

Figura 3: Corte Transversal



Figura 4: Reactor y Tapón Inferior



Figura 5: Punto de muestreo 3 y Placas



Figura 6: Punto de muestreo 2



Figura 7: Placas de Acrílico

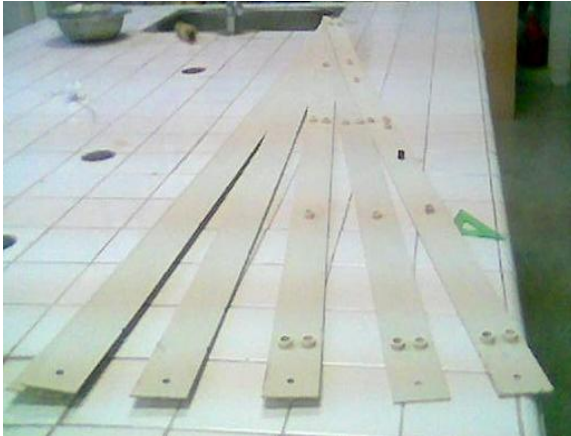


Figura 8: Bomba Peristáltica



## 6.2 ALIMENTACIÓN DEL REACTOR

Como alimentación del reactor se empleó Agua residual previamente decantada, proveniente del efluente del Tanque Imhoff que se utiliza como Tratamiento Primario en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la urbanización Villa del Viento.

Figura 9. Vista Frontal de los tanques Imhoff y canal de recolección en la planta de tratamiento de aguas residuales de Villa del Viento.



Figura 10. Vista del punto de recolección de la muestra.



### 6.3 DESARROLLO METODOLÓGICO

6.3.1 En los primeros dos meses y dieciocho días se suministró agua de manera continua al reactor con un caudal pequeño, que lograba un tiempo de retención de 18h. En este periodo inicial de arranque no se realizaron ensayos de laboratorio, porque la biopelícula apenas se estaba formando en las placas paralelas de acrílico.

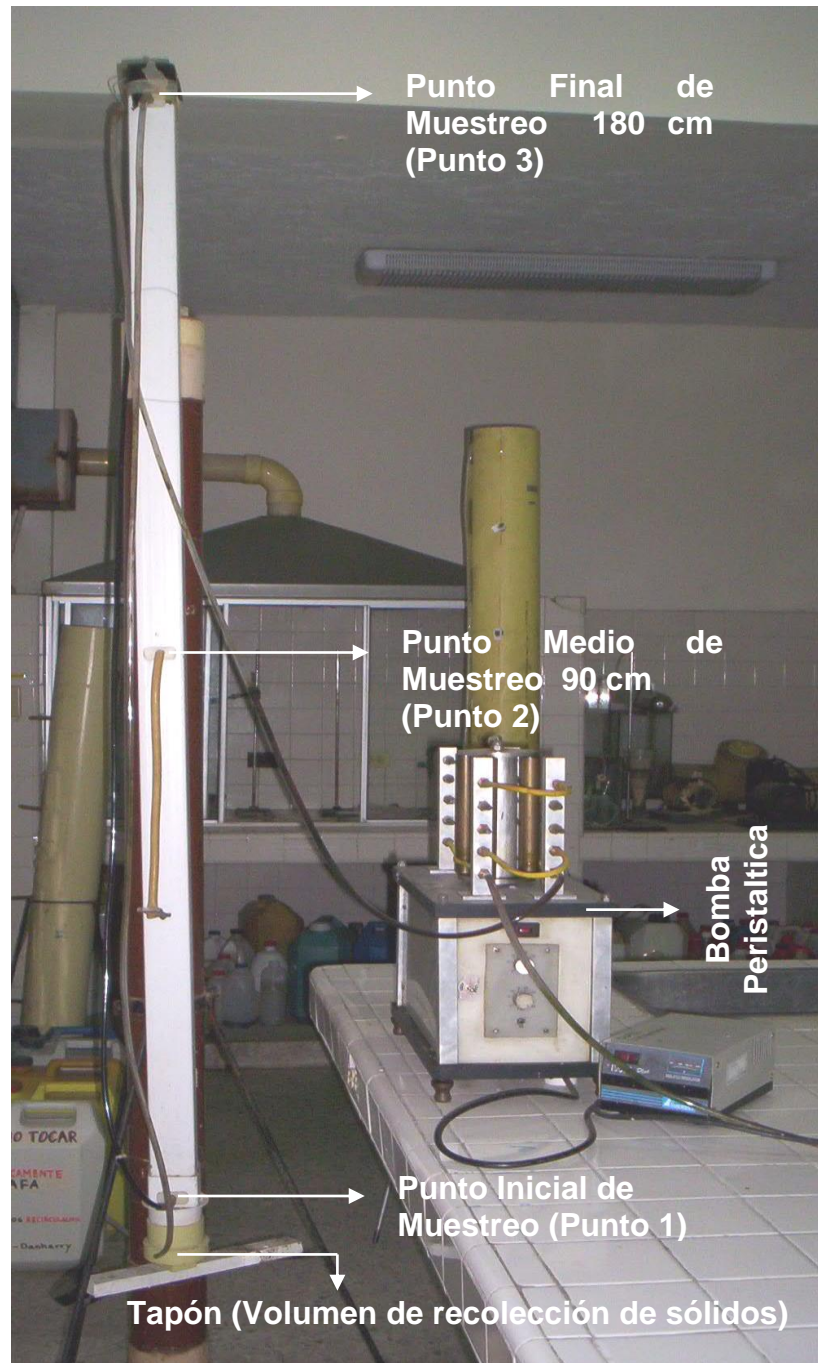
6.3.2 En el siguiente mes se incrementó el caudal que alimenta el filtro hasta un tiempo de retención de 24 horas aproximadamente.

6.3.3 En los sucesivos veinticuatro días se procedió a evaluar la eficiencia de remoción de materia orgánica con base en pruebas de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Sólidos Suspendidos Totales (SST) y Demanda Química de Oxígeno (DQO), hasta alcanzar un estado aproximadamente estable. La toma de muestras se realizó en 3 puntos diferentes: Un punto inferior a la entrada del filtro, Un punto intermedio a 0.9 m de alto (Tiempo de retención de 12 horas) y Un punto



a la salida del filtro a 1.80 m de alto (Tiempo de retención de 24 horas) (Ver Figura 2).

Figura 11. Vista Frontal del Reactor.



Semanalmente se hicieron ensayos con una frecuencia de 4 pruebas para DQO y SST, y 2 para DBO. A la muestra obtenida después del filtrado se le realizaron igualmente ensayos con una frecuencia de 4 pruebas para DQO y 2 para DBO.

Figura 12. Ensayo DQO.

Figura 13. Ensayo DQO



Figura 14. Material Laboratorio.

Figura 15. Ensayo DBO<sub>5</sub>.



6.3.4 En los posteriores cincuenta y dos días, después de evaluado el arranque del filtro con un tiempo de retención de 24 horas, se amplió el tiempo de retención hidráulico a un estimado de 36 horas, se procedió a evaluar la eficiencia de remoción de materia orgánica y sólidos con base en pruebas de DBO, SST y DQO. La toma de muestras se realizó igualmente en los 3 puntos referenciados, el

punto intermedio a 0.9 m de alto (Tiempo de retención de 18 horas) y el punto a la salida del filtro a 1.80 m de alto (Tiempo de retención teórico de 36 horas).

6.3.5 De nuevo se trabajó con un tiempo de retención de 24 horas durante 19 días en los cuales se siguió evaluando la eficiencia del filtro de la misma forma, esto con el fin de observar que sucedía en esta etapa posterior al arranque para dicho tiempo de retención.

Los procedimientos de Laboratorio empleados se relacionan en el **Anexo 1**.

El Cronograma real de pruebas realizadas se relaciona en el **Anexo 2**.

## 7. EVALUACIÓN DE RESULTADOS

### *7.1 Desarrollo del objetivo No 1*

*Estudiar la variabilidad de la eficiencia de remoción de sólidos suspendidos totales, DBO y DQO durante el periodo de arranque del filtro.*

Los sistemas de filtración Anaerobia necesitan un tiempo de adaptación de cerca de tres meses, razón por la cual, la partida o arranque debe ser controlado aumentando paulatinamente la carga del sistema (Vieira, SMM e Sobrinho, P.A,1990).

Con base en lo anterior, como se indicó en el desarrollo metodológico en los primeros 78 días, se dio tiempo para que se comenzara a formar la biopelícula en las placas de acrílico y con el fin de no analizar resultados ampliamente variables no se tomaron muestras durante el periodo señalado.

En el tiempo estipulado los caudales se incrementaron paulatinamente de modo que se alcanzara un tiempo de retención promedio de 18 horas.

En los siguientes 30 días se siguieron ajustando los caudales hasta alcanzar un periodo de retención promedio total de 24 horas.

El montaje del reactor permitía extraer las placas para realizar observación visual de las mismas, y al final de los primeros 108 días la biopelícula ya era visible, razón por la cual se inició la evaluación cuantitativa del reactor.



Figura 16. Biopelícula formada sobre la placa de acrílico pasados 108 días.



#### 7.1.1. Evaluación de resultados de DQO durante el periodo de arranque.

La Tabla No 2 muestra estadísticas descriptivas para la evaluación de la DQO.

La Tabla No 3 muestra las estimaciones de Remoción de DQO Total.

Los datos respectivos se relacionan en el Anexo 3.

Tabla 2. Resultados de DQO Total durante el periodo de arranque.

Estadístico	Entrada	TRH 12 horas	TRH 24 horas
NÚMERO DE DATOS	9	9	9
PROMEDIO (mg/L)	351.0	233.1	201.4
MÁXIMO (mg/L)	513.4	316.8	251.3
MÍNIMO (mg/L)	195.8	95.0	84.9
DESVIACIÓN STANDARD	89.9	63.4	55.3

Tabla 3. Porcentaje de Remoción para DQO total durante el periodo de arranque.

Estadístico	% Remoción TRH 12 horas	% Remoción TRH 24 horas
NÚMERO DE DATOS	9	9
PROMEDIO	33.7	40.9
MÁXIMO	51.5	73.6
MÍNIMO	19.4	24.9
DESVIACIÓN STANDARD	10.9	16.4

La Tabla No 3 muestra que los porcentajes de remoción promedio oscilan entre el 34 y el 40% para periodos de retención hidráulica entre 12 y 24 horas respectivamente, remociones relativamente bajas, que indican que aunque el filtro no ha alcanzado su madurez, ya hay un claro indicio de inicio de la actividad biológica.

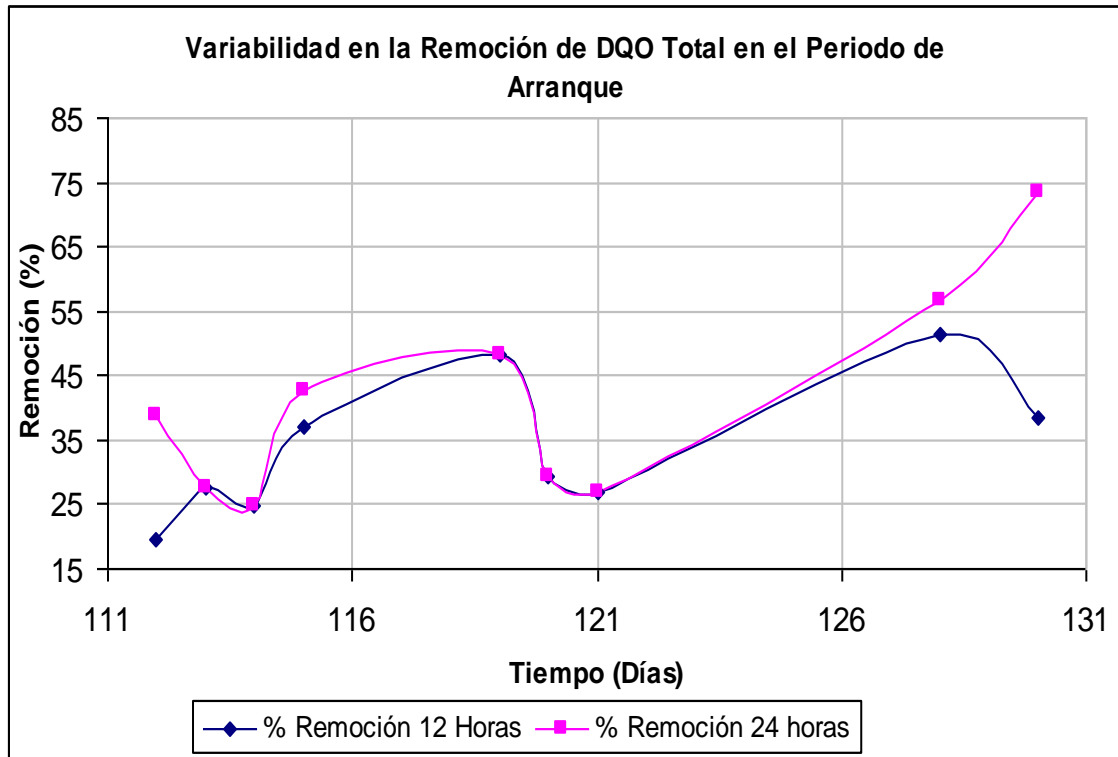
El arranque de un proceso de crecimiento adherido, puede demorar periodos del orden de 6 meses en aguas residuales de baja concentración (Romero, 2000).

Esto indica que al igual que los filtros en piedra, se requieren unos meses mas para tener unas eficiencias de remoción estables que puedan ser confrontadas con las exigencias Nacionales.

La tendencia en las eficiencias de remoción comienza a mostrar que no se logran incrementos significativos al extender el periodo de detención de 12 a 24 horas, lo que sugiere que la mayor parte de la actividad biológica se está realizando en la parte inferior del reactor, hecho confrontable con lo que sucede en reactores con lecho en piedra donde la mayor parte de la actividad se realiza en la cama inferior del lecho (Campos, 1990).

La Figura No 17 muestra la variabilidad en la eficiencia de remoción durante el periodo inicial de evaluación:

Figura 17. Variación de la DQO Total durante el periodo de arranque



De acuerdo con la curva al final del periodo de arranque el filtro comienza a presentar incrementos en la remoción de materia orgánica total, hecho que denota que hay un intenso crecimiento de la población biológica que cumple funciones de degradación.

Con el objetivo de mirar que fracción de la DQO se está removiendo por medios físicos, se procedió a evaluar, en algunas de las pruebas, la DQO soluble del líquido tratado en los diferentes puntos de muestreo y las respectivas remociones (ver datos en anexo 3):

Tabla 4. Resultados de DQO Soluble durante el periodo de arranque.

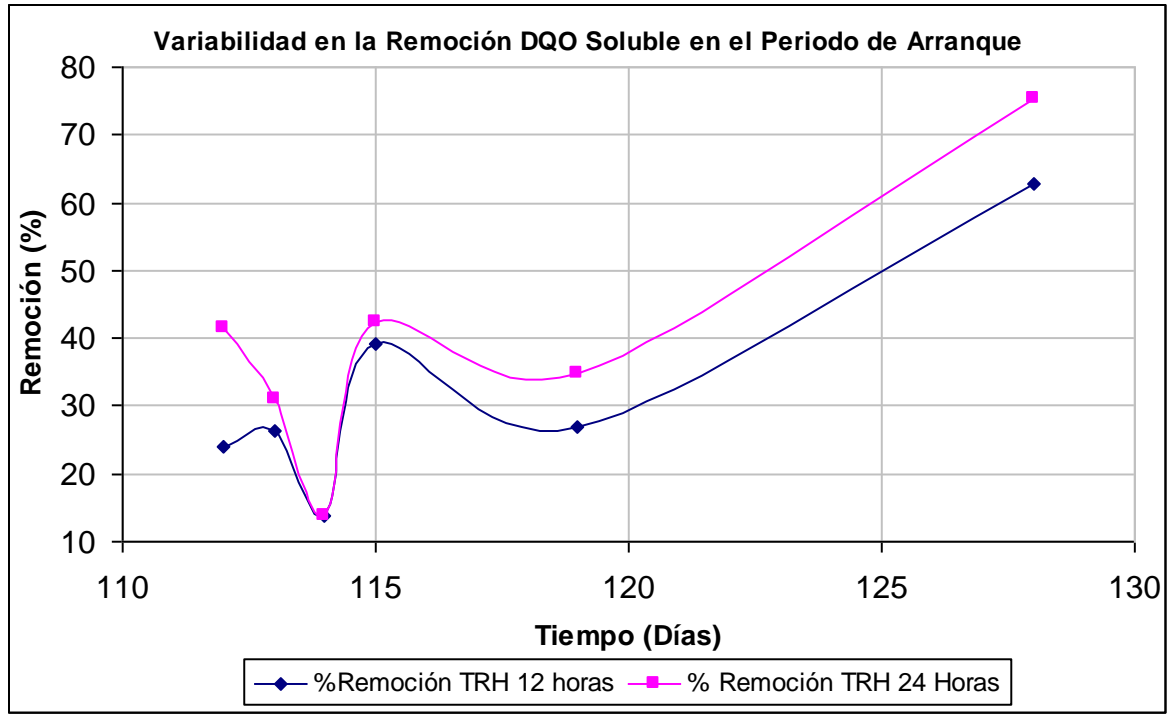
Estadístico	Entrada	TRH 12 horas	TRH 24 horas
NÚMERO DE DATOS	6	6	6
PROMEDIO (mg/L)	244,6	169,8	151,3
MÁXIMO (mg/L)	281,5	205,9	203,4
MÍNIMO (mg/L)	180,7	67,3	44,6
DESVIACIÓN	37,4	56,1	58,35

Tabla 5. Eficiencias de Remoción de DQO soluble.

Estadístico	% Remoción TRH 12 horas	% Remoción TRH 24 Horas
NÚMERO DE DATOS	6	6
PROMEDIO	32,2	39,8
MÁXIMO	62,8	75,3
MÍNIMO	13,9	13,9
DESVIACIÓN STANDARD	17,0	20,2

A continuación, se muestra la variabilidad en la remoción de DQO soluble durante el periodo de arranque.

Figura 18. Variabilidad de la Remoción de DQO soluble en el periodo de arranque



Las eficiencias de remoción de DQO soluble son ligeramente inferiores a las obtenidas en DQO total, con promedios de 32% para tiempos de retención de 12 horas y 39.8% para periodos de 24 horas.

Adicionalmente, el gráfico No 18 indica claramente que a partir del día 118 se comienzan a incrementar notoriamente las remociones de DQO soluble para los 2 tiempos de retención hidráulica, lo que denota una intensa actividad biológica e indica que el filtro está llegando a su periodo de madurez.

Con los valores promedio obtenidos se pueden confrontar los resultados:

Tabla No 6. Resultados promedios relativos en la evaluación de DQO para el periodo de arranque.

DQO PROMEDIO	Entrada	TRH 12 horas	TRH 24 horas
TOTAL (mg/L)	351.0	233.1	201.4
SOLUBLE (mg/L)	244,6	169,8	151,3

Para TRH de 12 horas para la DQO TOTAL se remueven en promedio:  $351 - 233.1 = 117.9$  mg/L DQO Total

En el mismo periodo para DQO SOLUBLE se remueven en promedio:  $244.6 - 169.8 = 74.8$  mg/L DQO soluble.

Según esto el porcentaje relativo de remoción de DQO por medios físicos referidos a la remoción total obtenida es=  $(117.9 - 74.8) * 100 / 117.9 = 36.6\%$  y el 63.4 % se remueve por medios biológicos.

Por tanto, del porcentaje de remoción de DQO total (33.7% promedio),  $0.366 * 33.7 = 12.33\%$  se remueve por sedimentación y adsorción y el 21.37% restante se remueve por acción biológica.

Para TRH de 24 horas para DQO TOTAL se remueven en promedio:  $351 - 201.4 = 149.6$  mg/L DQO Total

En el mismo periodo para DQO SOLUBLE se remueven en promedio:  $244.6 - 151.3 = 93.3$  mg/L DQO soluble.

Según esto el porcentaje relativo de remoción de DQO por medios físicos referidos a la remoción total obtenida es=  $(149.6 - 93.3) * 100 / 149.6 = 37.63\%$  y el 62.37 % se remueve por medios biológicos.

Por tanto, del porcentaje de remoción de DQO total (40.9% promedio),  $0.3763 \times 40.9 = 15.39\%$  se remueve por sedimentación y adsorción y el 25.51% restante se remueve por acción biológica.

Los resultados muestran que los incrementos porcentuales en remoción de DQO total, ya sea por sedimentación, adsorción en placas de acrílico o mecanismos biológicos tiene incrementos muy pequeños cuando se aumenta el tiempo de retención de 12 a 24 horas.

Para DQO soluble, se observa, que al aumentar el periodo de retención hidráulico de 12 a 24 horas en esta fase de arranque, solo se consigue incrementar la eficiencia en un 7.2%, el análisis efectuado indica que la mayor parte de la actividad biológica se está realizando en la parte inferior del filtro, tramo 1-2, predominando los mecanismos biológicos sobre los físicos.

Esto corrobora lo aseverado por Campos, 1990, quien afirma, que las mayores tasas de remoción ocurren en los niveles mas bajos del lecho cuando el flujo es ascendente ya que en dicha región existen grandes concentraciones de sólidos biológicos con intensa actividad biológica.

#### 7.1.2 Evaluación de resultados de DBO durante el periodo de arranque.

En el periodo indicado previamente se realizaron un total de 10 pruebas de DBO, sin embargo, por problemas con las diluciones y escasez posterior de reactivos, solo se obtuvieron resultados positivos en 4 de ellas para un tiempo de retención de 24 horas, cuyos resultados y remociones se analizan a continuación (Ver datos en anexo 3):

Tabla 7. Resultados de DBO<sub>5</sub> Total para el periodo de arranque.

Estadístico	Entrada	TRH 24 Horas
NÚMERO DE DATOS	4	4
PROMEDIO (mg/L)	123,5	73,6
MÁXIMO (mg/L)	141,1	100,0
MÍNIMO (mg/L)	94,1	41,5
DESVIACIÓN STANDARD	20,9	28,1

Tabla 8. Eficiencias de Remoción de DBO observadas durante el periodo de arranque.

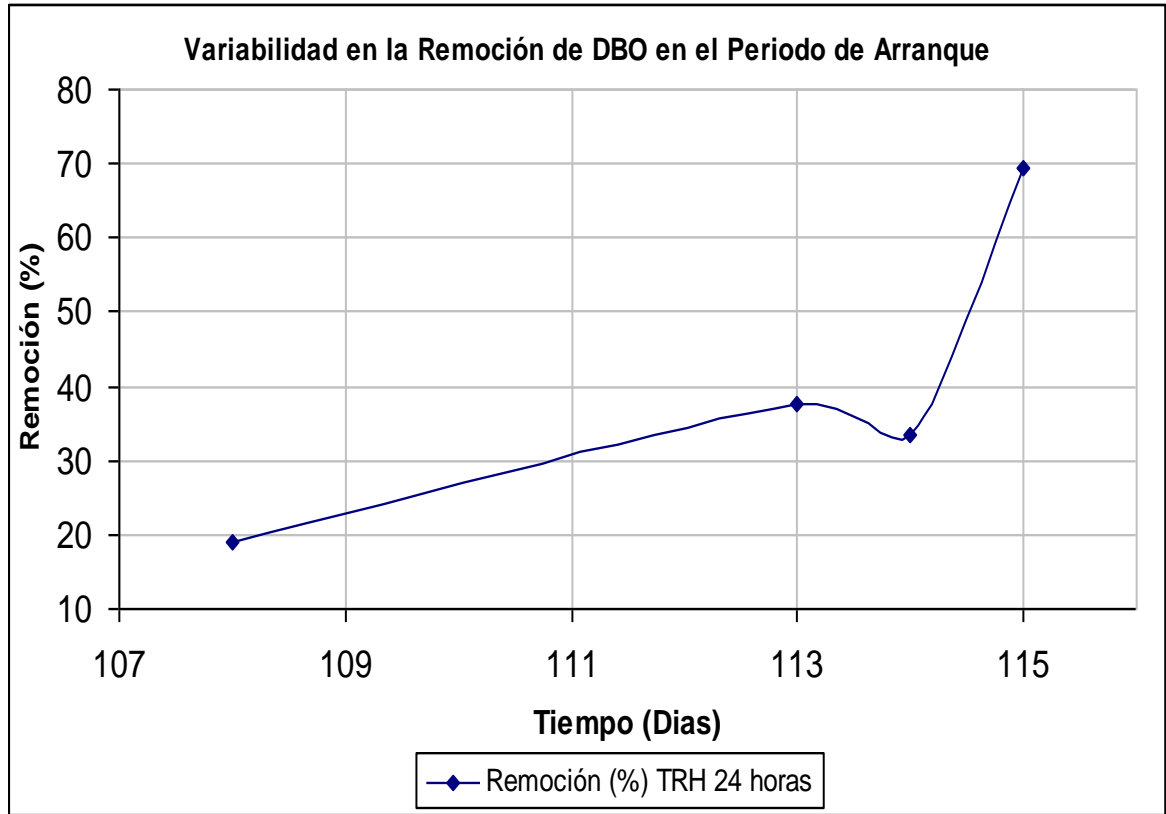
Estadístico	% Remoción TRH 24 horas
NÚMERO DE DATOS	4
PROMEDIO	39,8
MÁXIMO	69,3
MÍNIMO	19
DESVIACIÓN STANDARD	21,2

A pesar de los pocos datos que se lograron obtener en el periodo de arranque, se observa claramente la gran similitud obtenida entre el promedio de remoción de DQO (40.9%) y el promedio de remoción de DBO total (39.8), lo que lleva a concluir que las observaciones realizadas para DQO son extrapolables para el análisis de DBO.

A continuación, se muestra la variabilidad obtenida en los resultados de la DBO a través del tiempo:



Figura 19. Variabilidad de la Remoción de DBO en el periodo de arranque



Al igual que lo ocurrido con la DQO los porcentajes iniciales de remoción son variables y se incrementan en el periodo final, lo que indica el inicio de una intensa actividad biológica y denota que ya se acerca el periodo de madurez del filtro.

### 7.1.3 Evaluación de resultados de SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES durante el periodo de arranque.

La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos en fase de arranque para periodos de detención entre 12 y 24 horas (ver datos en anexo 3):

Tabla 9. Resultados de Sólidos Suspendidos totales en fase de arranque.

Estadístico	Entrada	TRH 12 horas	TRH 24 horas
NÚMERO DE DATOS	7	7	7
PROMEDIO (mg/L)	53,4	27,3	21,4
MÁXIMO (mg/L)	70	39	33
MÍNIMO (mg/L)	13	6	2
DESVIACIÓN STANDARD	21,4	14,3	13,5

Por tratarse de aguas residuales previamente decantadas en un tanque Imhoff el afluente tiene valores bajos, sin embargo el resultado promedio final de 21,4 mg/L revela, que el reactor está cumpliendo de manera eficiente funciones adicionales de sedimentación y que aún en fase de arranque el filtro dispuesto como tratamiento secundario pule el afluente de modo que cumple con las normas Nacionales de Remoción de sólidos suspendidos.

Para complementar este análisis, en la siguiente tabla se muestran las eficiencias de remoción (ver datos en anexo 3) obtenidas en esta primera fase del proceso:

Tabla 10. Eficiencias de remoción de Sólidos suspendidos totales en fase de arranque.

Estadístico	% Remoción TRH 12 horas	% Remoción TRH 24 horas
NÚMERO DE DATOS	7	7
PROMEDIO	51,2	64,7
MÁXIMO	76,5	70
MÍNIMO	2,2	6,7
DESVIACIÓN STANDARD	13,4	17,4

Como era de esperarse, en fase de arranque no hay uniformidad en los datos, sin embargo se logra un incremento de 13.5% en la remoción promedio cuando se aumenta el tiempo de retención.

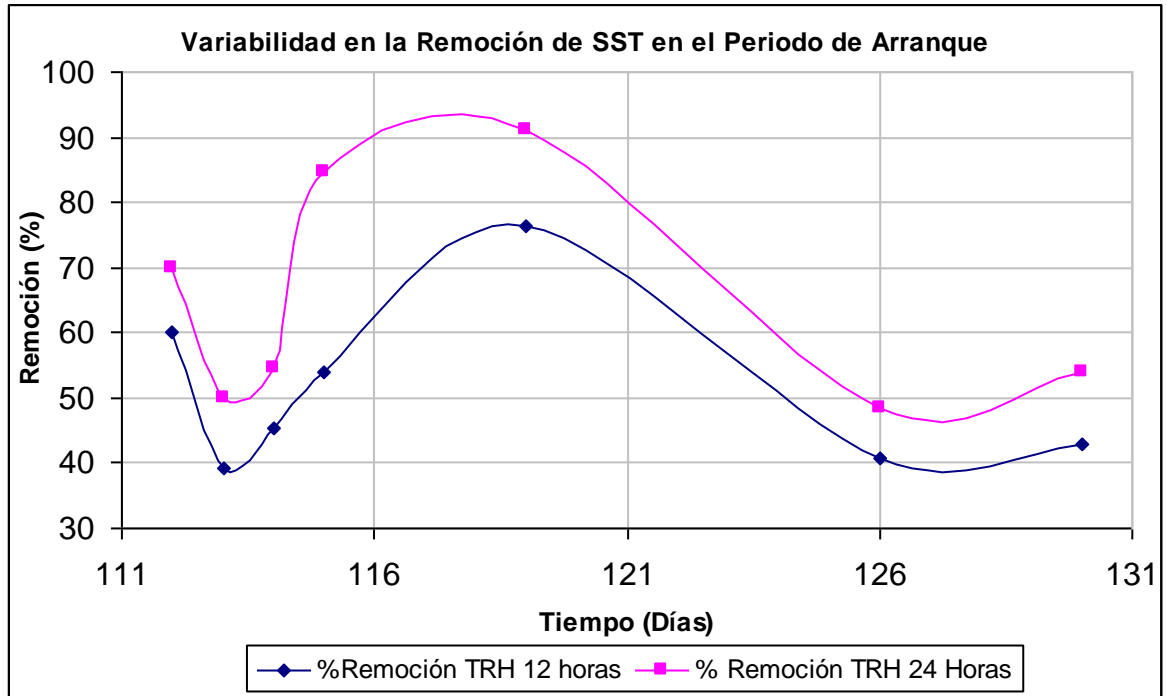
A diferencia de lo que ocurre con DBO y DQO, los datos revelan que aunque la sedimentación se está realizando principalmente en las partes bajas del reactor, también hay contribución a la remoción en el segundo tramo, aunque a la luz de la norma, con la remoción complementaria al tanque Imhoff realizada para periodos de retención de 12 horas es suficiente para garantizar la eficiencia deseada. Siendo así, se espera que en el periodo de madurez del filtro las eficiencias en remoción de sólidos aumenten.

Las Aguas residuales de la Urbanización Villa del Viento tienen una carga de SST promedio de 200 mg/L en el agua cruda (Promedio de 6 meses de Evaluación, Chaux, 2003). Si el agua se hace pasar por el tanque Imhoff y luego por el reactor de placas paralelas, en 12 horas, se obtiene un efluente promedio de 30 mg/L (Ver tabla 9), por lo tanto la remoción total del sistema (Tanque Imhoff + Reactor de placas) en periodo de arranque sería:

$$R (\%) = (200 - 30.1) * 100 / 200 = 85\%, \text{ por encima del } 80\% \text{ requerido.}$$

La siguiente gráfica muestra la variabilidad en la remoción de SST durante el periodo de arranque:

Figura 20. Variabilidad de la Remoción de SST en el periodo de arranque.



El comportamiento observado en las eficiencias de remoción es variable, hecho que se explica por la dificultad para obtener muestras de similar concentración a partir del efluente del tanque Imhoff, sin embargo, los toques variables de remoción entre 40 y 90% muestran que hay un importante papel del mecanismo físico de sedimentación en el reactor en estudio.

### 7.2 Desarrollo del objetivo No 2

*Evaluar la eficiencia de remoción del reactor con respecto a demanda bioquímica de oxígeno ( $DBO_5$ ), demanda química de oxígeno (DQO) y sólidos suspendidos totales.*

Las observaciones realizadas para comparar el crecimiento de la biopelícula sobre las placas paralelas en acrílico, muestran que el reactor aun está madurando (Comparar la Figura 16 con las Figuras 21 y 22).

Figura 21. Biofilm formada sobre la placa pasados 132 días (Punto 1).



Figura 22. Biofilm formada sobre la placa pasados 132 días (Entre punto 2 y 3).



### 7.2.1 Evaluación de resultados de DQO TOTAL.

Las tablas 11 y 12 muestran los resultados obtenidos en la evaluación de DQO y sus respectivas remociones (ver datos en anexo 3) en los días posteriores al primer periodo de observación, disminuyendo el caudal y por ende, ampliando el tiempo de retención:

Tabla 11. Resultados DQO Total para tiempos de retención de 18 y 36 horas.

Estadístico	Entrada	TRH 18 horas	TRH 36 horas
NÚMERO DE DATOS	19	19	19
PROMEDIO (mg/L)	346,5	222,9	149,1
MÁXIMO (mg/L)	493,2	261,4	236,1
MÍNIMO (mg/L)	226,1	147,9	54,7
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	65,7	33,3	53,4

Tabla 12. Porcentajes de remoción para DQO Total en el periodo 36 horas.

Estadístico	% Remoción TRH 18 horas	% Remoción TRH 36 horas
NÚMERO DE DATOS	19	19
PROMEDIO	34,8	56,6
MÁXIMO	54,7	83,8
MÍNIMO	21,1	22,9
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	8,6	14,5

Se presenta un incremento del 21.8% promedio en la eficiencia de remoción, cuando se varía el Tiempo de retención de 18 a 36 horas.

Según el Estudio realizado en el laboratorio de Ingeniería Ambiental el agua cruda de Villa del Viento tiene una DQO promedio de 450 mg/L.

El Efluente del Tanque Imhoff tiene un promedio de 346.5 mg/L de DQO, bajo tales circunstancias y teniendo en cuenta los porcentajes de remoción presentados en la Tabla 12, se tiene:

Efluente esperado en el sistema para TRH de 18 horas =  $346.5 (1-0.348) = 225$  mg/L.

Eficiencia de Remoción del Sistema Tanque Imhoff- Reactor en Acrílico para 18 horas:

$$(450-225)*100/450 = 50\%$$

Según esto, aún a 6 meses de haber iniciado su trabajo el reactor, su eficiencia de remoción no alcanza a cumplir con lo estipulado por el RAS 2000 y el Decreto 1594 de 1984, que exigen eficiencias globales del 80% para DQO.

Para tiempo de retención Hidráulico de 36 horas:

DQO promedio esperada en el efluente =  $346.5 * (1 - 0.566) = 150 \text{ mg/L}$ .

Eficiencia de Remoción del Sistema Tanque Imhoff- Reactor en Acrílico para 36 horas:

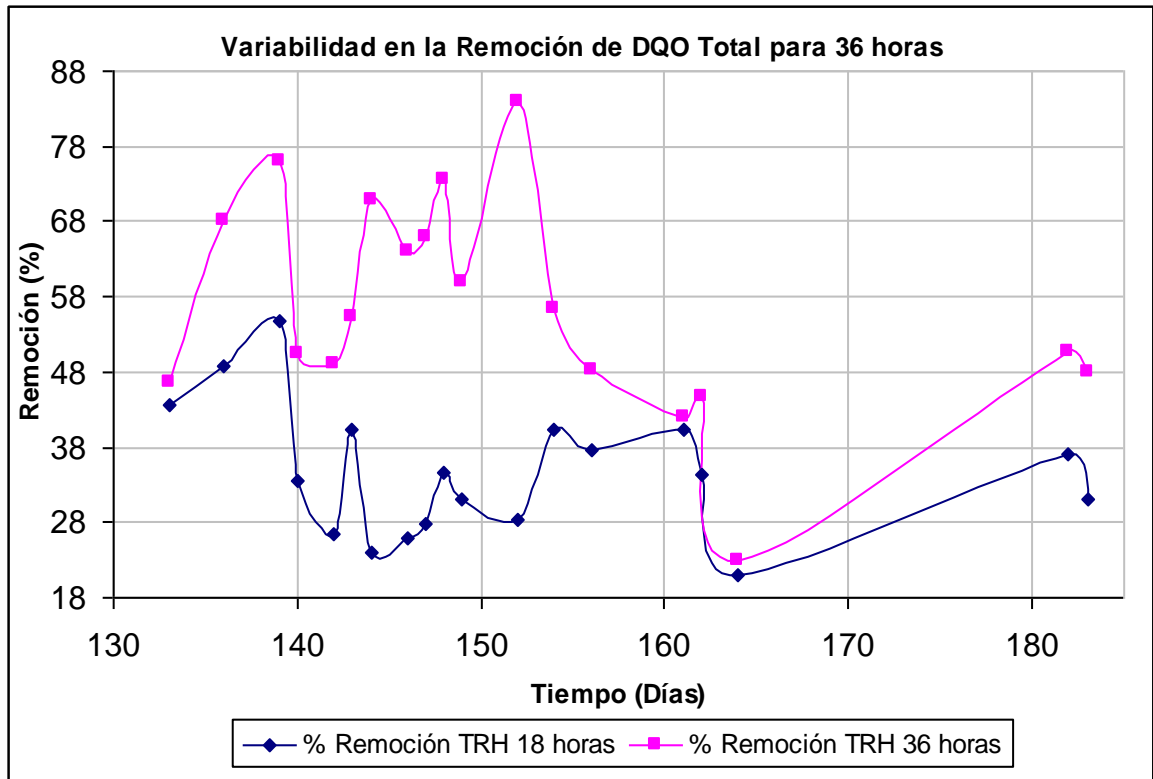
$(450 - 150) * 100 / 450 = 67\%$

A pesar del incremento en la eficiencia global, tampoco se alcanza a cumplir con las metas de remoción a 6 meses de haber iniciado su trabajo el reactor.

Las eficiencias alcanzadas sugieren, que el reactor requiere de un inóculo adicional para su arranque, al mismo tiempo se vislumbra que aún no ha alcanzado su estado estable y que se requiere hacer evaluaciones adicionales en periodos superiores a 6 meses (8 meses a un año), ya que de mantenerse las remociones en los topes alcanzados, con la configuración construida no constituye una solución adecuada para el tratamiento secundario de aguas residuales domésticas.

La visualización de la variación de las eficiencias de remoción en el tiempo, permite realizar una mejor interpretación de lo ocurrido:

Figura 23. Variación de la eficiencia de remoción de DQO Total para el periodo de 36 horas.



La Figura 23 muestra un comportamiento bastante heterogéneo en las eficiencias de remoción de DQO total entre el día 130 y el día 162. En ambos casos se obtienen mayores eficiencias de remoción para el tiempo de retención de 36 horas.

A partir del día 162 las eficiencias que habían tenido un fuerte descenso en los últimos 5 días comienzan a aumentar pero los topes máximos de remoción en el reactor no superan el 50% para TRH de 36 horas y están por debajo del 40% hasta el día 180 (A 6 meses del inicio), lo que arroja un comportamiento bastante regular del reactor como tratamiento secundario de aguas residuales previamente decantadas.



### 7.2.2 Evaluación de Resultados de DQO soluble.

Las tablas 13 y 14 resumen los estadísticos de DQO soluble y porcentajes de remoción obtenidos (Ver datos en anexo 3):

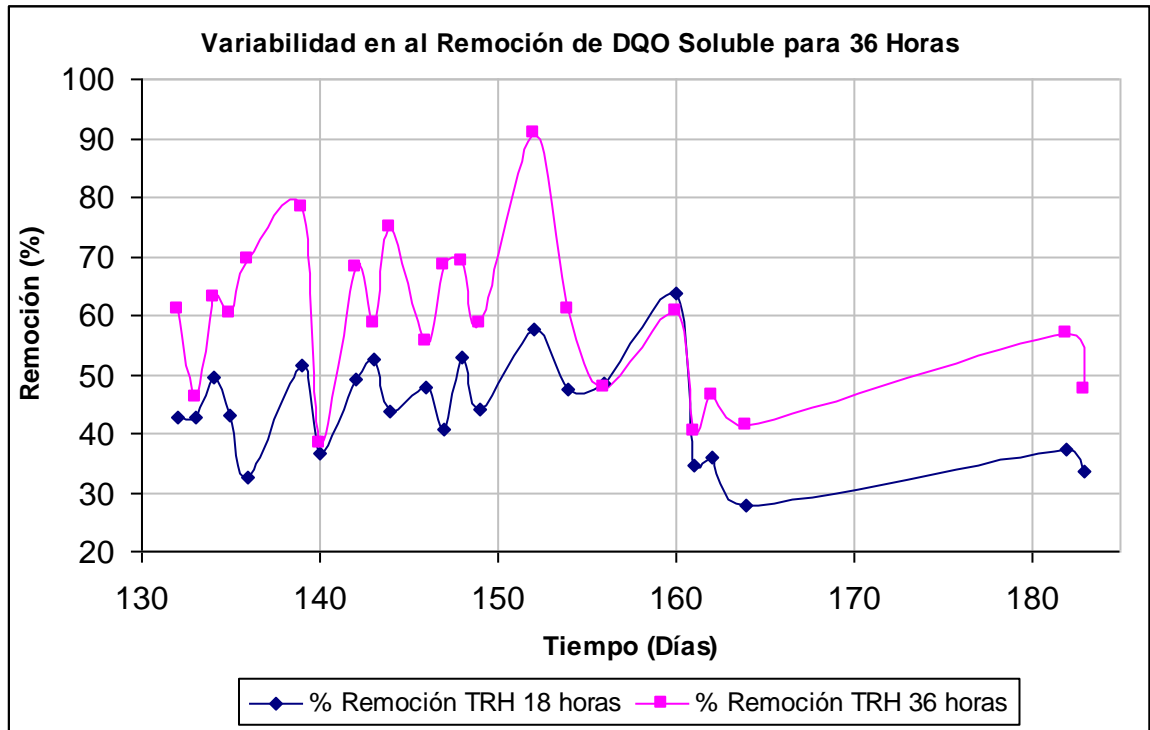
Tabla 13. Resultados DQO Soluble para el periodo de 36 horas.

Estadístico	Entrada	TRH 18 horas	TRH 36 horas
NÚMERO DE DATOS	24	24	24
PROMEDIO (mg/L)	267,5	148,1	109,6
MÁXIMO (mg/L)	387,4	203,4	183,2
MÍNIMO (mg/L)	163,1	110,1	24,4
DESVIACIÓN ESTANDARD	49,9	28,9	42,1

Tabla 14. Porcentajes de remoción para DQO Soluble en el periodo 36 horas.

Estadístico	% Remoción TRH 18 Horas	% Remoción TRH 36 Horas
NÚMERO DE DATOS	24	24
PROMEDIO (mg/L)	44,173	59,268
MÁXIMO (mg/L)	63,657	90,841
MINIMO (mg/L)	27,965	38,416
DESVIACIÓN STANDARD	8,675	13,052

Figura 24. Variación de la eficiencia de remoción de DQO Soluble para el periodo de 36 horas.



Hasta el día 160, se presenta un comportamiento bastante variable en la remoción de DQO soluble tanto para el periodo de retención de 18 horas como para el periodo de retención de 36 horas. Para el tiempo de retención de 18 horas las eficiencias individuales están por encima del 35% pero no superan el 55%, a partir del día 164 las eficiencias comienzan a tener un comportamiento similar sin superar el 35% para el tiempo de 18 horas y el 55% para el tiempo de 36 horas. La confrontación de los resultados de DQO total con DQO soluble permite estimar cual es el porcentaje de remoción de materia orgánica por medios físicos y el complementario por procesos biológicos:

Tabla 15. Resultados promedios relativos en la evaluación de DQO para 36 horas.

Estadístico	Entrada	TRH 18 horas	TRH 36 horas
TOTAL (mg/L)	346,5	222,9	149,1
SOLUBLE (mg/L)	267,5	148,1	109,6

En el TRH de 18 horas para DQO TOTAL se remueven en promedio:  $346,5 - 222,9 = 123,6$  mg/L DQO Total.

En el mismo periodo para DQO SOLUBLE se remueven en promedio:  $267,5 - 148,1 = 118,9$  mg/L DQO soluble.

Según esto el porcentaje relativo de remoción de DQO por medios físicos referidos a la remoción total obtenida es=  $(123,6 - 118,9) * 100 / 123,6 = 3,8\%$  y el 96,2 % se remueve por medios biológicos.

Por tanto, del porcentaje de remoción de DQO total para 18 horas de TRH (34,8% promedio),  $0,038 * 34,8 = 1,3\%$  se remueve por sedimentación y adsorción y el 33,5% restante se remueve por acción biológica.

Para TRH de 36 horas para DQO TOTAL se remueven en promedio:  $346,5 - 149,1 = 197,41$  mg/L DQO Total.

En el mismo periodo para DQO SOLUBLE se remueven en promedio:  $267,5 - 109,6 = 157,9$  mg/L DQO soluble.

Según esto el porcentaje relativo de remoción de DQO por medios físicos referidos a la remoción total obtenida es=  $(197,41 - 157,9) * 100 / 197,41 = 20\%$  y el 80 % se remueve por medios biológicos.

Por tanto, del porcentaje de remoción de DQO total (56,6% promedio),  $0,2 * 56,6 = 11,3\%$  se remueve por sedimentación y adsorción y el 45,3% restante se remueve por acción biológica.

Esto implica, que en el lapso comprendido entre el 4º y el 6º mes los procesos biológicos predominan sobre las operaciones físicas, lo cual es lógico, ya que el agua que ingresa al reactor ha sido previamente decantada en un tanque imhoff, lo que presupone una remoción previa fuerte de materia orgánica particulada de tipo sedimentable, dejando básicamente la fracción mas pequeña y la coloidal para ser removidas en el reactor.

### 7.2.3 Evaluación de resultados de DBO Total TRH de 18 a 36 horas.

Las tablas 16 y 17 resumen resultados y remociones de DBO total para periodos de 18 a 36 horas. (Datos en anexo 3)

Tabla 16. Resultados DBO<sub>5</sub> Total para el periodo de 36 horas.

Estadístico	Entrada	TRH 18 horas	TRH 36 horas
NÚMERO DE DATOS	11	11	11
PROMEDIO (mg/L)	136,63	52,19	33,72
MAXIMO (mg/L)	196,43	95,56	72,52
MINIMO (mg/L)	90,25	21,24	5,31
DESVIACIÓN ESTANDAR	33,77	24,55	22,48

Para aguas residuales domésticas como las de Villa del Viento donde la DBO promedio del agua cruda es de 220 mg/L, para cumplir con el Decreto 1594 de 1984 se requiere obtener un efluente promedio máximo de:

$$0.2 \cdot 220 = 44 \text{ mg/L.}$$

Para tiempos de retención hidráulicos de 18 horas el efluente promedio es de 52 mg/L.

Para tiempos de retención hidráulicos de 36 horas el efluente promedio es de 33 mg/L.

Con el tiempo de retención hidráulico de 18 horas no se alcanza a cumplir con la normatividad de remoción. Pero se espera que una vez el filtro haya llegado a su estado de madurez total, tal meta se pueda cumplir.

A 6 meses del inicio, para TRH de 36 horas se cumplen satisfactoriamente las metas de Remoción para DBO Total en el Agua Residual doméstica.

Tabla 17. Porcentajes de remoción para DBO<sub>5</sub> Total en el periodo 36 horas.

Estadístico	% Remoción TRH 18 horas	% Remoción TRH 36 horas
NÚMERO DE DATOS	11	11
PROMEDIO (mg/L)	60,4	74,5
MAXIMO (mg/L)	81,1	96,2
MINIMO (mg/L)	18,2	40,0
DESVIACIÓN ESTANDAR	20,60	18,07

Los resultados en Remoción de DBO para el periodo de análisis entre el día 139 y 182 son ampliamente superiores a los obtenidos en remoción de DQO. Las eficiencias promedio van del 60% al 75% para tiempos de retención entre 18 y 36 horas respectivamente para el reactor trabajando de manera individual. Eficiencias aceptables en este caso, donde el reactor funciona como tratamiento secundario.

La eficiencia de remoción individual del reactor promedio para DBO del 75% revela que se comporta mejor que reactores análogos de crecimiento suspendido como el UASB, que a diferencia de este trabajan con agua cruda. El hallazgo

sugiere que en el futuro se debe estudiar la posibilidad de poner a trabajar el reactor de placas paralelas con aguas crudas.

Efluente esperado en el sistema para TRH de 18 horas=  
 $136.63 (1-0.604)= 54.11 \text{ mg/L}$ .

Eficiencia de Remoción del Sistema Tanque Imhoff- Reactor en Acrílico para 18 horas:

$$(220-54.11)*100/220=75.4\%$$

Para tiempo de retención Hidráulico de 36 horas:

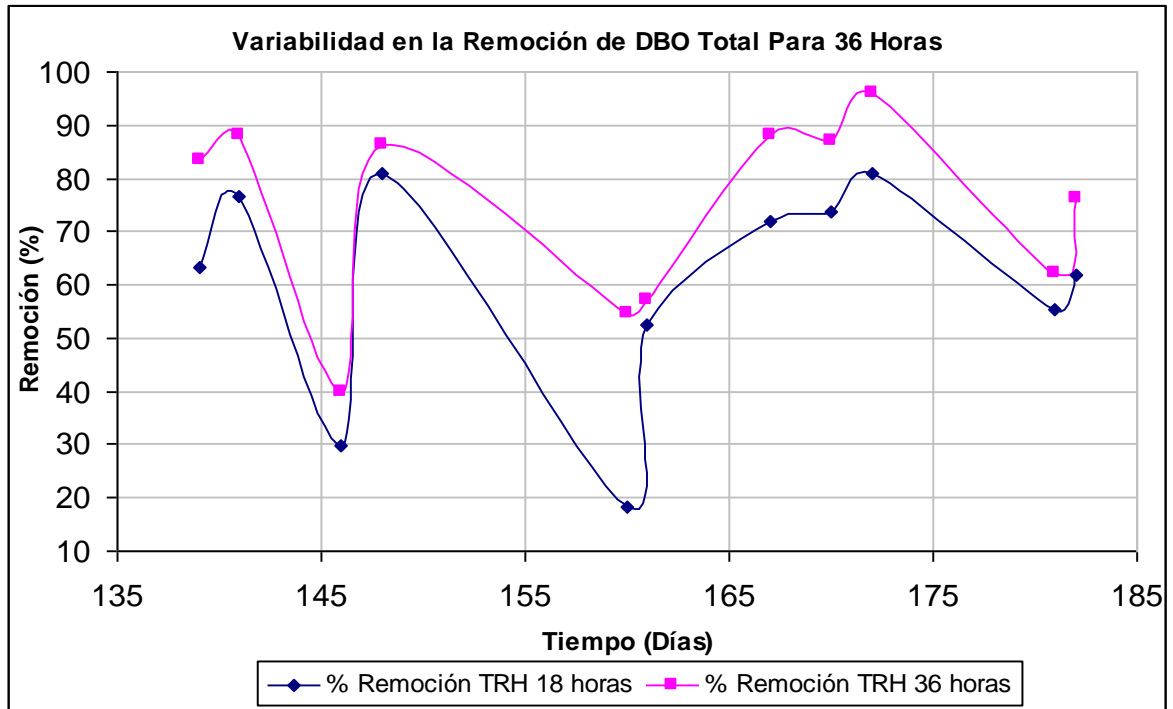
DBO promedio esperada en el efluente =  $136.63 * (1-0.745)= 34.84 \text{ mg/l}$

Eficiencia de Remoción del Sistema Tanque Imhoff- Reactor en Acrílico para 36 horas:

$$(220-34.84)*100/220=84.16\%$$

El siguiente gráfico ilustra la variabilidad de remoción en DBO total durante el periodo señalado:

Figura 25. Variación de la eficiencia de remoción de DBO<sub>5</sub> Total durante el periodo de 36 horas.



Entre los días 130 y 150 el rango de variabilidad en las eficiencias de remoción oscila entre el 20 y 80% para los TRH. Situación que se prolonga hasta el día 167. Esta gran franja de variación implica que el reactor aún no se ha estabilizado. Sin embargo, a partir del día 167 la franja se vuelve estrecha: Para TRH las eficiencias individuales del reactor comienzan a oscilar entre el 60 y el 80%, mientras que las eficiencias para TRH de 36 horas varían entre el 60 y 90%, hecho que indica que el periodo de madurez o estado estable del reactor está a punto de alcanzarse después de un periodo de 5 meses y medio de funcionamiento.

#### 7.2.4 Análisis de DBO Soluble TRH de 18 a 36 horas.

La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos para DBO soluble (ver datos en anexo 3) en el periodo de 36 horas:

Tabla 18. Resultados DBO<sub>5</sub> Soluble para el periodo de 36 horas.

Estadístico	Entrada	TRH 18 Hrs.	TRH 36 Hrs.
NÚEMRO DE DATOS	17	17	17
PROMEDIO	82,2	37,2	23,3
MAXIMO	131,86	74,32	58,40
MINIMO	37,16	15,93	5,31
DESVIACIÓN ESTANDAR	25,2	13,7	14,7

La Tabla 18, se puede analizar con base en los resultados obtenidos en la Evaluación de la DBO total:

Tabla 19. Valores promedio relativos de DBO total y DBO filtrada.

Estadístico	Entrada	TRH 18 horas	TRH 36 horas
TOTAL (mg/l)	136.63	52.19	33.72
SOLUBLE (mg/l)	82.2	37.2	23.3

Del afluente al sistema tomado a la salida del tanque Imhoff:  $82.2 \cdot 100 / 136.3 = 60.3\%$  es materia orgánica soluble y el 39.7% restante es materia orgánica en suspensión o particulada.



Una vez se ha realizado la primera fase de tratamiento, en el punto medio:  $37.2 \cdot 100 / 52.19 = 71.3\%$  es materia soluble y el 28.7% restante es materia orgánica en suspensión.

Para el punto final TRH de 36 horas:  $23.3 \cdot 100 / 33.72 = 69\%$  es materia orgánica soluble y el 31% restante es materia orgánica en suspensión.

En cualquiera de los casos la materia orgánica remanente soluble es superior a la particulada, hecho explicado por la presencia de una operación previa de sedimentación. En términos del proceso señala que el trabajo del reactor combina operaciones físicas con procesos biológicos, de modo que efectivamente se está comportando como un tratamiento secundario mixto con crecimiento de biopelícula en las placas (Crecimiento adherido) y consumo de material soluble en el espacio libre entre placas (Crecimiento suspendido).

Los mismos resultados permiten estimar que porcentaje del trabajo del reactor corresponde a mecanismos biológicos:

En un TRH de 18 horas para DBO TOTAL se remueven en promedio:  $136.63 - 52.19 = 84.44$  mg/L DBO Total.

En el mismo periodo para DBO SOLUBLE se remueven en promedio:  $82,2 - 37,2 = 45,0$  mg/L DBO soluble.

Según esto el porcentaje relativo de remoción de  $DBO_5$  por medios físicos referidos a la remoción total obtenida es  $= (84.4 - 45,0) \cdot 100 / 84.4 = 46.7\%$  y el 53.3% se remueve por medios biológicos.

En un TRH de 36 horas para DBO TOTAL se remueven en promedio:  $136.63 - 33.72 = 102.91$  mg/L DBO Total.

En el mismo periodo para DBO SOLUBLE se remueven en promedio:  $82,2 - 23,3 = 58,9$  mg/L DBO soluble.

Según esto el porcentaje relativo de remoción de DBO<sub>5</sub> por medios físicos referidos a la remoción total obtenida es=  $(102.91-58,9)*100/87,5=42.8\%$  y el 57.2% se remueve por medios biológicos.

Con base en los datos anteriores se puede deducir el comportamiento en las eficiencias de remoción a través del tiempo (Datos en anexo 3):

Tabla 20. Porcentajes de remoción para DBO<sub>5</sub> Soluble en el periodo 36 horas.

Estadístico	% Remoción TRH 18 horas	% Remoción TRH=36 horas
NÚMERO DE DATOS	17	17
PROMEDIO (mg/L)	52,2	70,9
MAXIMO (mg/L)	79,9	95
MINIMO (mg/L)	17,7	35,3
DESVIACIÓN ESTANDARD	17,35	16,19

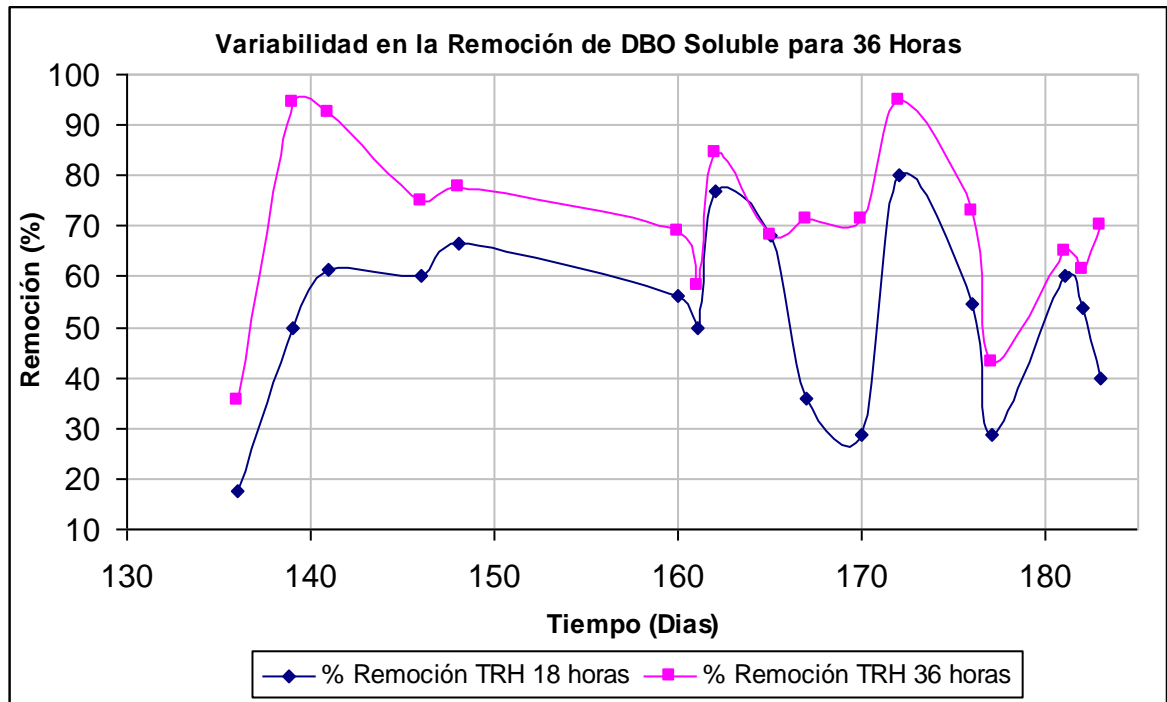
Para TRH de 18 horas la eficiencia de remoción de DBO (52.2%) supera la eficiencia de remoción de DQO (44.2%) en un 8%, hecho explicable por la naturaleza del ensayo de DQO que tiene en cuenta sustancias orgánicas no biodegradables y material inorgánico difícil de descomponer por acción bacterial.

Para TRH de 36 horas el fenómeno se repite: 70.86% de remoción de DBO soluble contra 59.3% de remoción de DQO soluble, diferencia de 11,56% explicada por la misma razón.

El incremento de remoción de DBO<sub>5</sub> soluble de 52.2% a 70.86% para el reactor individual cuando el tiempo de detención pasa de 18 a 36 horas es significativo, sin embargo la diferencia: 18.67%, sugiere que debe haber un tiempo de retención

intermedio con el cual se obtengan resultados óptimos desde el punto de vista económico.

Figura 26. Variación de la eficiencia de remoción de DBO<sub>5</sub> Soluble para el periodo de 36 horas.



La variación de la eficiencia de remoción de DBO<sub>5</sub> soluble para el tiempo de retención hidráulico de 36 horas tiene porcentajes de eficiencias que oscilan entre el 35 y 95%, pero en promedio se registra un 70,86%.

La variación de la eficiencia de remoción de DBO<sub>5</sub> soluble para el tiempo de retención hidráulico de 18 horas tiene porcentajes de eficiencias que oscilan entre el 18 y 80%, pero en promedio se registra un 52,26%.

En la gráfica se observa que no hay una tendencia uniforme para el comportamiento de las dos líneas que representan la eficiencia de remoción de

DBO5 soluble para TRH = 36 horas y TRH = 18 horas. Lo anterior se relaciona directamente con la evolución del filtro hacia un estado de madurez que a 185 días de funcionamiento no se alcanza.

En promedio el tiempo de retención de 36 horas aporta un 18,6% más de eficiencia, en comparación con el tiempo de retención hidráulico de 18 horas. Esto indica que la mayor parte de remoción de DBO5 soluble se efectúa en la primera parte del filtro, para a cual el porcentaje de remoción promedio es de 52,26%.

#### 7.2.5. Análisis Resultados de Sólidos Suspendidos Totales.

En las tablas 21 y 22 (Ver datos en anexo 3) se presentan los resultados obtenidos para sólidos suspendidos y sus respectivos porcentajes de remoción:

Tabla 21. Resultados Sólidos Suspendidos Totales para el periodo de 36 horas.

Estadística	Entrada	TRH 18 horas	TRH 36 horas
NÚMERO DE DATOS	33	33	33
PROMEDIO (mg/L)	60,0	32,0	22,8
MAXIMO (mg/L)	164	66	60
MINIMO (mg/L)	30	7	7
DESVIACIÓN STANDARD	27,2	12,4	12,2

En promedio el efluente del filtro contiene 22,8 mg/L de sólidos suspendidos totales para un tiempo de retención hidráulico de 36 horas, la segunda parte del filtro esta aportando una remoción de 9,2 mg/L de sólidos suspendidos, que representa el 24,73%; la primera parte del filtro aporta una mayor remoción de 28 mg/L de sólidos suspendidos que representa el 75,27%. Se puede apreciar que es suficiente la primera parte del filtro para complementar la remoción de sólidos suspendidos después del tanque Imhoff.

Tabla 22. Porcentaje de remoción de Sólidos Suspendidos Totales para el periodo de 36 horas.

Estadístico	% Remoción TRH 18 horas	% Remoción TRH 36 horas
NÚMERO DE DATOS	33	33
PROMEDIO	41,4	59,5
MAXIMO	79,9	85,7
MINIMO	2,9	22,9
DESVIACIÓN ESTANDARD	22,9182211	19,020794

Se observa que no hay uniformidad en los datos, sin embargo se logra un incremento del 18,1% en la remoción promedio cuando se aumenta el tiempo de retención de 18 a 36 horas.

En comparación con la DBO y la DQO, la eficiencia de la sedimentación en el segundo tramo del reactor es baja.

A diferencia de lo que ocurre con DBO y DQO, los datos revelan que aunque la sedimentación se está realizando principalmente en las partes bajas del reactor, también hay poca contribución a la remoción en el segundo tramo, aunque a la luz de la norma, con la remoción complementaria al tanque Imhoff realizada para periodos de retención de 18 horas es suficiente para garantizar la eficiencia deseada.

Siendo así, se espera que en el periodo de madurez del filtro las eficiencias en remoción de sólidos aumenten. Las Aguas residuales de la Urbanización Villa del Viento tienen una carga de SST promedio de 200 mg/L (Estudio Realizado en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental) en el agua cruda. Si el agua se hace pasar por el tanque Imhoff y luego por el reactor de placas paralelas, en 18 horas, se

obtiene un efluente promedio de 32,0 mg/L (Ver tabla 21), por lo tanto la remoción total del sistema (Tanque Imhoff + Reactor de placas) en periodo de arranque sería:

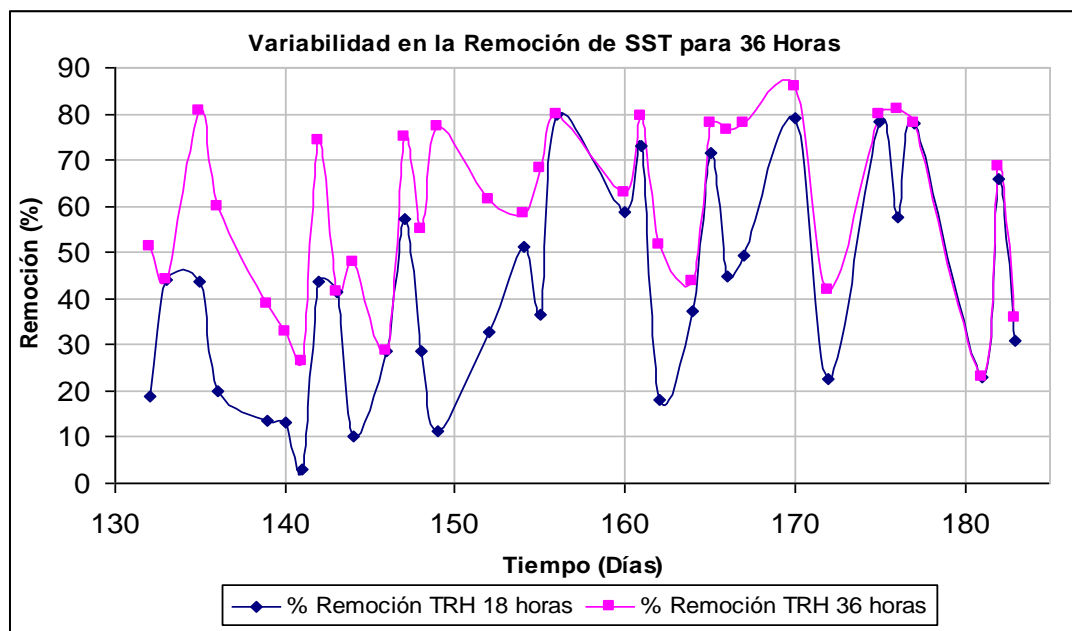
$$R (\%) = (200 - 32,0) * 100 / 200 = 84\%, \text{ por encima del } 80\% \text{ requerido.}$$

Para 36 horas se obtiene un efluente promedio de 22,8 mg/L, por lo tanto la remoción total sería:

$$R (\%) = (200 - 22,8) * 100 / 200 = 88,6\%, \text{ que cumple satisfactoriamente la norma.}$$

Se puede notar claramente comparando los dos resultados anteriores para porcentajes de remoción global, que la parte superior del filtro realiza una remoción despreciable, menor del 5% y no se justifica desde el punto de vista económico pues se esta cumpliendo con la norma para el tiempo de retención hidráulico de 18 horas.

Figura 27. Variación de la eficiencia de remoción de Sólidos Suspendidos Totales para el periodo de 36 horas.



Entre los días 130 y 170 la franja de variación de las remociones está entre 3 y 80% para TRH de 18 horas y entre 28 y 87% para TRH de 36 horas. A partir del día 170 la franja se reduce entre 22 y 78% para TRH de 18 horas y entre 42 y 80% para TRH de 36 horas. Se espera que a medida que pase el tiempo, tales franjas se reduzcan y ofrezca una variabilidad mucho menor.

### 7.3 Análisis Periodo de 24 horas en un estado más avanzado del filtro

#### 7.3.1 Análisis Resultados DQO.

Con el fin de tener una mejor idea sobre el comportamiento del filtro en la etapa final de esta investigación se tomaron datos de remoción de parámetros para periodos de 12 y 24 horas.

Las tablas 23 y 24 (Ver datos en anexo 3) presentan los resultados de DQO y sus respectivas remociones:

Tabla 23. Resultados adicionales DQO Total para el periodo de 24 horas en un estado más avanzado del filtro.

Estadístico	Entrada	TRH 12 horas	TRH 24 horas
NÚMERO DE DATOS	5	5	5
PROMEDIO (mg/L)	351,1	205,4	167,6
MÍNIMO (mg/L)	188,3	132,8	107,6
MÁXIMO (mg/L)	647,0	258,8	205,9
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	193,0	59,5	43,7

Para aguas residuales domésticas como las de Villa del Viento donde la DQO promedio del agua cruda es de 450 mg/L DQO, para cumplir con el Decreto 1594 de 1984 se requiere obtener un efluente promedio máximo de:  $0.2 \cdot 450 = 90 \text{ mg/L}$ .

Para tiempos de retención hidráulicos de 12 horas el efluente promedio es de 205,4 mg/L.

Para tiempos de retención hidráulicos de 24 horas el efluente promedio es de 167,6 mg/L.

Comparando las remociones entre el TRH de 24 horas y el TRH de 12 horas hay una diferencia de 37,8 mg/L que se remueven en la segunda parte del filtro. En la parte inicial del reactor es donde más se remueve DQO, logrando remover 145,7 mg/L. Pero aún con la baja eficiencia en la segunda parte del reactor no se alcanza a cumplir con la normatividad, que es de una remoción global del 80%.

Con los tiempos de retención hidráulicos de 12 horas y 24 horas no se alcanza a cumplir con la normatividad de remoción a 197 días de inicio.

Tabla 24. Porcentaje de remoción DQO Total para el periodo de 24 horas en un estado más avanzado del filtro.

Estadístico	% Remoción TRH 12 horas	% Remoción TRH 24 horas
NÚMERO DE DATOS	5	5
PROMEDIO	35,8	46,0
MÍNIMO	24,8	24,8
MÁXIMO	60,0	70,5
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	14,0	16,4

Se presenta un incremento del 10,2% promedio en la eficiencia de remoción, cuando se varía el Tiempo de retención de 12 a 24 horas.



El Efluente del Tanque Imhoff tiene un promedio de 351,1 mg/L de DQO, bajo tales circunstancias y teniendo en cuenta los porcentajes de remoción presentados en la Tabla 24, se tiene:

Efluente esperado en el sistema para TRH de 12 horas=  
 $351,1 (1-0.358)=225,4$  mg/L.

Eficiencia de Remoción del Sistema Tanque Imhoff- Reactor en Acrílico:  
 $(450-225,4)*100/450=49,91\%$ .

Según esto, aún a 197 días de haber iniciado su trabajo el reactor, su eficiencia de remoción no alcanza a cumplir con lo estipulado por el RAS 2000 y el Decreto 1594 de 1984, que exigen eficiencias globales del 80% para DQO.

Para tiempo de retención Hidráulico de 24 horas:

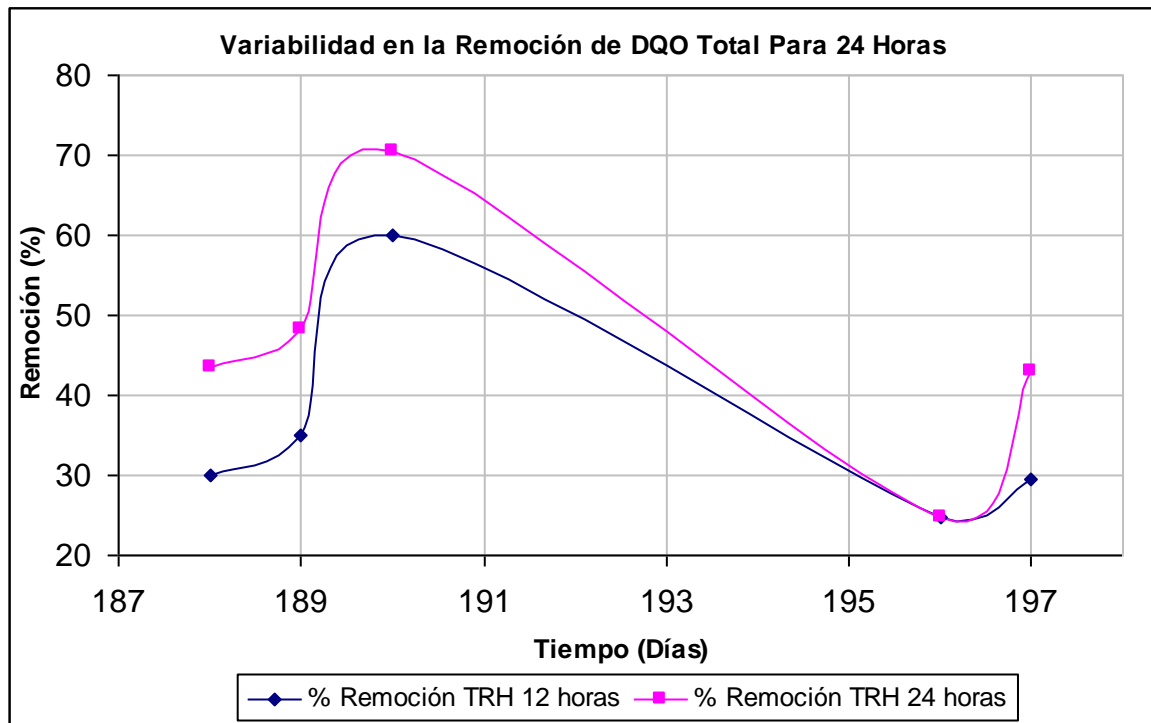
DQO promedio esperada en el efluente = $351,1 * (1-0.46)=189,6$  mg/L.

Eficiencia de Remoción del Sistema Tanque Imhoff- Reactor en Acrílico:  
 $(450-189,6)*100/450=57,9\%$ .

A pesar del incremento en la eficiencia global, tampoco se alcanza a cumplir con las metas de remoción a 197 días de haber iniciado su trabajo el reactor.

Las eficiencias alcanzadas sugieren, que el reactor aún no ha alcanzado su estado de madurez y que se requiere hacer evaluaciones adicionales en periodos superiores a 197 días (8 meses a un año), ya que de mantenerse las remociones en los topes alcanzados, la configuración construida no constituye una solución adecuada para el tratamiento secundario de aguas residuales domésticas.

Figura 28. Variación de la eficiencia de remoción de DQO Total para el periodo de 24 horas en un estado más avanzado del filtro.



Las líneas que representan un TRH de 12 y 24 horas presentan un comportamiento similar y la diferencia entre ellas es leve. Para un TRH de 24 horas se presentó un valor máximo de 70,5% y un valor mínimo de 24,8%. Para un TRH de 12 horas se presentó un valor máximo de 60,0% y un valor mínimo de 24,8%. Comparando el día 188 y el día 197 al final del periodo se nota que el porcentaje de eficiencia se mantiene en 45% para TRH de 24 horas y en 30% para TRH de 12 horas.

En las tablas 25 y 26 se relacionan los resultados y porcentajes de remoción para el parámetro DQO soluble (Datos en anexo 3).

Tabla 25. Resultados adicionales de DQO Soluble para el periodo de 24 horas en un estado más avanzado del filtro.

Estadístico	Entrada	TRH 12 horas	TRH 24 horas
NUMERO DE DATOS	4	4	4
PROMEDIO (mg/L)	217,9	159,3	122,1
MÍNIMO (mg/L)	132,8	105,1	87,4
MÁXIMO (mg/L)	301,7	200,9	147,9
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	73,2	40,0	29,6

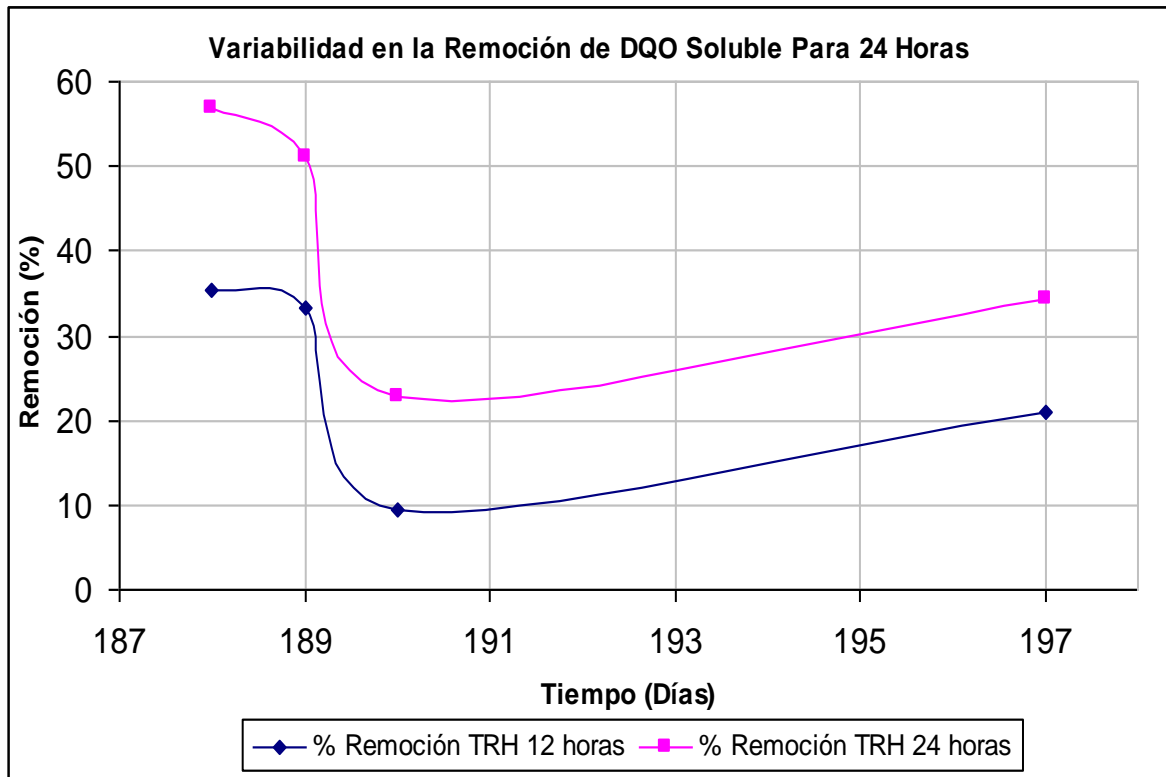
En la parte inferior del reactor se remueven en promedio 58,6 mg/L DQO SOLUBLE y en la segunda parte se remueven en promedio 37,2 mg/L DQO SOLUBLE, lo que indica que en las dos partes del reactor se realizan remociones similares de DQO SOLUBLE.

Tabla 26. Porcentaje de remoción DQO Soluble para el periodo de 24 horas en un estado más avanzado del filtro.

Estadístico	% Remoción TRH 12 horas	% Remoción TRH 24 horas
NÚMERO DE DATOS	4	4
PROMEDIO	24,8	41,2
MÍNIMO	9,4	22,8
MÁXIMO	35,5	56,8
DESV ESTÁNDAR	12,1	15,6

Se nota que los porcentajes de remoción promedio de DQO SOLUBLE para 24 horas son de 41,2% y de 24,8% para 12 horas. En promedio el porcentaje de remoción de DQO SOLUBLE que aporta la parte superior del reactor es del 16,4%, en comparación con un 24,8% de la parte inferior.

Figura 29. Variación de la eficiencia de remoción de DQO Soluble para el periodo de 24 horas en un estado más avanzado del filtro.



Para este periodo entre los días 188 a 190 se observa un decrecimiento en el porcentaje de remoción de DQO soluble, lo que indica que el filtro aún esta en proceso de maduración, y entre los días 190 a 197 se nota una mejora estable lo cual es indicio del posible comienzo de estabilización del filtro. El anterior hecho corrobora la necesidad de evaluar el filtro para un periodo entre ocho meses a un año, para poder apreciar su funcionamiento después de llegar a un estado de madurez estable. El comportamiento de las dos líneas es muy similar a lo largo de este periodo evaluado pero se nota una mayor eficiencia de remoción para el TRH de 24 horas.

Tabla 27. Resultados promedios relativos en la evaluación de DQO para el periodo de 24 horas en un estado más avanzado del filtro.

Estadístico	Entrada	TRH 12 horas	TRH 24 horas
TOTAL (mg/L)	351,1	205,4	167,6
SOLUBLE (mg/L)	217,9	159,3	122,1

En un TRH de 12 horas para DQO TOTAL se remueven en promedio:  $351-205.4=145.7$  mg/L DQO Total.

En el mismo periodo para DQO SOLUBLE se remueven en promedio:  $217.9-159.3=58.6$  mg/L DQO soluble.

Según esto el porcentaje relativo de remoción de DQO por medios físicos referidos a la remoción total obtenida es=  $(145.7-58.6)*100/145.7=59.78\%$  y el 40.22 % se remueve por medios biológicos.

Por tanto, del porcentaje de remoción de DQO total (35.8% promedio),  $0.5978*35.8=21.40\%$  se remueve por sedimentación y adsorción y el 14.4% restante se remueve por acción biológica.

En un TRH de 24 horas para DQO TOTAL se remueven en promedio:  $351.1-167.6=183.5$  mg/L DQO Total.

En el mismo periodo para DQO SOLUBLE se remueven en promedio:  $217.9-122.1=95.8$  mg/L DQO soluble.

Según esto el porcentaje relativo de remoción de DQO por medios físicos referidos a la remoción total obtenida es=  $(183.5-95.8)*100/183.5=47.79\%$  y el 52.21 % se remueve por medios biológicos.

Por tanto, del porcentaje de remoción de DQO total (46.0% promedio),  $0.4779 \times 46.0 = 21.98\%$  se remueve por sedimentación y adsorción y el 24.02% restante se remueve por acción biológica.

### 7.3.2. Análisis resultados DBO.

Los resultados y las remociones se presentan en las tablas 28 y 29 (Datos en anexo 3):

Tabla 28. Resultados adicionales de DBO<sub>5</sub> Total para el periodo de 24 horas en una etapa mas avanzada del filtro.

Estadístico	Entrada	TRH 12 horas	TRH 24 horas
NÚMERO DE DATOS	5	5	5
PROMEDIO (mg/L)	138,4	71,2	42,2
MÍNIMO (mg/L)	72,52	26,37	19,78
MÁXIMO (mg/L)	197,78	125,26	79,11
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	45,9	38,8	23,0

Para aguas residuales domésticas como las de Villa del Viento donde la DBO promedio del agua cruda es de 220mg/L DBO para cumplir con el Decreto 1594 de 1984 se requiere obtener un efluente promedio máximo de:  $0.2 \times 220 = 44 \text{mg/L}$ .

Para tiempos de retención hidráulicos de 12 horas el efluente promedio es de 71.2 mg/L.

Para tiempos de retención hidráulicos de 24 horas el efluente promedio es de 42.2 mg/L.

Con el tiempo de retención hidráulico de 12 horas no se alcanza a cumplir con la normatividad de remoción. Con el tiempo de retención hidráulico de 24 horas se

logra cumplir sobre el límite de lo permitido en el Agua Residual doméstica, con poco más de 6 meses del inicio.

Tabla 29. Porcentaje de remoción DBO<sub>5</sub> Total para el periodo de 24 horas en una etapa más avanzada del filtro.

Estadístico	% Remoción TRH 12 horas	% Remoción TRH 24 horas
NÚMERO DE DATOS	5	5
PROMEDIO	48,4	61,6
MÍNIMO	20,8	45,4
MÁXIMO	78,9	84,2
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	21,7	15,3

Se presenta un incremento 13.2% promedio en la eficiencia de remoción, cuando se varía el Tiempo de retención de 12 a 24 horas.

Los resultados en Remoción de DBO para el periodo de análisis entre el día 188 y 197 son ampliamente superiores a los obtenidos en remoción de DQO. Las eficiencias promedio van del 48% al 61% para tiempos de retención entre 12 y 24 horas respectivamente, comparados con 36% y 46% para DQO TOTAL.

El agua cruda de Villa del Viento tiene una DBO<sub>5</sub> promedio de 220 mg/L .

El Efluente del Tanque Imhoff tiene un promedio de 138.4 mg/L de DBO, bajo tales circunstancias y teniendo en cuenta los porcentajes de remoción presentados en la Tabla 29, se tiene:

Efluente esperado en el sistema para TRH de 12 horas:

$$138.4 (1-0.484)=71.41 \text{ mg/L.}$$

Eficiencia de Remoción del Sistema Tanque Imhoff- Reactor en Acrílico:

$$(220-71.41)*100/220=67.54\%.$$

Según esto, aún a poco más de 6 meses de haber iniciado su trabajo el reactor, su eficiencia de remoción no alcanza a cumplir con lo estipulado por el RAS 2000 y el Decreto 1594 de 1984, que exigen eficiencias globales del 80% para DBO.

Para tiempo de retención Hidráulico de 24 horas, DBO promedio esperada en el efluente:

$$138.4*(1-0.616)=53.15 \text{ mg/L.}$$

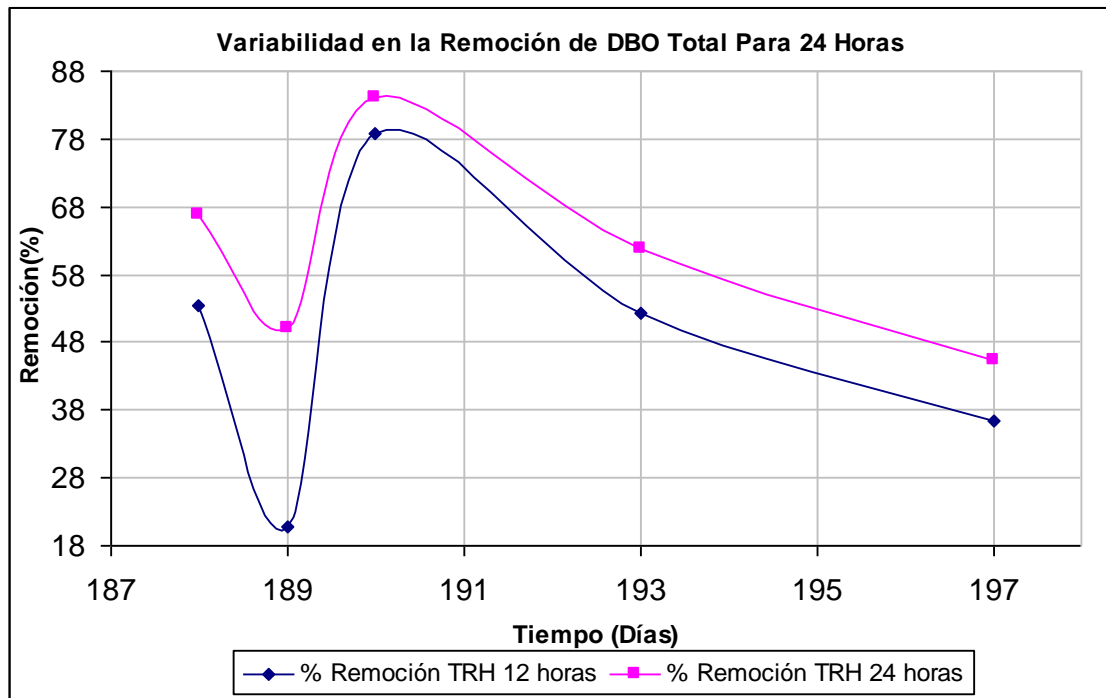
Eficiencia de Remoción del Sistema Tanque Imhoff- Reactor en Acrílico:

$$(220-53.15)*100/220=75.84\%.$$

A pesar del incremento en la eficiencia global, tampoco se alcanza a cumplir con las metas de remoción a 6 meses y 17 días de haber iniciado su trabajo el reactor. Pero falta muy poco para llegar a esta meta, 4% en promedio, y esperando a que se madure totalmente, lo más probable es que se pueda cumplir el objetivo.



Figura 30. Variación de la eficiencia de remoción de DBO<sub>5</sub> Total para el periodo de 24 horas en un estado más avanzado del filtro.



En el día 190 después del inicio del filtro, alcanza un pico del 80% en remoción tanto para 12 y 24 horas, y luego cae hasta poco más del 35% para 12 horas y 45% para 24 horas, lo que indica que en la última semana de observación del filtro la calidad del agua afluente al filtro en estudio disminuyó significativamente impidiendo el buen funcionamiento del mismo.

Las gráficas de DQO Total (Figura 28) y de DBO<sub>5</sub> Total tienen un comportamiento semejante lo que demuestra que a 197 días de arranque del filtro no se alcanza un estado de madurez constante, pero hacia los días 190 a 197 se logra apreciar una tendencia uniforme en las gráficas, indicio esto de que se puede estar próximo a la madurez.

Las tablas 30 y 32 (Ver datos en anexo 3), resumen los resultados y remociones de DBO<sub>5</sub> en un periodo mas avanzado del filtro:

Tabla 30. Resultados adicionales de DBO<sub>5</sub> Soluble para el periodo de 24 horas en un estado mas avanzado del filtro.

Estadístico	Entrada	TRH 12 horas	TRH 24 horas
NÚMERO DE DATOS	5	5	5
PROMEDIO (mg/L)	76,9	44,0	27,5
MÍNIMO (mg/L)	46,15	32,96	13,19
MÁXIMO (mg/L)	145,04	85,71	59,34
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	43,5	20,8	16,8

La Tabla 30, se puede analizar con base en los resultados obtenidos en la Evaluación de la DBO total:

Tabla 31. Valores promedio relativos de DBO total y DBO filtrada.

Estadístico	Entrada	TRH 12horas	TRH 24 horas
TOTAL (mg/L)	138,4	71,2	42,2
SOLUBLE (mg/L)	76,9	44,0	27,5

Del afluente al sistema tomado a la salida del tanque Imhoff:  $76,9 \cdot 100 / 138,4 = 55,56\%$  es materia orgánica soluble y el 44,44% restante es materia orgánica en suspensión o particulada.

Una vez se ha realizado la primera fase de tratamiento, en el punto medio:  $44,0 \cdot 100 / 71,2 = 61,80\%$  es materia soluble y el 38,20% restante es materia orgánica en suspensión.

Para el punto final TRH de 24 horas:  $27,5 \cdot 100 / 42,2 = 65,17\%$  es materia orgánica soluble y el 34,83% restante es materia orgánica en suspensión.

En cualquiera de los casos la materia orgánica remanente soluble es superior a la particulada, hecho explicado por la presencia de una operación previa de sedimentación. En términos del proceso señala que el trabajo del reactor combina operaciones físicas con procesos biológicos, de modo que efectivamente se está comportando como un tratamiento secundario mixto con crecimiento de biopelícula en las placas (Crecimiento adherido) y consumo de material soluble en el espacio libre entre placas (Crecimiento suspendido).

Los mismos resultados permiten estimar que porcentaje del trabajo del reactor corresponde a mecanismos biológicos:

En un TRH de 12 horas para DBO TOTAL se remueven en promedio:  $138,4 - 71,2 = 67,2$  mg/L DBO Total.

En el mismo periodo para DBO SOLUBLE se remueven en promedio:  $76,9 - 44,0 = 32,9$  mg/L DBO soluble.

Según esto el porcentaje relativo de remoción de  $DBO_5$  por medios físicos referidos a la remoción total obtenida es=  $(67,2 - 32,9) \cdot 100 / 67,2 = 51,04\%$  y el 48,96% se remueve por medios biológicos.

Por tanto, del porcentaje de remoción de  $DBO_5$  total (48,4% promedio),  $0,5104 \cdot 48,4 = 24,70\%$  se remueve por sedimentación y adsorción y el 23,7% restante se remueve por acción biológica.

En un TRH de 24 horas para DBO TOTAL se remueven en promedio:  $138,4 - 42,2 = 96,2$  mg/L DBO Total.

En el mismo periodo para DBO SOLUBLE se remueven en promedio:  $76,9 - 27,5 = 49,4$  mg/L DBO soluble.

Según esto el porcentaje relativo de remoción de DBO<sub>5</sub> por medios físicos referidos a la remoción total obtenida es  $= (96,2 - 49,4) * 100 / 96,2 = 48,65\%$  y el 51,35% se remueve por medios biológicos.

Por tanto, del porcentaje de remoción de DBO total (61,6% promedio),  $0,4865 * 61,6 = 29,97\%$  se remueve por sedimentación y adsorción y el 31,63% restante se remueve por acción biológica.

Con base en los datos anteriores se puede deducir el comportamiento en las eficiencias de remoción a través del tiempo:

Tabla 32. Porcentaje de remoción de DBO<sub>5</sub> Soluble para el periodo de 24 horas en un estado más avanzado del filtro.

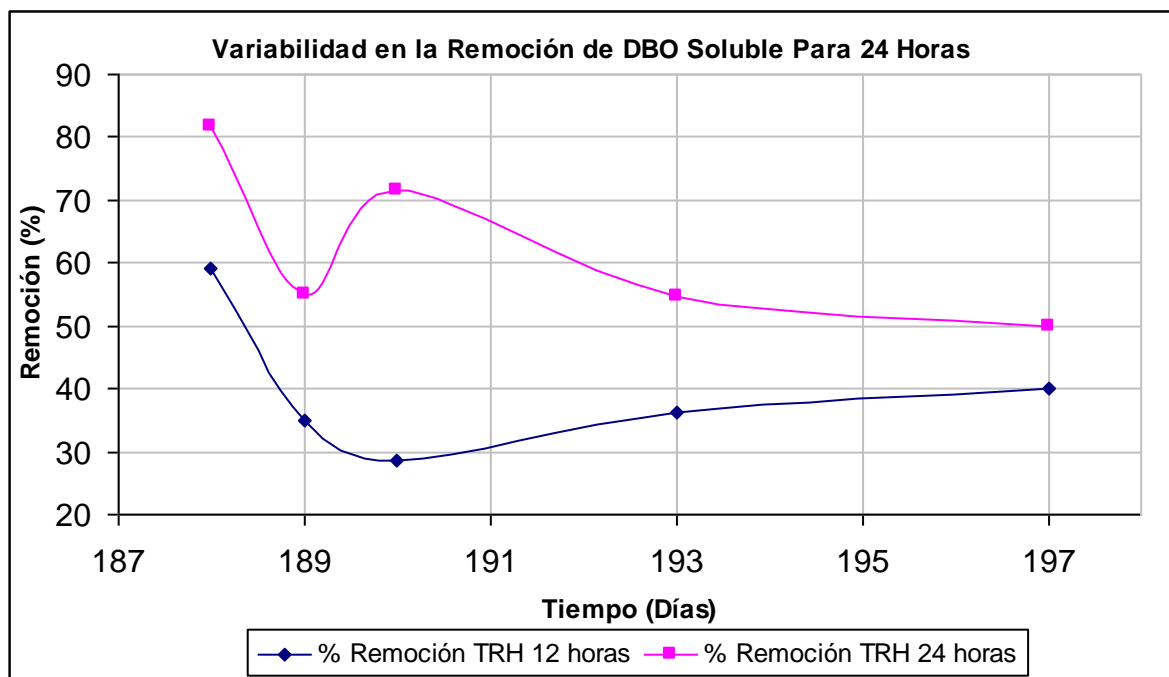
Estadístico	% Remoción TRH 12 horas	% Remoción TRH 24 horas
NÚMERO DE DATOS	5	5
PROMEDIO	39,81	62,56
MÍNIMO	28,58	50,01
MÁXIMO	59,09	81,82
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	11,54	13,49

Para TRH de 12 horas la eficiencia de remoción de DBO (39,81%) supera la eficiencia de remoción de DQO (24,8%) en un 15%, hecho explicable por la naturaleza del ensayo de DQO que tiene en cuenta sustancias orgánicas no biodegradables y material inorgánico difícil de descomponer por acción bacteriana.

Para TRH de 24 horas el fenómeno se repite: 62,56% de remoción de DBO soluble contra 41,2% de remoción de DQO soluble, diferencia de 21,36% explicada por la misma razón.

El incremento de remoción de DBO<sub>5</sub> soluble de 39,81% a 62,56% para el reactor individual cuando el tiempo de detención pasa de 12 a 24 horas es significativo, sin embargo la diferencia: 22,75%, sugiere que debe haber un tiempo de retención intermedio con el cual se obtengan resultados óptimos desde el punto de vista económico.

Figura 31. Variación de la eficiencia de remoción de DBO<sub>5</sub> Soluble para el periodo de 24 horas en un estado más avanzado del filtro.



Entre los días 188 y 190 el rango de variabilidad en las eficiencias de remoción oscila entre el 80 y 25% para los TRH de 12 y 24 horas. A partir del día 190 la franja se vuelve estrecha: entre 40 y 50% hecho que indica que el periodo de

madurez o estado estable del reactor está a punto de alcanzarse después de un periodo de 6 meses y 17 días de funcionamiento.

### 7.3.3. Análisis Resultados Sólidos Suspendidos Totales.

Las tablas 33 y 34 (Ver datos en anexo 3) resumen los resultados de remoción de sólidos suspendidos en la etapa final de esta investigación:

Tabla 33. Resultados adicionales de Sólidos Suspendidos totales para el periodo de 24 horas en un estado mas avanzado del filtro.

Estadístico	Entrada	TRH 12 horas	TRH 24 horas
NÚMERO DE DATOS	5	5	5
PROMEDIO	78,0	36,4	25,6
MÁXIMO	42,0	18,0	3,0
MÍNIMO	128,0	55,0	39,0
DESVIACIÓN ESTANDARD	31,7	13,5	13,5

Por tratarse de aguas residuales previamente decantadas en un tanque Imhoff el afluente tiene valores bajos, en promedio 78mg/L, sin embargo el resultado promedio final de 25 mg/L revela, que el reactor está cumpliendo de manera eficiente funciones adicionales de sedimentación como tratamiento secundario al pulir el afluente, de modo que cumple con las normas Nacionales de Remoción de sólidos suspendidos.

Tabla 34. Porcentaje de remoción de Sólidos Suspendidos Totales para el periodo de 24 horas en un estado más avanzado del filtro.

Estadístico	% Remoción TRH 12 horas	% Remoción TRH 24 horas
NÚMERO DE DATOS	5	5
PROMEDIO	49,24	63,10
MÍNIMO	19,05	26,19
MÁXIMO	71,88	95,31
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	22,83	26,23

Los datos revelan que aunque la sedimentación se está realizando principalmente en las partes bajas del reactor, también hay contribución a la remoción en el segundo tramo, en promedio 13,86%, aunque a la luz de la norma, con la remoción complementaria al tanque Imhoff realizada para periodos de retención de 12 horas es suficiente para garantizar la eficiencia deseada.

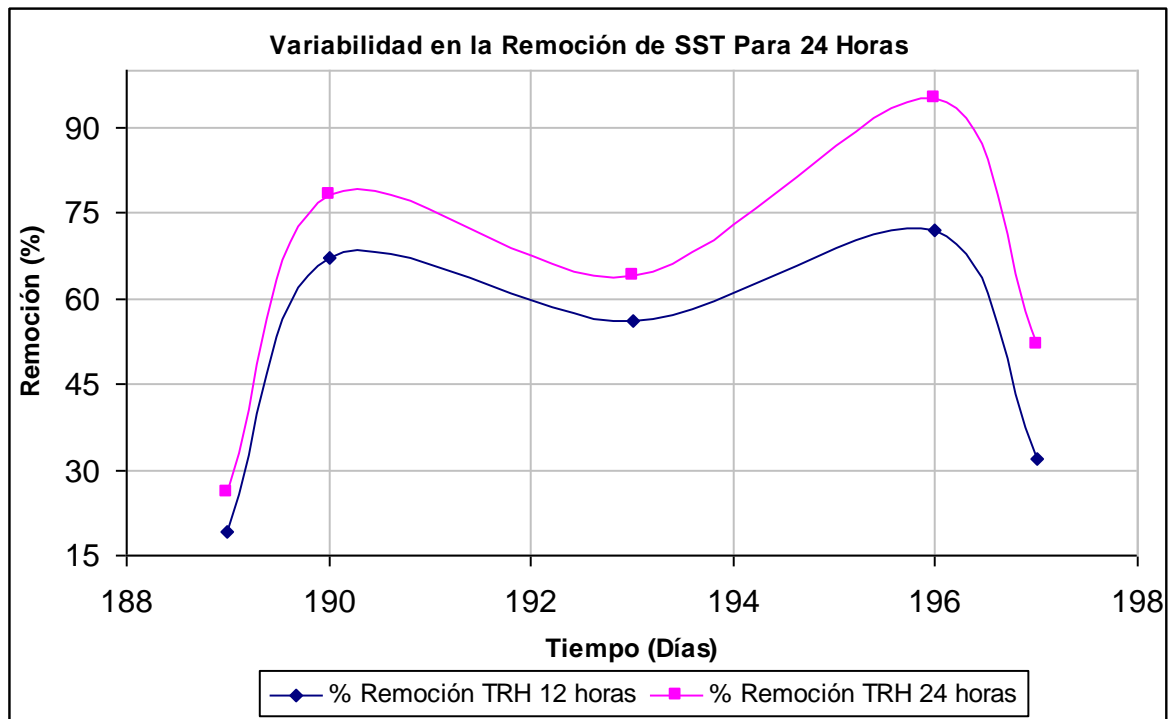
Siendo así, se espera que en el periodo de madurez del filtro las eficiencias en remoción de sólidos aumenten. Las Aguas residuales de la Urbanización Villa del Viento tienen una carga de SST promedio de 200 mg/L en el agua cruda. Si el agua se hace pasar por el tanque Imhoff y luego por el reactor de placas paralelas, en 12 horas, se obtiene un efluente promedio de 36,4 mg/L, por lo tanto la remoción total del sistema (Tanque Imhoff + Reactor de placas) en periodo de 12 horas sería:

$$R (\%) = (200 - 36.4) * 100 / 200 = 81,8\%, \text{ por encima del } 80\% \text{ requerido.}$$

Para 24 horas se obtiene un efluente promedio de 25,6 mg/L, por lo tanto la remoción total sería:

$R (\%) = (200 - 25,6) * 100 / 200 = 87,2\%$ , que cumple satisfactoriamente la norma.

Figura 32. Variación de la eficiencia de remoción de Sólidos Suspendidos Totales para el periodo de 24 horas en una etapa más avanzada del filtro.



En la gráfica se observa que las líneas que representan un tiempo de retención hidráulico de 12 y 24 horas se comportan de manera muy similar, y su separación una de la otra es poca. Se nota que las eficiencias desde el día 189 al día 196 fueron aumentando significativamente de 20 a más del 70% en remoción de sólidos suspendidos totales, de lo cual podemos decir que su estado estable está a punto de alcanzarse después de 6 meses y 17 días de iniciado el funcionamiento del reactor.



## 8. DESARROLLO DEL OBJETIVO NO. 3

*Comparar las eficiencias de remoción en dos puntos de muestreo a diferentes alturas del filtro (90 cm y 180 cm respectivamente).*

Las eficiencias de remoción se comparan entre los diferentes puntos de muestreo del filtro con referencia a dos alturas, 90 cm y 180 cm, pero estas alturas se relacionan directamente con los tiempos de retención hidráulico con que funciona el reactor, siendo esta última la característica mas relevante para el diseño.

Tabla 35. Porcentaje de remoción promedio para DQO, DBO y SST.

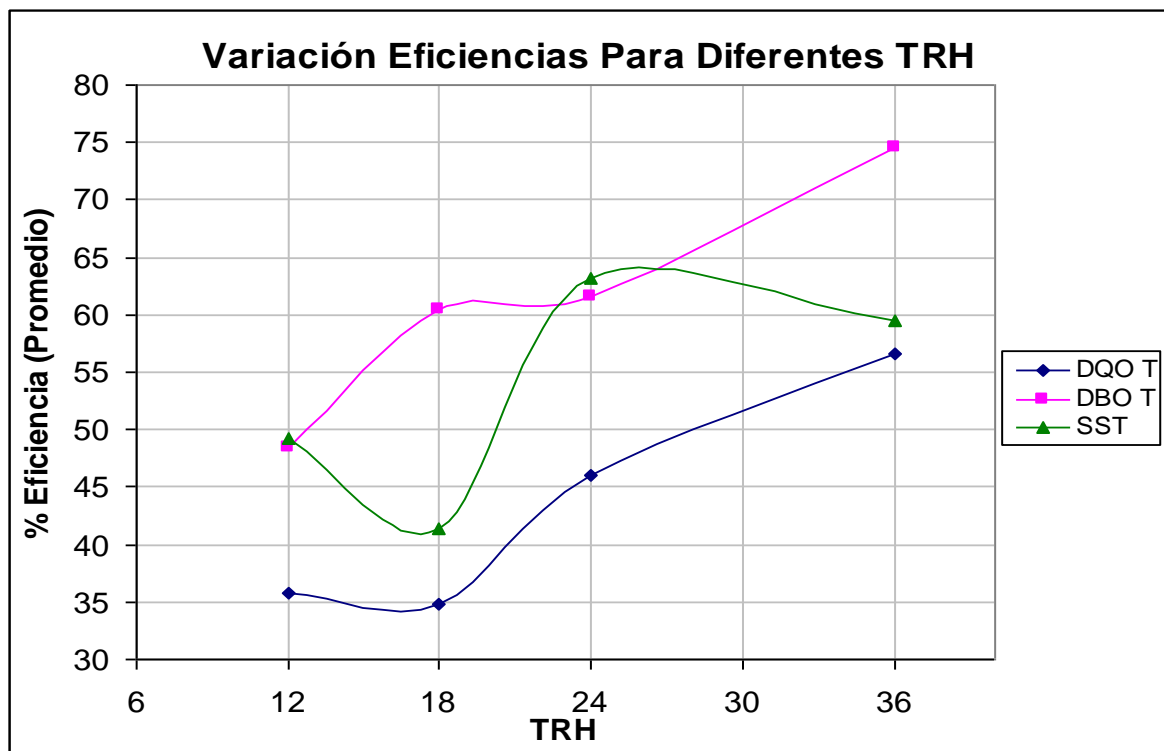
Periodo	Ordinal (día)	TRH (horas)	Altura (cm)	% Remoción Promedio				
				DQO total	DQO soluble	DBO total	DBO soluble	SST
Arranque	108-130	12	90	33.7	32.2	-	-	51.2
		24	180	40.9	39.8	39.8	-	64.7
Medio	132-183	18	90	34.8	44.2	60.4	52.3	41.4
		36	180	56.6	59.3	74.5	70.9	59.5
Final	188-197	12	90	35.8	24.8	48.4	39.8	49.2
		24	180	46.0	41.2	61.6	62.6	63.1

Dada la inestabilidad del filtro en el periodo de arranque, los datos reportados en la tabla anterior (Tabla 35), para este periodo no se tienen en cuenta para la siguiente tabla (Tabla 36), en la cual se plasma de forma comparativa las eficiencias de remoción de los parámetros de DQO total, DBO Total y sólidos suspendidos totales, con el fin de observar la mejora en pulimento del efluente a medida que se incrementa el tiempo de retención hidráulico en el filtro y a su vez se acerca paulatinamente a un estado de madurez.

Tabla 36. Porcentajes de remoción promedio para diferentes tiempos de retención hidráulicos.

TRH	% Remoción Promedio		
	DQO T	DBO T	SST
36	56.6	74.5	59.5
24	46.0	61.6	63.1
18	34.8	60.4	41.4
12	35.8	48.4	49.2

Figura 33. Variación de las eficiencias de remoción para diferentes tiempos de retención hidráulicos.



Se nota que al aumentar el tiempo de retención hidráulico en el funcionamiento del reactor mejoran las eficiencias de remoción en parámetros como la DQO Total y la

DBO Total, para los Sólidos suspendidos totales se observa un comportamiento diferente con la variación del tiempo de retención hidráulico, notándose una disminución en la eficiencia de remoción cuando se utiliza un TRH de 18 horas y se aprecia una máxima eficiencia para un TRH de 24 horas, superando incluso la de 36 horas. Para los tres parámetros se distingue claramente en la gráfica una mejor eficiencia en porcentaje para el TRH de 36 horas.

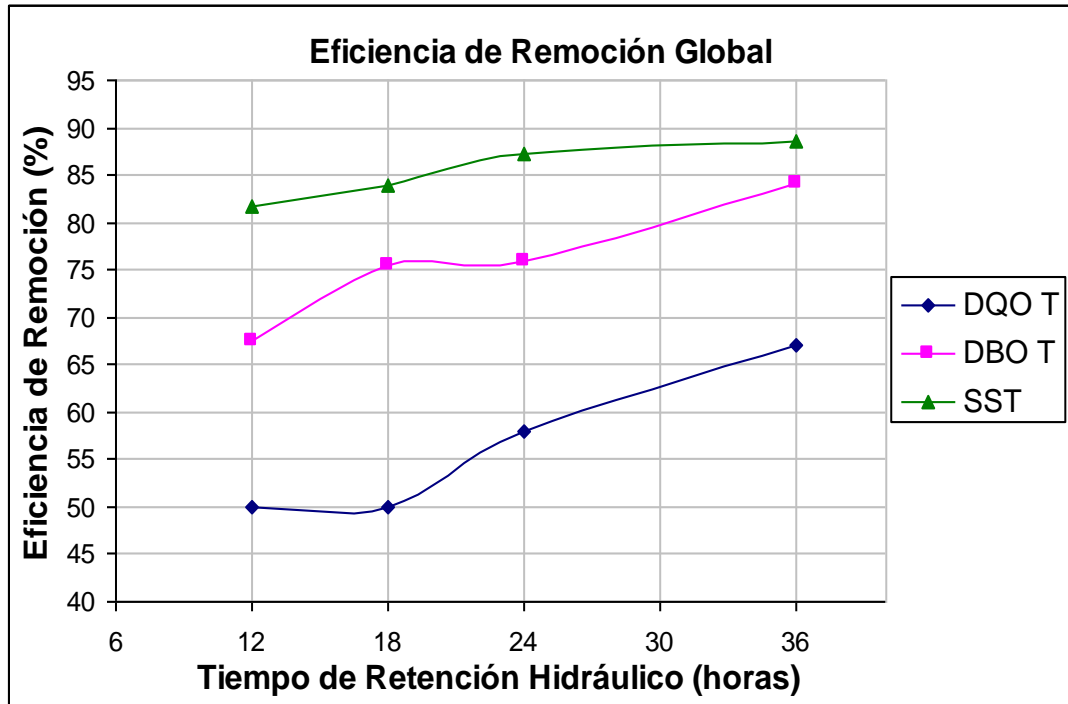
La línea que representa el comportamiento de la eficiencia de remoción de DBO total esta por encima de las líneas de DQO total y SST, hecho que representa que el tratamiento que realiza el filtro al afluente es principalmente biológico, gracias a las bacterias que se adhieren a las placas en acrílico y degradan la materia orgánica, la diferencia entre la remoción de DBO total y la remoción de DQO total es del 18% en promedio.

Dado que el filtro se evaluó en un lapso total de 197 días y no se alcanzó una madurez estable para este tratamiento secundario de tipo biológico, es preciso realizar un estudio que abarque de ocho meses a un año de duración para apreciar el funcionamiento del filtro en su madurez y teniendo en cuenta la posibilidad de superar la eficiencia global de remoción de parámetros como la DQO, DBO y SST exigidos por la normatividad vigente.

Tabla 37. Porcentajes de remoción global.

TRH	% Remoción Global		
	DQO T	DBO T	SST
36	67	84.16	88.6
24	57.9	75.84	87.2
18	50	75.4	84
12	49.91	67.54	81.8

Figura 34. Eficiencias de Remoción Global



En la gráfica se observa que el reactor a pesar de sólo llevar funcionando poco más de seis meses, cumple con la norma para sólidos suspendidos totales en cualquier tiempo de retención. Para DBO con un TRH de 36 horas supera el 80% exigido, y para TRH de 12, 18 y 24 horas están por encima del 65%. La remoción para DQO se nota que esta por debajo del 80%, se espera que al llegar a su estado de madurez cumpla con este objetivo.

Al presentarse los mejores resultados para 24 y 36 horas, se infiere que el filtro debe tener una altura mínima de 1.80m, corroborando las normas estipuladas para altura de reactores anaeróbicos.

## 9. DESARROLLO DEL OBJETIVO NO. 4.

*Evaluar la influencia de parámetros como: Temperatura, pH, y tiempo de retención del flujo en el filtro.*

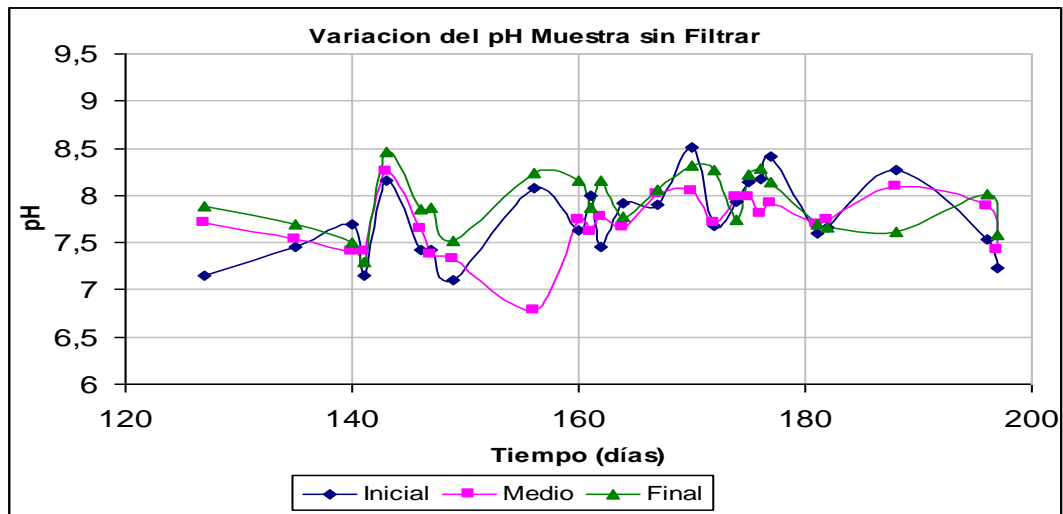
### 9.1. pH

La tablas 38 y 39 resumen los resultados de las medidas de pH (Anexo 3):

Tabla 38. Resultados del pH para muestras sin filtrar.

Estadístico	Entrada	Medio	Final
NÚMERO DE DATOS	25	25	25
PROMEDIO	7,75	7,70	7,91
MÁXIMO	8,51	8,26	8,46
MÍNIMO	7,11	6,78	7,30
DESVIACIÓN ESTANDAR	0,41	0,31	0,30

Figura 35. Variación del pH para muestras sin filtrar.



El rango de variación del pH estuvo entre 6.78 y 8.51 con promedios de 7.75 para la muestra del punto inicial, 7.70 para la muestra del punto medio y 7.91 para la muestra del punto final.

La mayoría de los procesos biológicos empleados en la práctica de la ingeniería ambiental están relacionados con la presencia de organismos que están adaptados para operar en soluciones esencialmente neutras, en consecuencia es importante mantener controlado el pH dentro de un rango muy estrecho, aproximadamente de 6 a 9.

En el tratamiento de aguas residuales mediante procesos biológicos el pH se debe mantener en un margen favorable para los organismos específicos que intervienen, para este caso el intervalo de pH debe estar entre 6.5 y 8.5.

En el caso específico de filtros anaeróbicos, el pH ideal está por encima de 6.8 (Veenstra, 1995).

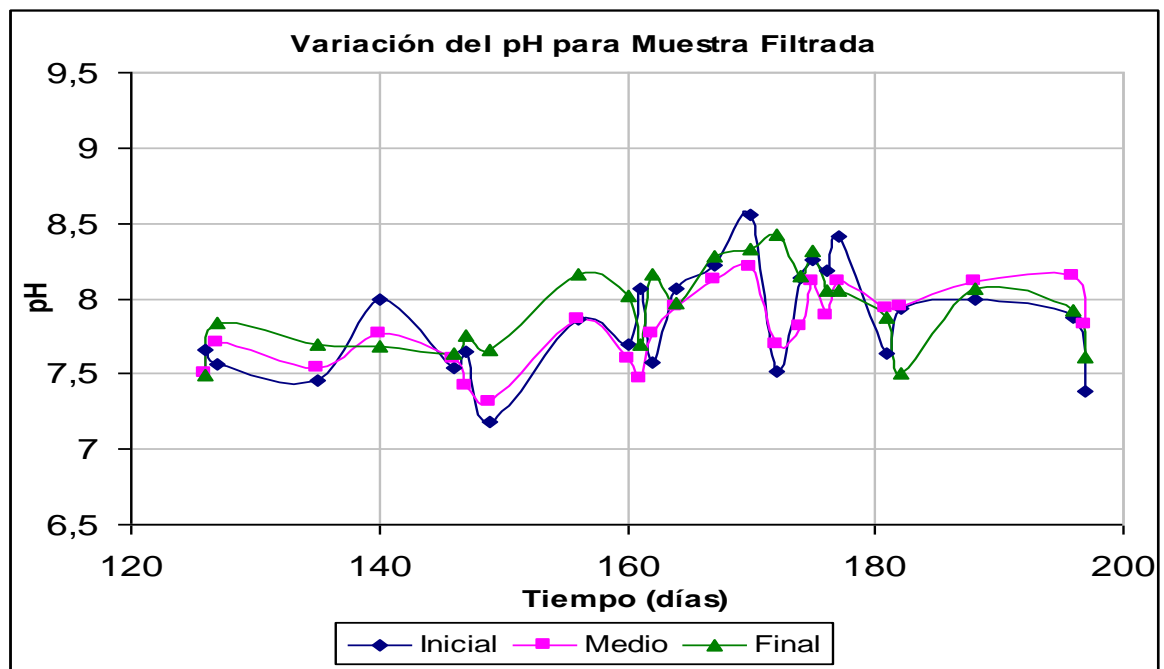
La población bacteriana degrada la materia orgánica del agua residual por medio de reacciones bioquímicas, las cuales son influenciadas por el pH, e inducidas y controladas por enzimas. La influencia del pH en el funcionamiento del filtro a lo largo del tiempo fue propicia para los organismos vivos, puesto que los mantuvo en un rango entre 7.70 y 7.91 en promedio.

La acidificación del medio no favorece los procesos biológicos y genera malos olores en los tratamientos de aguas residuales domésticas, los resultados obtenidos fueron favorables para este caso y evitaron que se presentara tal situación.

Tabla 39. Resultados del pH para muestras filtradas.

Estadístico	Inicial	Medio	Final
NUMERO DE DATOS	24	24	24
PROMEDIO	7,85	7,81	7,93
MÁXIMO	8,56	8,21	8,43
MÍNIMO	7,18	7,31	7,49
DESVIACIÓN ESTANDAR	0,35	0,26	0,28

Figura 36. Variación del pH para muestras filtradas.



Comparando los resultados obtenidos para muestras sin filtrar y filtradas, los valores máximos, mínimos y promedios para las muestras inicial, medio y final no varían significativamente. La filtración, para la evaluación de este reactor anaeróbico de placas paralelas en acrílico, respecto al parámetro del pH no tiene mayor impacto.

Comparando las graficas de las figuras 34 y 35 se nota claramente la similitud entre las líneas que representan el comportamiento del pH para los diferentes puntos de muestreo a lo largo del periodo de evaluación de filtro. El rango de variación del pH esta entre 6.5 y 8.5 para los dos casos.

Cuando el pH se mantiene por encima de 7.0, (como fue el caso del reactor anaeróbico de placas paralelas), el agua residual contiene una adecuada alcalinidad para el desarrollo de los procesos físicos, químicos y biológicos al interior del reactor (Malina, 1992).

## 9.2. Temperatura

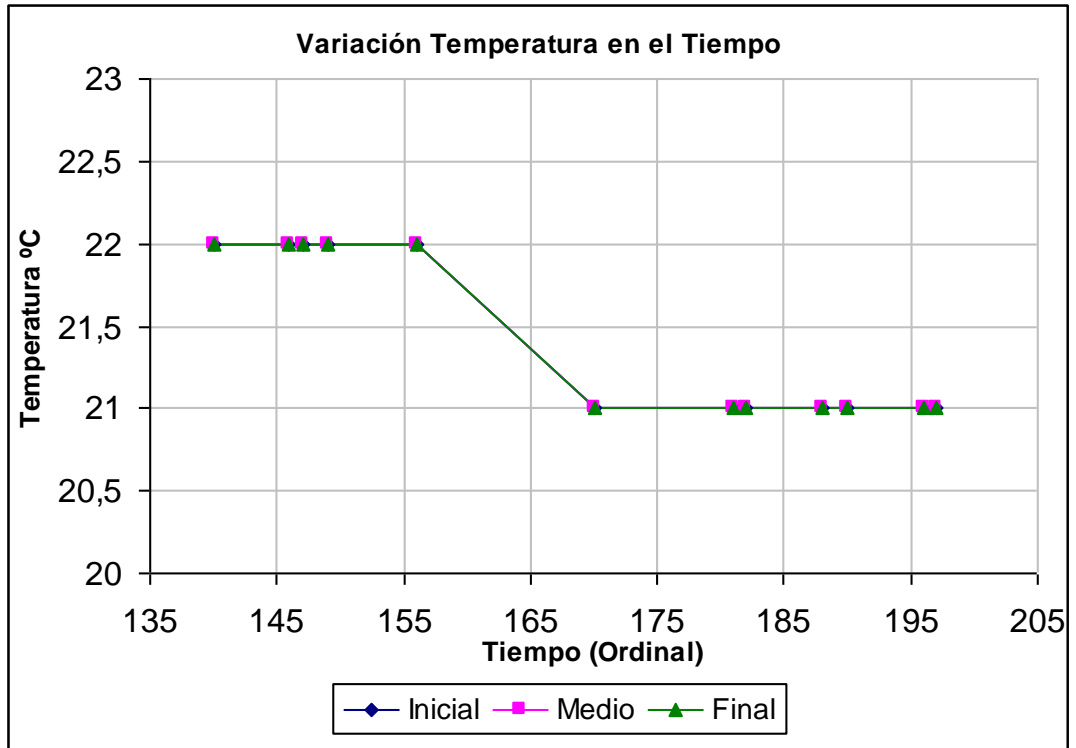
En la tabla 40 se resumen las medidas de temperatura realizadas durante la presente investigación (Ver datos en anexo 3).

Tabla 40. Resultados de temperatura.

Estadístico	Inicial	Medio	Final
NUMERO DE DATOS	12	12	12
PROMEDIO	21,4	21,4	21,4
MÁXIMO	22	22	22
MÍNIMO	21	21	21
DESVIACIÓN ESTANDAR	0,51	0,51	0,51



Figura 37. Variación de la temperatura en el tiempo.



La temperatura reporto valores máximos de 22°C y valores mínimos de 21°C con un promedio de 21.4°C para el tiempo de evaluación del filtro. En la figura 36 la línea que muestra el comportamiento de la temperatura a través del tiempo deja notar que la variación de la temperatura no fue amplia ni brusca, razón por la cual se puede argumentar que no fue fuente importante de variabilidad en los resultados de la investigación.

Una temperatura superior a los 20°C en el medio donde las bacterias realizan la biodegradación de la materia orgánica del agua residual es favorable para su metabolismo.

### 9.3. Tiempo De Retención Hidráulico TRH.

Gracias al mecanismo de la bomba peristáltica, fue posible mantener un caudal constante y garantizar un buen nivel de aproximación a los tiempos de detención hidráulicos estipulados:

Dimensiones del Filtro:

$$L = 6,1 \text{ cm}$$

$$A = 6,2 \text{ cm}$$

$$H = 188 \text{ cm}$$

Volumen del Filtro:

$$V = L * A * H$$

$$V = 6,1 * 6,2 * 188$$

$$V = 7110.16 \text{ cm}^3 = 7.11016 \text{ L}$$

Dimensiones de las Placas:

$$E = 3 \text{ mm}$$

$$A = 5,8 \text{ cm}$$

$$H = 181.5 \text{ cm}$$

Volumen de las Placas:

$$V = E * A * H$$

$$V = 0,3 * 5,8 * 181.5$$

$$V = 315.81 \text{ cm}^3 = 0,31581 \text{ L}$$

Número de Placas = 6

Volumen de todas las Placas =  $6 * 0,31581 \text{ L} = 1,89486 \text{ L}$

Volumen Útil del Filtro:

$V = 7.11016 \text{ L} - 1,89486 \text{ L}$

$V = 5.2153 \text{ L}$

Al respecto se programaron los periodos de encendido y parada de la bomba, de modo que se filtrara el volumen mencionado en un día para el periodo de 24 horas (Entre 0.21y 0.22 L/h) y en 1.5 días (Entre 0.14 y 0.16 L/h) para el periodo de 36 horas.

## 10. RECOMENDACIONES

- Comenzar la evaluación del filtro, seis meses después de su arranque o en su defecto realizar un buen inóculo. Para analizarlo realmente en su estado de madurez.
- Sellar bien el reactor, evitar al máximo tener contacto con la atmósfera y con la luz del exterior, para no contribuir a la formación y crecimiento de algas que podrían alterar los resultados.
- En la medida de lo posible, realizar la fijación del oxígeno “in situ” a la hora de realizar el muestreo, porque el transporte y agitación del contenedor afectan la concentración.
- Realizar una primera prueba para conocer el factor de dilución adecuado basándose en el Standard Methods para la DBO.
- Mantener homogenizada la muestra afluente para evitar que se sedimente, pero teniendo en cuenta de no generar una turbulencia que afecte otros parámetros.
- Al terminar la evaluación del filtro, realizar una medición del volumen de lodo que se acumula en el fondo del reactor (volumen muerto).
- Evaluar el filtro con diferentes tamaños de espaciado entre las placas, con el fin de conocer su configuración óptima y generar su máximo rendimiento para tratar aguas residuales domésticas.
- Realizar un análisis microbiológico del Biofilm que crece adherido a las placas, con métodos de conteo de colonias y otros.
- Para un funcionamiento ideal del filtro, conectarlo directamente al efluente del tratamiento primario para su inmediata alimentación, manteniéndolo aislado de condiciones externas que lo puedan afectar.

- Realizar la evaluación de una planta piloto a escala real en un lapso de ocho meses a un año, que permita generar investigaciones más profundas con miras a lograr la implementación de este método como tratamiento secundario de aguas residuales domesticas para poblaciones pequeñas en condiciones de operación ventajosas en comparación con los sistemas de tratamiento actuales.

## 11. CONCLUSIONES

*Objetivo General.*

*Evaluar la eficiencia de remoción de parámetros fisicoquímicos y biológicos de un reactor anaeróbico montado a escala de laboratorio, utilizando como medio de soporte placas paralelas en acrílico para tratar aguas residuales.*

El reactor anaeróbico de flujo ascendente con placas paralelas en acrílico montado a escala de laboratorio para el tratamiento de aguas residuales domésticas tuvo eficiencias promedio, entre 34.8% a 56.6% para DQO total, entre 48.4% a 74.5% para DBO total y entre 41.4% a 63.1% para SST.

Para comparar los resultados con la normatividad vigente que exige el 80% de eficiencia en remoción de los parámetros, utilizamos la eficiencia global de “Tanque Himhoff - reactor anaeróbico de flujo ascendente con placas paralelas en acrílico”. Los resultados obtenidos superan la norma para remoción de sólidos suspendidos con cualquier tiempo de retención hidráulico (de 81.8% a 88.6%), para DBO total superan la norma con un tiempo de retención hidráulico de 36 horas (84.2%), para DQO total el porcentaje de remoción se aproxima con un 67% de eficiencia para un TRH de 36 horas.

El reactor tuvo un mejor desempeño con un TRH de 36 horas, teniendo en cuenta que no alcanzó su madurez, se podría superar la norma con una evaluación más prolongada con tiempos de retención hidráulicos menores a 36 horas. Lo anterior se aprecia con los datos de porcentaje de remoción global reportados en la tabla 37 para un TRH de 24 horas.

*Objetivo Especifico 1.*

*Estudiar la variabilidad de la eficiencia de remoción de sólidos suspendidos totales, DBO y DQO durante el periodo de arranque del filtro.*

En el periodo de arranque se lograron eficiencias promedio de remoción para DQO de 34% para TRH de 12 horas y 41% para TRH de 24 horas, el valor promedio de remoción de DBO para 24 horas fue del 40% hecho que indica actividad biológica para degradar materia orgánica a los 112 días de haber iniciado el funcionamiento del filtro. Para sólidos suspendidos totales se obtuvieron valores de 51.2% y 64.7% para los TRH de 12 y 24 horas respectivamente, en este periodo la remoción de SST se ve favorecida por el bajo crecimiento de biopelícula en las placas, por esto ofrecen menos resistencia a la caída de sólidos, permitiendo que resbalen.

*Objetivo Especifico 2.*

*Evaluar la eficiencia de remoción del reactor con respecto a demanda bioquímica de oxígeno ( $DBO_5$ ), demanda química de oxígeno (DQO) y sólidos suspendidos totales.*

El porcentaje de remoción de DQO total es menor que el porcentaje de remoción de DBO como consecuencia de descargas de material no biodegradable sobre el afluente de la planta de tratamiento de aguas residuales de Villa del Viento. En general para DQO no se logró cumplir con la normatividad vigente como resultado de la falta de madurez del filtro.

Por los resultados obtenidos para el porcentaje de remoción global de DBO con TRH = 36 horas, podemos concluir que el reactor funciona adecuadamente como tratamiento secundario de aguas residuales domesticas.

Los sólidos suspendidos se remueven fácilmente con este tipo de tratamiento y son un buen complemento para el tratamiento primario, pues fácilmente se supera el porcentaje de remoción exigido por la normatividad vigente que es de un 80 % de eficiencia. Lo anterior para los TRH de 12, 18, 24 y 36 horas en la eficiencia global.

*Objetivo Especifico 3.*

*Comparar las eficiencias de remoción en dos puntos de muestreo a diferentes alturas del filtro (90 cm y 180 cm respectivamente).*

Comparando los dos puntos de muestreo, que representan cuatro tiempos de retención hidráulicos diferentes (12, 18, 24 y 36 horas), se puede concluir que para un TRH de 36 horas se obtienen los mejores porcentajes de remoción. Se espera que el reactor cuando llegue a su estado de madurez, con un TRH menor a 36 horas se pueda cumplir con la remoción de contaminantes exigida por la normatividad vigente. Así mismo es recomendable mantener una altura mínima de 180 cm para el medio soporte.

En términos de diseño, para cumplir con el porcentaje de remoción global exigido para un tratamiento secundario, en principio se recomienda un tiempo de retención hidráulico de 36 horas, ya que en nuestra investigación no se llegó a un estado de madurez estable. Pero si continua evolucionando de la misma manera, se aspira llegar a unas eficiencias de remoción que cumplan con la norma con menores tiempos de retención hidráulicos.



*Objetivo Especifico 4.*

*Evaluar la influencia de parámetros como: Temperatura, pH, y tiempo de retención del flujo en el filtro.*

El pH y la Temperatura fueron adecuados para el desarrollo de procesos biológicos al interior del reactor. El mecanismo del experimento permitió garantizar una muy buena aproximación a los tiempos de detención estipulados.

## 12. ANEXOS

### 12.1. ANEXO 1

#### 12.1.1. PROCEDIMIENTOS DE LABORATORIO

Los análisis de laboratorio se realizaron con métodos químicos estandarizados DQO, DBO, Sólidos Suspendidos, pH : Según THE ESTÁNDAR METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTERWATER. Ultima Edición.

Para evaluar el filtro a cada una de las muestras tomando en los tres puntos referenciados se les realizó análisis físico-químicos y bioquímicos.

- FISICOQUÍMICOS: pH, Temperatura, Sólidos suspendidos, Demanda química de oxígeno,
  - BIOQUIMICOS: Demanda bioquímica de oxígeno.
1. pH: Para la medición del pH se utilizó un equipo digital de marca HANDYLAB, introduciendo el electrodo limpio en cada una de las muestras.
  2. Temperatura: Se utilizó un termómetro manual de vidrio maraca BRAND con un rango de 0 a 100° C.
  3. Sólidos suspendidos: esta prueba se realizó haciendo pasar 100 mL de las tres muestras por filtros de fibra de vidrio previamente secados en crisoles a 103° C en una mufla, se dejaban enfriar en el desecador durante 15 minutos y se pesaban en la balanza analítica marca METTLER AE 240, con ayuda de un

equipo de filtración a vacío marca FISHERBRAND (Glass Microanálisis Filter Holder Assembly) y una bomba marca GAST modelo DOA-P104-AA. Luego se procedía a secar en crisoles en la mufla marca TERRIGENO a 103° C durante 1 hora, se dejaban enfriar en el desecador durante 15 minutos y por último se pesaban en la balanza analítica. Por diferencia de pesos se calcula la cantidad de sólidos suspendidos.

4. Demanda química de oxígeno: para la realización de esta prueba de cada una de las seis muestras (Tres filtradas y tres sin filtrar) se toman 2,5 mL, se depositan en tubos de ensayo marca HACH y se les agregó 1,5 mL de solución digestora y 3,5 mL de solución de ácido sulfúrico. Para establecer un patrón de comparación se utilizó un otro tubo de ensayo al cual se le agregó 2,5 mL de agua destilada, 1,5 mL de solución digestora y 3,5 mL de solución de ácido sulfúrico. Luego los siete tubos de ensayo se llevaron a calentar en el termoreactor marca HACH COD REACTOR durante 120 minutos a 150° C, se dejaban enfriar y posteriormente se realizaba una puesta a cero en el espectrofotómetro de marca HACH DR/2010 con el blanco y se tomó la lectura de la absorbancia de las muestras con una longitud de onda de 600 nm. Como precaución antes de realizar las lecturas en el espectrofotómetro los tubos de ensayo previamente enfriados se lavaban por fuera, secaban y limpiaban con algodón, para disminuir el error.
  
5. Demanda bioquímica de oxígeno: en 12 Winkler marca WHEATON limpios se agregaron 5 mL de cada una de las seis muestras, se enrazaban a 300 mL con agua de dilución previamente preparada, 6 Winkler se llevaban a la nevera durante cinco días con temperatura de 21°C para realizar la lectura posterior del oxígeno disuelto final. A los Winkler restantes se les fijó el oxígeno disuelto con 1mL de sulfato de Manganeso, 1mL de Yoduro Alkali, se agitaron, se les agregó 1 mL de Acido Sulfúrico, se agitaron de nuevo para homogenizar la mezcla y se llevaron a la oscuridad durante cinco minutos. Para leer el oxígeno

disuelto se titulo 200 mL de muestra con solución de Tiosulfato de Sodio con una normalidad conocida, para titular se utilizó un soporte universal marca ABC X-11, pinza, bureta marca VILAB de 50 mL, plancha marca CERAMAG MIDI, agitadores magnéticos, erlenmeyer marca BOECO de 250 mL y probeta marca DURAN SCHOTT MAINZ JENA GLASSd e 250 mL.

6. Preparación de solución digestota para ensayo de DQO: Se pesan 10.216 gramos de Dicromato de Potasio ( $K_2Cr_2O_7$ ) y 33.3 gramos de Sulfato de Plata ( $Ag_2SO_4$ ), se mezclan con 167 mL de Acido Sulfúrico ( $H_2SO_4$ ). Por último se enrasa en un balón volumétrico de 1 Litro con agua destilada ( $H_2O$ ).

## 12.2. ANEXO 2

### 12.2.1. CRONOGRAMA REAL DE ENSAYOS DE LABORATORIO.

Tabla 41. Evaluación durante el período de retención de 24 Horas (Arranque).

ENSAYO	Fecha Inicio	Fecha final	Total días	Total pruebas
D.Q.O. Total	15 AGO 2006	02 SEP 2006	19	9
D.Q.O. Soluble	15 AGO 2006	31 AGO 2006	17	6
D.B.O <sub>5</sub> . Total	11 AGO 2006	18 AGO 2006	8	4
D.B.O <sub>5</sub> . Soluble				
SÓLIDOS SUSPENDIDOS	15 AGO 2006	02 SEP 2006	19	7
PH. Sin filtrar	31 AGO 2006	31 AGO 2006	1	1
PH. Filtrado	30 AGO 2006	31 AGO 2006	2	2

Tabla 42. Evaluación para un período de retención de 36 Horas.

ENSAYO	Fecha Inicio	Fecha final	Total días	Total pruebas
D.Q.O. Total	05 SEP 2006	25 OCT 2006	51	19
D.Q.O. Soluble	04 SEP 2006	25 OCT 2006	52	24
D.B.O <sub>5</sub> . Total	11 SEP 2006	24 OCT 2006	44	11
D.B.O <sub>5</sub> . Soluble	08 SEP 2006	25 OCT 2006	48	17
SÓLIDOS SUSPENDIDOS	04 SEP 2006	25 OCT 2006	52	33
PH. Sin filtrar	07 SEP 2006	24 OCT 2006	48	21
PH. Filtrado	07 SEP 2006	24 OCT 2006	48	20
TEMPERATURA	12 SEP 2006	24 OCT 2006	43	8

Tabla 43. Evaluación para un período de retención de 24 Horas (Estado más avanzado del filtro).

ENSAYO	Fecha Inicio	Fecha final	Total días	Total pruebas
D.Q.O. Total	30 OCT 2006	08 NOV 2006	9	5
D.Q.O. Soluble	30 OCT 2006	08 NOV 2006	9	4
D.B.O <sub>5</sub> . Total	30 OCT 2006	08 NOV 2006	9	5
D.B.O <sub>5</sub> . Soluble	30 OCT 2006	08 NOV 2006	9	5
SÓLIDOS SUSPENDIDOS	31 OCT 2006	08 NOV 2006	8	5
PH. Sin filtrar	30 OCT 2006	08 NOV 2006	9	3
PH. Filtrado	30 OCT 2006	08 NOV 2006	9	3
TEMPERATURA	30 OCT 2006	08 NOV 2006	9	4

### 12.3. ANEXO 3

#### 12.3.1. MEDIDAS DE LABORATORIO

Datos Tabla 2. Resultados de DQO Total durante el periodo de arranque.

Fecha	Ordinal	Entrada	TRH 12 horas	TRH 24 horas
15/08/2006	112	364.7	294.1	223.5
16/08/2006	113	339.5	246.2	246.2
17/08/2006	114	334.4	251.3	251.3
18/08/2006	115	407.5	256.3	233.6
22/08/2006	119	412.6	213.5	213.5
23/08/2006	120	309.2	218.5	218.5
24/08/2006	121	281.5	205.9	205.9
31/08/2006	128	195.8	95	84.9
02/09/2006	130	513.4	316.8	135.3
PROMEDIO		351.0	233.1	201.4
MÁXIMO		513.4	316.8	251.3
MÍNIMO		195.8	95.0	84.9
DESVIACIÓN STANDARD		89.9	63.4	55.3

Datos Tabla 3. Porcentaje de Remoción para DQO total durante el periodo de arranque.

Fecha	Ordinal	% Remoción	% Remoción
15/08/2006	112	19.4	38.7
16/08/2006	113	27.5	27.5
17/08/2006	114	24.9	24.9
18/08/2006	115	37.1	42.7
22/08/2006	119	48.3	48.3
23/08/2006	120	29.3	29.3
24/08/2006	121	26.9	26.9
31/08/2006	128	51.5	56.6
02/09/2006	130	38.3	73.6
PROMEDIO		33.7	40.9
MÁXIMO		51.5	73.6
MÍNIMO		19.4	24.9
DESVIACIÓN STANDARD		10.9	16.4

Datos Tabla 4. Resultados de DQO Soluble durante el periodo de arranque.

Fecha	Ordinal	Entrada	TRH 12 horas	TRH 24 horas
15/08/2006	112	261,4	198,3	153
16/08/2006	113	276,5	203,4	190,8
17/08/2006	114	236,1	203,4	203,4
18/08/2006	115	231,1	140,4	132,8
22/08/2006	119	281,5	205,9	183,2
31/08/2006	128	180,7	67,3	44,6
PROMEDIO		244,6	169,8	151,3
MÁXIMO		281,5	205,9	203,4
MÍNIMO		180,7	67,3	44,6
DESVIACIÓN STANDARD		37,4	56,1	58,35

Datos Tabla 5. Eficiencias de Remoción de DQO soluble.

Fecha	Ordinal	% Remoción	% Remoción
15/08/2006	112	24,1	41,5
16/08/2006	113	26,4	31,0
17/08/2006	114	13,9	13,9
18/08/2006	115	39,2	42,5
22/08/2006	119	26,9	34,9
31/08/2006	128	62,8	75,3
PROMEDIO		32,2	39,8
MÁXIMO		62,8	75,3
MÍNIMO		13,9	13,9
DESVIACIÓN STANDARD		17,0	20,2

Datos Tabla 7. Resultados de DBO<sub>5</sub> Total para el periodo de arranque.

Fecha	Ordinal	TRH 12 horas	TRH 24 horas
11/08/2006	108	123,48	99,96
16/08/2006	113	94,08	58,8
17/08/2006	114	141,12	94,08
18/08/2006	115	135,24	41,46
PROMEDIO		123,5	73,6
MÁXIMO		141,1	100,0
MÍNIMO		94,1	41,5
DESVIACIÓN STANDARD		20,9	28,1

Datos Tabla 8. Eficiencias de Remoción de DBO observadas durante el periodo de arranque.

Fecha	Ordinal	% Remoción
11/08/2006	108	19,0
16/08/2006	113	37,5
17/08/2006	114	33,3
18/08/2006	115	69,3
PROMEDIO		39,8
MÁXIMO		69,3
MÍNIMO		19
DESVIACIÓN STANDARD		21,2

Datos Tabla 9. Resultados de Sólidos Suspendidos totales en fase de arranque.

Fecha	Ordinal	Entrada	TRH 12 horas	TRH 24 horas
Agosto 15 2006	112	70	28	21
Agosto 16 2006	113	64	39	32
Agosto 17 2006	114	66	36	30
Agosto 18 2006	115	13	6	2
Agosto 22 2006	119	34	8	3
Agosto 29 2006	126	64	38	33
Septiembre 02 2006	130	63	36	29
PROMEDIO		53,4	27,3	21,4
MÁXIMO		70	39	33
MÍNIMO		13	6	2
DESVIACIÓN STANDARD		21,4	14,3	13,5



Datos Tabla 10. Eficiencias de remoción de Sólidos suspendidos totales en fase de arranque.

FECHA	Ordinal	% Remoción	% Remoción
Agosto 15 2006	112	60	70
Agosto 16 2006	113	39,1	50
Agosto 17 2006	114	45,5	54,5
Agosto 18 2006	115	53,8	84,6
Agosto 22 2006	119	76,5	91,2
Agosto 29 2006	126	40,6	48,4
Septiembre 02 2006	130	42,9	54,0
PROMEDIO		51,2	64,7
MÁXIMO		76,5	70
MÍNIMO		2,2	6,7
DESVIACIÓN STANDARD		13,4	17,4

Datos Tabla 11. Resultados DQO Total para tiempos de retención de 18 y 36 horas.

Fecha	Ordinal	Entrada	TRH 18 horas	TRH 36 horas
Septiembre 5 2006	133	347,1	195,8	185,7
Septiembre 8 2006	136	289,1	147,9	92,5
Septiembre 11 2006	139	493,2	223,5	117,7
Septiembre 12 2006	140	369,7	246,2	183,2
Septiembre 14 2006	142	334,4	246,2	170,6
Septiembre 15 2006	143	432,7	258,8	193,3
Septiembre 16 2006	144	334,4	253,8	97,5
Septiembre 18 2006	146	311,8	231,1	112,6
Septiembre 19 2006	147	263,9	190,8	90
Septiembre 20 2006	148	342	223,5	90
Septiembre 21 2006	149	306,7	210,9	122,7
Septiembre 24 2006	152	337	241,2	54,7
Septiembre 26 2006	154	437,8	261,4	190,8
Septiembre 28 2006	156	382,3	238,7	198,3
Octubre 3 2006	161	407,5	243,7	236,1
Octubre 4 2006	162	382,3	251,3	210,9
Octubre 6 2006	164	286,6	226,1	221
Octubre 24 2006	182	299,2	188,3	147,9
Octubre 25 2006	183	226,1	155,5	117,7
PROMEDIO		346,5	222,9	149,1
MÁXIMO		493,2	261,4	236,1
MÍNIMO		226,1	147,9	54,7
DESVIACIÓN ESTÁNDAR		65,7	33,3	53,4

Datos Tabla 12. Porcentajes de remoción para DQO Total en el periodo 36 horas.

Fecha	Ordinal	% Remoción	% Remoción
Septiembre 5 2006	133	43,6	46,5
Septiembre 8 2006	136	48,8	68,0
Septiembre 11 2006	139	54,7	76,1
Septiembre 12 2006	140	33,4	50,4
Septiembre 14 2006	142	26,4	49,0
Septiembre 15 2006	143	40,2	55,3
Septiembre 16 2006	144	24,1	70,8
Septiembre 18 2006	146	25,9	63,9
Septiembre 19 2006	147	27,7	65,9
Septiembre 20 2006	148	34,6	73,7
Septiembre 21 2006	149	31,2	60,0
Septiembre 24 2006	152	28,4	83,8
Septiembre 26 2006	154	40,3	56,4
Septiembre 28 2006	156	37,6	48,1
Octubre 3 2006	161	40,2	42,1
Octubre 4 2006	162	34,3	44,8
Octubre 6 2006	164	21,1	22,9
Octubre 24 2006	182	37,1	50,6
Octubre 25 2006	183	31,2	47,9
PROMEDIO		34,8	56,6
MÁXIMO		54,7	83,8
MÍNIMO		21,1	22,9
DESVIACIÓN ESTÁNDAR		8,6	14,5

Datos Tabla 13. Resultados DQO Soluble para el periodo de 36 horas.

Fecha	Ordinal	Entrada	TRH 18 horas	TRH 36 horas
Septiembre 4 2006	132	289,1	165,6	112,6
Septiembre 5 2006	133	241,2	137,8	130,3
Septiembre 6 2006	134	243,7	122,7	90,0
Septiembre 7 2006	135	251,3	142,9	100,0
Septiembre 8 2006	136	163,1	110,1	49,6
Septiembre 11 2006	139	299,2	145,4	64,8
Septiembre 12 2006	140	268,9	170,6	165,6
Septiembre 14 2006	142	251,3	127,8	79,9
Septiembre 15 2006	143	301,7	142,9	125,2
Septiembre 16 2006	144	276,5	155,5	69,8
Septiembre 18 2006	146	258,8	135,3	115,2
Septiembre 19 2006	147	198,3	117,7	62,2
Septiembre 20 2006	148	243,7	115,2	74,8
Septiembre 21 2006	149	241,2	135,3	100,0
Septiembre 24 2006	152	266,4	112,6	24,4
Septiembre 26 2006	154	387,4	203,4	150,4
Septiembre 28 2006	156	311,8	160,5	163,1
Septiembre 29 2006	157	107,6	216,0	188,3
Octubre 2 2006	160	344,5	125,2	135,3
Octubre 3 2006	161	306,7	200,9	183,2
Octubre 4 2006	162	309,2	198,3	165,6
Octubre 6 2006	164	261,4	188,3	153,0
Octubre 24 2006	182	256,3	160,5	110,1
Octubre 25 2006	183	180,7	120,2	95,0
PROMEDIO		267,5	148,1	109,6
MÁXIMO		387,4	203,4	183,2
MÍNIMO		163,1	110,1	24,4
DESVIACIÓN ESTANDARD		49,9	28,9	42,1

Datos Tabla 14. Porcentajes de remoción para DQO Soluble en el periodo 36 horas.

Fecha	Ordinal (día)	% Remoción TRH 18 Horas	% Remoción TRH 36 Horas
Septiembre 4 2006	132	42,719	61,052
Septiembre 5 2006	133	42,869	45,978
Septiembre 6 2006	134	49,651	63,069
Septiembre 7 2006	135	43,136	60,207
Septiembre 8 2006	136	32,495	69,589
Septiembre 11 2006	139	51,404	78,342
Septiembre 12 2006	140	36,556	38,416
Septiembre 14 2006	142	49,144	68,205
Septiembre 15 2006	143	52,635	58,502
Septiembre 16 2006	144	43,761	74,756
Septiembre 18 2006	146	47,720	55,487
Septiembre 19 2006	147	40,645	68,633
Septiembre 20 2006	148	52,729	69,307
Septiembre 21 2006	149	43,905	58,541
Septiembre 24 2006	152	57,733	90,841
Septiembre 26 2006	154	47,496	61,177
Septiembre 28 2006	156	48,525	47,691
Septiembre 29 2006	160	63,657	60,726
Octubre 2 2006	161	34,496	40,267
Octubre 3 2006	162	35,867	46,442
Octubre 4 2006	164	27,965	41,469
Octubre 6 2006	182	37,378	57,043
Octubre 24 2006	183	33,481	47,427
PROMEDIO		44,173	59,268
MÁXIMO		63,657	90,841
MINIMO		27,965	38,416
DESVIACIÓN STANDARD		8,675	13,052

Datos Tabla 16. Resultados DBO<sub>5</sub> Total para el periodo de 36 horas.

Fecha	Ordinal (día)	Entrada (mg/L)	TRH 18 horas (mg/L)	TRH 36 horas (mg/L)
Septiembre 11 2006	139	159,26	58,4	26,54
Septiembre 13 2006	141	90,25	21,24	10,62
Septiembre 18 2006	146	106,18	74,62	63,71
Septiembre 20 2006	148	196,43	37,16	26,54
Octubre 02 2006	160	116,79	95,56	53,09
Octubre 03 2006	161	111,48	53,09	47,78
Octubre 09 2006	167	132,72	37,16	15,93
Octubre 12 2006	170	122,1	31,85	15,93
Octubre 14 2006	172	138,03	26,54	5,31
Octubre 23 2006	181	191,19	85,71	72,52
Octubre 24 2006	182	138,45	52,74	32,96
PROMEDIO		136,63	52,19	33,72
MAXIMO		196,43	95,56	72,52
MINIMO		90,25	21,24	5,31
DESVIACIÓN ESTANDAR		33,77	24,55	22,48

Datos Tabla 17. Porcentajes de remoción para DBO<sub>5</sub> Total en el periodo 36 horas.

Fecha	Ordinal (día)	% Remoción TRH 18 horas	% Remoción TRH 36 horas
Septiembre 11 2006	139	63,3	83,3
Septiembre 13 2006	141	76,5	88,2
Septiembre 18 2006	146	29,7	40,0
Septiembre 20 2006	148	81,1	86,5
Octubre 02 2006	160	18,2	54,5
Octubre 03 2006	161	52,4	57,1
Octubre 09 2006	167	72,0	88,0
Octubre 12 2006	170	73,9	87,0
Octubre 14 2006	172	80,8	96,2
Octubre 23 2006	181	55,2	62,1
Octubre 24 2006	182	61,9	76,2
PROMEDIO		60,4	74,5
MAXIMO		81,1	96,2
MINIMO		18,2	40,0
DESVIACIÓN ESTANDAR		20,60	18,07

Datos Tabla 18. Resultados DBO<sub>5</sub> Soluble para el periodo de 36 horas.

Fecha	Ordinal (día)	Entrada (mg/L)	TRH 18 horas (mg/L)	TRH 36 horas (mg/L)
Septiembre 08 2006	136	90,25	74,32	58,40
Septiembre 11 2006	139	95,56	47,78	5,31
Septiembre 13 2006	141	69,01	26,54	5,31
Septiembre 18 2006	146	106,18	42,47	26,54
Septiembre 20 2006	148	95,56	31,85	21,24
Octubre 02 2006	160	84,94	37,16	26,54
Octubre 03 2006	161	63,71	31,85	26,54
Octubre 04 2006	162	69,01	15,93	10,62
Octubre 07 2006	165	116,79	37,16	37,16
Octubre 09 2006	167	74,32	47,78	21,24
Octubre 12 2006	170	37,16	26,54	10,62
Octubre 14 2006	172	106,18	21,24	5,31
Octubre 18 2006	176	58,40	26,54	15,93
Octubre 19 2006	177	46,15	32,96	26,37
Octubre 23 2006	181	131,86	52,74	46,15
Octubre 24 2006	182	85,71	39,56	32,96
Octubre 25 2006	183	65,93	39,56	19,78
PROMEDIO		82,2	37,2	23,3
MAXIMO		131,86	74,32	58,40
MINIMO		37,16	15,93	5,31
DESVIACIÓN ESTANDAR		25,2	13,7	14,7

Datos Tabla 20. Porcentajes de remoción para DBO<sub>5</sub> Soluble en el periodo 36 horas.

Fecha	Ordinal (Día)	% Remoción TRH 18 horas	% Remoción TRH 36 horas
Septiembre 08 2006	136	17,6509695	35,2908587
Septiembre 11 2006	139	50,00000	94,4432817
Septiembre 13 2006	141	61,5418055	92,305463
Septiembre 18 2006	146	60,0018836	75,004709
Septiembre 20 2006	148	66,6701549	77,7731268
Octubre 02 2006	160	56,2514716	68,7544149
Octubre 03 2006	161	50,0078481	58,3424894
Octubre 04 2006	162	76,9163889	84,610926
Octubre 07 2006	165	68,1822074	68,1822074
Octubre 09 2006	167	35,7104413	71,4208827
Octubre 12 2006	170	28,5791173	71,4208827
Octubre 14 2006	172	79,9962328	94,9990582
Octubre 18 2006	176	54,5547945	72,7226027
Octubre 19 2006	177	28,5807151	42,8602384
Octubre 23 2006	181	60,0030335	65,0007584
Octubre 24 2006	182	53,8443589	61,5447439
Octubre 25 2006	183	39,9969665	69,9984832
PROMEDIO		52,2640229	70,8632428
MAXIMO		79,9962328	94,9990582
MINIMO		17,6509695	35,2908587
DESVIACIÓN ESTANDARD		17,3599465	16,1945571



Datos Tabla 21. Resultados Sólidos Suspendidos Totales en el periodo de 36 hrs.

Fecha	Ordinal	Entrada	TRH 18 horas	TRH 36 horas
Septiembre 04	132	37	30	18
Septiembre 05	133	107	60	60
Septiembre 07	135	46	26	9
Septiembre 08	136	30	24	12
Septiembre 11	139	44	38	27
Septiembre 12	140	46	40	31
Septiembre 13	141	68	66	50
Septiembre 14	142	62	35	16
Septiembre 15	143	70	41	41
Septiembre 16	144	50	45	26
Septiembre 18	146	59	42	42
Septiembre 19	147	68	29	17
Septiembre 20	148	49	35	22
Septiembre 21	149	35	31	8
Septiembre 24	152	49	33	19
Septiembre 26	154	41	20	17
Septiembre 27	155	60	38	19
Septiembre 28	156	164	33	33
Octubre 02 2006	160	70	29	26
Octubre 03 2006	161	78	21	16
Octubre 04 2006	162	33	27	16
Octubre 06 2006	164	62	39	35
Octubre 07 2006	165	95	27	21
Octubre 08 2006	166	98	54	23
Octubre 09 2006	167	63	32	14
Octubre 12 2006	170	77	16	11
Octubre 14 2006	172	31	24	18
Octubre 17 2006	175	55	12	11
Octubre 18 2006	176	52	22	10
Octubre 19 2006	177	32	7	7
Octubre 23 2006	181	35	27	27
Octubre 24 2006	182	73	25	23
Octubre 25 2006	183	42	29	27
PROMEDIO		60,0	32,0	22,8
MAXIMO		164	66	60
MINIMO		30	7	7
DESVIACIÓN STANDARD		27,2	12,4	12,2

Datos Tabla 22. Porcentaje de remoción de Sólidos Suspendidos Totales para el periodo de 36 horas.

Fecha	Ordinal	% Remoción	% Remoción
Septiembre 04 2006	132	18,9	51,4
Septiembre 05 2006	133	43,9	43,9
Septiembre 07 2006	135	43,5	80,4
Septiembre 08 2006	136	20,0	60,0
Septiembre 11 2006	139	13,6	38,6
Septiembre 12 2006	140	13,0	32,6
Septiembre 13 2006	141	2,9	26,5
Septiembre 14 2006	142	43,5	74,2
Septiembre 15 2006	143	41,4	41,4
Septiembre 16 2006	144	10,0	48,0
Septiembre 18 2006	146	28,8	28,8
Septiembre 19 2006	147	57,4	75,0
Septiembre 20 2006	148	28,6	55,1
Septiembre 21 2006	149	11,4	77,1
Septiembre 24 2006	152	32,7	61,2
Septiembre 26 2006	154	51,2	58,5
Septiembre 27 2006	155	36,7	68,3
Septiembre 28 2006	156	79,9	79,9
Octubre 02 2006	160	58,6	62,9
Octubre 03 2006	161	73,1	79,5
Octubre 04 2006	162	18,2	51,5
Octubre 06 2006	164	37,1	43,5
Octubre 07 2006	165	71,6	77,9
Octubre 08 2006	166	44,9	76,5
Octubre 09 2006	167	49,2	77,8
Octubre 12 2006	170	79,2	85,7
Octubre 14 2006	172	22,6	41,9
Octubre 17 2006	175	78,2	80,0
Octubre 18 2006	176	57,7	80,8
Octubre 19 2006	177	78,1	78,1
Octubre 23 2006	181	22,9	22,9
Octubre 24 2006	182	65,8	68,5
Octubre 25 2006	183	31,0	35,7
PROMEDIO		41,4	59,5
MAXIMO		79,9	85,7
MINIMO		2,9	22,9
DESVIACIÓN ESTANDARD		22,9182211	19,020794

Datos Tabla 23. Resultados DQO Total para el periodo de 24 horas en un estado más avanzado del filtro.

Fecha	Ordinal (día)	Entrada (mg/L)	TRH 12 horas (mg/L)	TRH 24 horas (mg/L)
Octubre 30 2006	188	319,3	223,5	180,7
Octubre 31 2006	189	397,5	258,8	205,9
Noviembre 1 2006	190	647,0	258,8	190,8
Noviembre 7 2006	196	203,4	153,0	153,0
Noviembre 8 2006	197	188,3	132,8	107,6
Promedio		351,1	205,4	167,6
Mínimo		188,3	132,8	107,6
Máximo		647,0	258,8	205,9
Desviación Estándar		193,0	59,5	43,7

Datos Tabla 24. Porcentaje de remoción DQO Total para el periodo de 24 horas en un estado más avanzado del filtro.

Fecha	Ordinal (día)	% Remoción TRH 12 horas	% Remoción TRH 24 horas
Octubre 30 2006	188	30,0	43,4
Octubre 31 2006	189	34,9	48,2
Noviembre 1 2006	190	60,0	70,5
Noviembre 7 2006	196	24,8	24,8
Noviembre 8 2006	197	29,5	42,9
PROMEDIO		35,8	46,0
MÍNIMO		24,8	24,8
MÁXIMO		60,0	70,5
DESVIACIÓN ESTÁNDAR		14,0	16,4

Datos Tabla 25. Resultados de DQO Soluble para el periodo de 24 horas en un estado mas avanzado del filtro.

Fecha	Ordinal (día)	Entrada (mg/L)	TRH 12 horas (mg/L)	TRH 24 horas (mg/L)
Octubre 30 2006	188	248,8	160,5	107,6
Octubre 31 2006	189	301,7	200,9	147,9
Noviembre 1 2006	190	188,3	170,6	145,4
Noviembre 8 2006	197	132,8	105,1	87,4
Promedio		217,9	159,3	122,1
Mínimo		132,8	105,1	87,4
Máximo		301,7	200,9	147,9
Desviación Estándar		73,2	40,0	29,6

Datos Tabla 26. Porcentaje de remoción DQO Soluble para el segundo periodo de 24 horas en un estado más avanzado del filtro.

Fecha	Ordinal (Día)	% Remoción TRH 12 horas	% Remoción TRH 24 horas
Octubre 30 2006	188	35,5	56,8
Octubre 31 2006	189	33,4	51,0
Noviembre 1 2006	190	9,4	22,8
Noviembre 8 2006	197	20,9	34,2
PROMEDIO		24,8	41,2
MÍNIMO		9,4	22,8
MÁXIMO		35,5	56,8
DESV ESTÁNDAR		12,1	15,6

Datos Tabla 28. Resultados adicionales de DBO<sub>5</sub> Total para el periodo de 24 horas en una etapa mas avanzada del filtro

Fecha	Ordinal (Día)	Entrada (mg/L)	TRH 12 horas (mg/L)	TRH 24 horas (mg/L)
Octubre 30 2006	188	197,78	92,30	65,93
Octubre 31 2006	189	158,23	125,26	79,11
Noviembre 01 2006	190	125,26	26,37	19,78
Noviembre 04 2006	193	138,45	65,93	52,74
Noviembre 08 2006	197	72,52	46,15	39,56
Promedio		138,4	71,2	42,2
Mínimo		72,52	26,37	19,78
Máximo		197,78	125,26	79,11
Desviación Estándar		45,9	38,8	23,0

Datos Tabla 29. Porcentaje de remoción DBO<sub>5</sub> Total para el periodo de 24 horas en una etapa más avanzada del filtro.

Fecha	Ordinal (Día)	% Remoción TRH 12 horas	% Remoción TRH 24 horas
Octubre 30 2006	188	53,3	66,7
Octubre 31 2006	189	20,8	50,0
Noviembre 01 2006	190	78,9	84,2
Noviembre 04 2006	193	52,4	61,9
Noviembre 08 2006	197	36,4	45,4
PROMEDIO		48,4	61,6
MÍNIMO		20,8	45,4
MÁXIMO		78,9	84,2
DESVIACIÓN ESTÁNDAR		21,7	15,3

Datos Tabla 30. Resultados adicionales de DBO<sub>5</sub> Soluble para el periodo de 24 horas en un estado mas avanzado del filtro.

FECHA	Ordinal	Entrada (mg/L)	TRH 12 horas (mg/L)	TRH 24 horas (mg/L)
Octubre 30 2006	188	145,04	59,34	26,37
Octubre 31 2006	189	131,86	85,71	59,34
Noviembre 01 2006	190	46,15	32,96	13,19
Noviembre 04 2006	193	72,52	46,15	32,96
Noviembre 08 2006	197	65,93	39,56	32,96
PROMEDIO		76,9	44,0	27,5
MÍNIMO		46,15	32,96	13,19
MÁXIMO		145,04	85,71	59,34
DESVIACIÓN ESTÁNDAR		43,5	20,8	16,8

Datos Tabla 32. Porcentaje de remoción de DBO<sub>5</sub> Soluble para el periodo de 24 horas en un estado más avanzado del filtro.

Fecha	Ordinal (Día)	% Remoción TRH 12 horas	% Remoción TRH 24 horas
Octubre 30 2006	188	59,09	81,82
Octubre 31 2006	189	35,00	55,00
Noviembre 01 2006	190	28,58	71,42
Noviembre 04 2006	193	36,36	54,55
Noviembre 08 2006	197	40,00	50,01
Promedio		39,81	62,56
Mínimo		28,58	50,01
Máximo		59,09	81,82
Desviación Estándar		11,54	13,49

Datos Tabla 33. Resultados adicionales de Sólidos Suspendidos totales para el periodo de 24 horas en un estado mas avanzado del filtro.

Fecha	Ordinal (Día)	Entrada (mg/L)	TRH 12 horas (mg/L)	TRH 24 horas (mg/L)
Octubre 31 2006	189	42	34	31
Noviembre 01 2006	190	128	42	28
Noviembre 04 2006	193	75	33	27
Noviembre 07 2006	196	64	18	3
Noviembre 08 2006	197	81	55	39
PROMEDIO		78,0	36,4	25,6
MÁXIMO		42,0	18,0	3,0
MÍNIMO		128,0	55,0	39,0
DESVIACIÓN ESTANDARD		31,7	13,5	13,5

Datos Tabla 34. Porcentaje de remoción de Sólidos Suspendidos Totales para el periodo de 24 horas en un estado más avanzado del filtro.

Fecha	Ordinal (Día)	% Remoción TRH 12 horas	% Remoción TRH 24 horas
Octubre 31 2006	189	19,05	26,19
Noviembre 01 2006	190	67,19	78,13
Noviembre 04 2006	193	56,00	64,00
Noviembre 07 2006	196	71,88	95,31
Noviembre 08 2006	197	32,10	51,85
PROMEDIO		49,24	63,10
MÍNIMO		19,05	26,19
MÁXIMO		71,88	95,31
DESVIACIÓN ESTÁNDAR		22,83	26,23

Datos Tabla 38. Resultados del pH para muestras sin filtrar.

Fecha	Ordinal	Inicial	Medio	Final
Agosto 31 2006	127	7,15	7,71	7,88
Septiembre 7 2006	135	7,46	7,54	7,7
Septiembre 12 2006	140	7,7	7,41	7,5
Septiembre 13 2006	141	7,15	7,4	7,3
Septiembre 15 2006	143	8,16	8,26	8,46
Septiembre 18 2006	146	7,42	7,65	7,85
Septiembre 19 2006	147	7,42	7,37	7,87
Septiembre 21 2006	149	7,11	7,33	7,52
Septiembre 28 2006	156	8,08	6,78	8,24
Octubre 2 2006	160	7,63	7,75	8,15
Octubre 3 2006	161	7,99	7,62	7,87
Octubre 4 2006	162	7,45	7,78	8,15
Octubre 6 2006	164	7,91	7,67	7,78
Octubre 9 2006	167	7,9	8,02	8,06
Octubre 12 2006	170	8,51	8,04	8,31
Octubre 14 2006	172	7,68	7,71	8,27
Octubre 16 2006	174	7,94	7,98	7,74
Octubre 17 2006	175	8,14	7,98	8,22
Octubre 18 2006	176	8,18	7,81	8,28
Octubre 19 2006	177	8,42	7,92	8,14
Octubre 23 2006	181	7,6	7,69	7,7
Octubre 24 2006	182	7,66	7,75	7,67
Octubre 30 2006	188	8,27	8,09	7,61
Noviembre 7 2006	196	7,54	7,89	8,01
Noviembre 8 2006	197	7,23	7,42	7,59
PROMEDIO		7,75	7,70	7,91
MÁXIMO		8,51	8,26	8,46
MÍNIMO		7,11	6,78	7,30



Datos Tabla 39. Resultados del pH para muestras filtradas.

Fecha	Ordinal	Inicial	Medio	Final
Agosto 30 2006	126	7,66	7,5	7,49
Agosto 31 2006	127	7,56	7,71	7,84
Septiembre 7 2006	135	7,46	7,54	7,7
Septiembre 12 2006	140	7,99	7,77	7,68
Septiembre 18 2006	146	7,54	7,6	7,64
Septiembre 19 2006	147	7,65	7,42	7,75
Septiembre 21 2006	149	7,18	7,31	7,66
Septiembre 28 2006	156	7,86	7,86	8,16
Octubre 2 2006	160	7,69	7,6	8,02
Octubre 3 2006	161	8,06	7,47	7,7
Octubre 4 2006	162	7,58	7,77	8,16
Octubre 6 2006	164	8,07	7,95	7,97
Octubre 9 2006	167	8,22	8,13	8,28
Octubre 12 2006	170	8,56	8,21	8,33
Octubre 14 2006	172	7,51	7,7	8,43
Octubre 16 2006	174	8,14	7,82	8,15
Octubre 17 2006	175	8,26	8,11	8,32
Octubre 18 2006	176	8,18	7,89	8,05
Octubre 19 2006	177	8,41	8,11	8,05
Octubre 23 2006	181	7,63	7,93	7,87
Octubre 24 2006	182	7,94	7,95	7,5
Octubre 30 2006	188	8	8,11	8,06
Noviembre 7 2006	196	7,88	8,15	7,92
Noviembre 8 2006	197	7,38	7,83	7,61
PROMEDIO		7,85	7,81	7,93
MÁXIMO		8,56	8,21	8,43
MÍNIMO		7,18	7,31	7,49
DESVIACIÓN ESTANDAR		0,35	0,26	0,28

Datos Tabla 40. Resultados de temperatura.

Fecha	Ordinal (Día)	Inicial (°C)	Medio (°C)	Final (°C)
Septiembre 12 2006	140	22	22	22
Septiembre 18 2006	146	22	22	22
Septiembre 19 2006	147	22	22	22
Septiembre 21 2006	149	22	22	22
Septiembre 28 2006	156	22	22	22
Octubre 12 2006	170	21	21	21
Octubre 23 2006	181	21	21	21
Octubre 24 2006	182	21	21	21
Octubre 30 2006	188	21	21	21
Noviembre 1 2006	190	21	21	21
Noviembre 7 2006	196	21	21	21
Noviembre 8 2006	197	21	21	21
PROMEDIO		21,4	21,4	21,4
MÁXIMO		22	22	22
MÍNIMO		21	21	21
DESVIACIÓN ESTANDAR		0,51	0,51	0,51

### 13. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APHA, AWWA, WEF. STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WASTE AND WATER WASTES. 2002.

BUENO, J. L., SASTRE, H. y LAVIN, A. G. Contaminación e ingeniería ambiental. Vol. III Contaminación de las aguas. Editorial Ficy, 1997.

CAMPOS, José Roberto. Alternativas para Tratamiento de Esgotos Sanitarios. 1º Curso de recicagem em saneamento, recursos hídricos e Meio Ambiente. Consorcio em Americana, 1990.

CAMPOS, José Roberto. Projeto e operacao de filtros anaerobios para tratamento de efluentes líquidos industriais. Taller regional sobre tratamiento anaerobio de aguas residuales en América Latina-1990.

CASTAÑO ROJAS, Mauricio. Influencia del medio de soporte en el comportamiento de filtros anaeróbicos de flujo ascendente bajo diferentes tiempos de retención hidráulica. Tesis de Magíster en Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Universidad del Valle. Cali. 2003.

CASTAÑO ROJAS, Mauricio, VILLEGAS GÓMEZ, Juan David y GUERRERO ERAZO, Jhoniers. Utilización de la guadua como alternativa para el tratamiento de aguas residuales domesticas. Centro de Investigaciones y Extensión (CIE). Grupo de Agua y Saneamiento de la Facultad de Ciencias Ambientales. Bogotá D.C. 2003.

CASTAÑO ROJAS, Mauricio y GUERRERO ERAZO, Jhoniers. Variaciones al sistema filtro anaeróbico de flujo ascendente humedal de flujo subsuperficial como alternativa de tratamiento de aguas residuales de pequeños y medianos municipios de Colombia. Centro de Investigaciones y Extensión (CIE). Grupo de Agua y Saneamiento de la Facultad de Ciencias Ambientales. Bogotá D.C. 2003.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN. Acciones prioritarias y lineamientos para la formulación del plan nacional de manejo de aguas residuales. Bogotá, D.C., DNP, 2002.

H. A. Kobayashi, M. K. Stenstrom y R. A. Mah. Treatment of low strength domestic wastewater using the anaerobic filter. Los Angeles, C.A., 1983.

IDEAM. Perfil del estado de los recursos naturales y el medio ambiente. Bogotá, D.C, 2001.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. Normas Colombianas para la presentación de trabajos e investigación. Quinta actualización. Santafé de Bogotá D.C.: ICONTEC, 2006-2007. NTC 1486.

MADIGAN, M.T., J.M. MARTINKO y J. PARKER. Brock's Biology of Microorganisms. Prentice Hall. NJ, EE.UU. 1997.

MALINA, J.F and Pohland, F.G. design of Anaerobic Processes for the treatment of industrial and municipal wastes. Water Quality Management Libraries. Vol. 7. USA, 1992.

McCARTY, P. L. Anaerobic Waste Treatment Fundamentals. Public Works, Vol. 95, 1964. 8 p.

McCARTY, P. L., GLOYNA, E. F. and ECKENFELDER Jr, W. W. Anaerobic Treatment of soluble Wastes. Advances in Water Quality Improvement; University of Texas Press, Austin, TX 1968.

METCALF & EDDY, Wastewater Engineering. McGraw-Hill. 1996.

MINISTERIO DE DESARROLLO ECONÓMICO. Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS 2000, Título E. Bogotá, 2000.

MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. Gestión para el manejo, tratamiento y disposición final de las aguas residuales municipales. Bogotá, D.C., 2002.

PENAGOS, Fernando. Priorización para implementar proyectos con recursos del fondo de descontaminación hídrica. Cauca, CRC, 2002.

ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. Tratamiento de aguas residuales, Teoría y principios de diseño. Bogotá D.C., Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, 1999.

SAWYER, Clair N., McCARTY, Perry L., PARKIN, Gene F., Química para Ingeniería Ambiental. Mc Graw Hill, Cuarta Edición. Bogotá D.C., 2001.

TCHOBANOGLOUS, George y CRITES, Ron. Tratamiento de Aguas Residuales En Pequeñas Poblaciones. Mc Graw Hill, Bogotá D.C., 2000.

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES – MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE Bases para la formulación de un Plan Nacional de Aguas residuales. Bogotá, D.C., 2002.

VEENSTRA, S y POLPRASERT, C. Waste water Engineering. IHE, Netherlands, Delft (1995).

YOUNG, C.J. and McCARTY, P.L. The anaerobic filter for waste treatment, Journal of Water Pollution Control Federation, 1969.

YOUNG, C.J., and YANG, B.S. Design considerations of full scale anaerobic filters. Journal of Water Pollution Control Federation, 1989.