

**OPTIMIZACIÓN DE FILTROS LENTOS EN ARENA MEDIANTE EL USO DE
GEOTEXTILES NT E INCREMENTO DE LAS VELOCIDADES DE FILTRACIÓN**

**NINA DARMARY HOYOS ROJAS
YAMPIER DAVID MÉNDEZ YUNDA**

**Director:
JAVIER ERNESTO FERNANDEZ MERA
Ingeniero Sanitario, M.Sc, Ph. D.**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIRÍA CIVIL
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
POPAYÁN
2017**

**OPTIMIZACIÓN DE FILTROS LENTOS EN ARENA MEDIANTE EL USO DE
GEOTEXTILES NT E INCREMENTO DE LAS VELOCIDADES DE FILTRACIÓN**

**NINA DARMARY HOYOS ROJAS
YAMPIER DAVID MÉNDEZ YUNDA**

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIEROS
AMBIENTALES**

**Director:
JAVIER ERNESTO FERNANDEZ MERA
Ingeniero Sanitario, M.Sc, Ph. D.**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIRÍA CIVIL
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
POPAYÁN
2017**

AGRADECIMIENTOS

A:

Dios por permitirnos llegar hasta este punto y brindarnos salud y paciencia para lograr nuestros objetivos, además de su infinita bondad y amor.

A nuestros padres Silvio, Maricel, Edilberto y Nina por apoyarnos en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que nos ha permitido ser objetivos por nuestros sueños, pero más que nada, por su amor.

A nuestros hermanos Carol, Cristian, Alejandra, Ruber y Darly por brindarnos toda una vida llena de risas y llantos, peleas y juegos, de abrazos y besos. En fin, colmada de felicidad.

A nuestros familiares y demás amigos por acompañarnos en esta etapa que culmina y que abre la puerta a muchos sueños y objetivos por cumplir.

A nuestro director, profesor y amigo Javier Fernández por brindarnos su voz de aliento en momentos de fragilidad; por su constante apoyo y por ser un profesional íntegro que guía el camino de nosotros los estudiantes.

A Wilson y su familia por acogernos en su hogar en la vereda Los Llanos en el desarrollo de este trabajo.

A nuestra alma máter la Universidad del Cauca por formarnos como profesionales.

A todos ustedes gracias por ser parte de nuestro camino y por permitirnos compartir esta etapa de nuestra vida en su compañía.

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|---|----|
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 3 |
| 2. JUSTIFICACIÓN | 4 |
| 3. OBJETIVOS..... | 5 |
| 3.1 OBJETIVO GENERAL..... | 5 |
| 3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 5 |
| 4. MARCO TEÓRICO..... | 6 |
| 4.1 FILTRACIÓN LENTA EN ARENA (FLA)..... | 6 |
| 4.2 FILTRACIÓN EN MÚLTIPLES ETAPAS (FiME) | 8 |
| 4.3 MANTAS O GEOTEXILES SINTÉTICOS | 9 |
| 5. METODOLOGÍA..... | 12 |
| 5.1 ZONA DE ESTUDIO | 12 |
| 5.2 CONDICIONES GENERALES DE LA PLANTA PILOTO | 12 |
| 5.3 CARACTERISTICAS GENERALES DE LOS FLA A ESCALA PILOTO | 13 |
| 5.4 PARÁMETROS DE DISEÑO PARA LOS SISTEMAS DE FILTRACIÓN | 15 |
| 5.5 GRANULOMETRÍA DE LA ARENA USADA EN LOS FLA..... | 16 |
| 5.6 TIPO Y MODO DE USO DEL GEOTEXTIL EN LA INVESTIGACIÓN..... | 16 |
| 5.7 DESARROLLO DE LOS OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 17 |
| 5.7.1 OBJETIVO ESPECÍFICO 1 | 17 |
| 5.7.2 OBJETIVO ESPECÍFICO 2 | 18 |
| 6. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS | 20 |
| 6.1 DESARROLLO DE LAS PÉRDIDAS DE CARGA EN LOS FLA..... | 20 |
| 6.2 EVALUACIÓN DE LAS CARRERAS DE FILTRACIÓN EN LOS FLA | 23 |
| 6.3 PRODUCCIÓN DE VOLUMEN TOTAL EFLUENTE DE LOS FLA | 25 |
| 6.4 EVALUACION DE LOS PORCENTAJES DE DESARROLLO DE LAS PÉRDIDAS DE CARGA DURANTE EL TIEMPO DE FUNCIONAMIENTO DE LOS FLA | 26 |
| 6.5 EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DE LOS FLA . | 27 |
| 6.5.1 EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE TURBIEDAD | 29 |

| | | |
|-------|---|----|
| 6.5.2 | EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE COLOR APARENTE | 31 |
| 6.5.3 | EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA | 33 |
| 6.5.4 | VARIABILIDAD EN EL PH Y LA TEMPERATURA | 34 |
| 6.5.5 | CONSIDERACIONES FINALES | 35 |
| 7. | CONCLUSIONES | 36 |
| 8. | RECOMENDACIONES | 37 |
| | BIBLIOGRAFÍA | 38 |
| | ANEXOS | 42 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Componentes básicos de una unidad FLA. | 7 |
| Figura 2. Esquema general de un sistema FiME. | 9 |
| Figura 3. Vista en planta del sistema de FLA a escala piloto. | 13 |
| Figura 4. Características del filtro a escala piloto..... | 14 |
| Figura 5. Estudio granulométrico de la arena usada en los FLA a escala piloto..... | 16 |
| Figura 6. Desarrollo de las pérdidas de carga totales en el FLA 1, FLA 2 y FLA 3 en el periodo septiembre a noviembre del 2016. | 20 |
| Figura 7. Comportamiento de la pérdida de carga en el FLA 2 con geotextil NT 1600, en comparación con el FLA 1(Blanco)..... | 21 |
| Figura 8. Comportamiento de la pérdida de carga en el FLA 3 con geotextil NT 1600, en comparación con el FLA 1(Blanco)..... | 21 |
| Figura 9. Duración de carrera y factor de aumento en los FLA, periodo de evaluación septiembre, noviembre de 2016..... | 25 |
| Figura 10. Relación porcentaje de pérdida carga en contraste con el porcentaje de tiempo total empleado..... | 27 |
| Figura 11. Dispersión de los datos de remoción de turbiedad para cada sistema FLA. | 30 |
| Figura 12. Dispersión de los datos de remoción de color aparente para cada sistema FLA. | 32 |
| Figura 13. Dispersión de los datos de remoción de materia orgánica para cada sistema FLA..... | 34 |

LISTA DE FOTOS

| | |
|---|----|
| Foto 1. Visualización del montaje experimental. Foto A, vista del tanque de dosificación de agua cruda a los FLA. Foto B, vista de los sistemas de filtración. | 13 |
| Foto 2. Crecimiento de materia orgánica en el lecho de arena de los FLA. | 23 |
| Foto 3. Capa biológica de los FLA. Foto A, formación de la capa biológica en el FLA 1(blanco). Foto B, formación de la capa biológica en el FLA 2 (Sobre el geotextil). | 24 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1 Recomendaciones para el diseño de sistemas de FLA..... | 6 |
| Tabla 2 Límites establecidos para los parámetros de mayor importancia en la FLA..... | 8 |
| Tabla 3 Características del geotextil NT 1600..... | 11 |
| Tabla 4 Parámetros de diseño de cada una de las torres de filtración..... | 15 |
| Tabla 5 Principales características del geotextil NT 1600 evaluado en la planta piloto..... | 17 |

| | | |
|-----------------|---|----|
| Tabla 6 | Localización de los piezómetros en los FLA..... | 17 |
| Tabla 7 | Parámetros de calidad evaluados, métodos de referencia y equipos usados en la medición de calidad..... | 19 |
| Tabla 8 | Frecuencia de muestreo de parámetros fisicoquímicos medidos en el efluente y afluente del sistema piloto..... | 19 |
| Tabla 9 | Tiempos de carrera de filtración para cada sistema de filtración..... | 23 |
| Tabla 10 | Volúmenes totales de agua tratada producida por los FLA en los periodos de operación..... | 26 |
| Tabla 11 | Valores de los parámetros fisicoquímicos del afluente y efluente..... | 28 |
| Tabla 12 | Eficiencias de remoción promedio para los parámetros fisicoquímicos evaluados..... | 29 |
| Tabla 13 | Datos de pH y Temperatura..... | 34 |

LISTA DE ANEXOS

| | | |
|-----------------|--|-----|
| Anexo 1 | Datos de pérdida de carga de los sistemas de filtración lenta en arena medidos en el periodo septiembre-noviembre del 2016 | 42 |
| Anexo 2. | Reporte de volumen de agua tratada efluente de cada FLA por día..... | 43 |
| Anexo 3. | Datos obtenidos para las características fisicoquímicas | 445 |
| Anexo 4. | Datos estadísticos de la remoción de los parámetros fisicoquímicos, obtenidos mediante la herramienta de análisis de datos STATGRAPHICS Centurion | 47 |

INTRODUCCIÓN

El acceso a agua potable y saneamiento básico son recursos primordiales para la salud pública y esenciales para el desarrollo. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2015), el consumo de agua insalubre y de un saneamiento e higiene deficientes están relacionados con la transmisión de enfermedades como el cólera, la disentería, la hepatitis A, la fiebre tifoidea y la poliomielitis que ocasionan la muerte de millones de personas en el mundo, afectando principalmente a poblaciones humanas donde los servicios de agua y saneamiento son inexistentes, insuficientes o gestionados de forma inapropiada y que por lo general se relacionan a países en desarrollo.

Con la mejora de los abastecimientos de agua, del saneamiento y de la gestión de los recursos hídricos se previenen riesgos a la salud pública y además se puede impulsar el crecimiento económico de los países y contribuir en gran medida a la reducción de la pobreza (OMS, 2015).

En Colombia el suministro de agua potable y saneamiento básico presentan serios problemas especialmente en las zonas rurales. El Departamento Nacional de Planeación (DNP, 2014) reporta que en cuanto a calidad de agua, cerca del 58,8% de la población colombiana en el año 2012 consumió agua potable y el 41,2% no lo hizo. Conforme a esta situación el Instituto de Investigación y Desarrollo en Abastecimiento de Agua, Saneamiento Ambiental y Conservación del Recurso Hídrico (Cinara, 2001) reporta que la gran mayoría de las plantas de tratamiento en Colombia están basadas en filtración rápida de agua con coagulantes químicos, sin embargo los requerimientos de administración, compra, transporte, depósito y correcta dosificación de los componentes químicos, limita fuertemente la aplicación de este tipo de tecnología en especial en las zonas rurales del país. Por lo anterior es necesario fortalecer las acciones para mejorar la calidad del agua suministrada primordialmente en la zona rural y minimizar así los riesgos a la salud pública.

La filtración lenta en arena (FLA) surge como una tecnología efectiva para el tratamiento del agua para consumo humano y aunque muchas de sus limitaciones se han resuelto usando sistemas de pretratamiento en gravas, conocidos como Filtración en Múltiples Etapas (FiME), aún persisten problemas relacionados a la rápida obstrucción de los FLA, lo cual demanda mucho trabajo para el operador en labores de operación y mantenimiento del sistema (Fernández, Latorre, Berón, Muñoz, & Vargas, 2001). No obstante, cabe resaltar que la implementación de la tecnología FiME para el tratamiento de agua es potencialmente viable para pequeñas comunidades rurales partiendo de sus bajos requerimientos de infraestructura física y mano de obra con mínimo nivel de escolaridad para su manejo y mantenimiento.

El instituto de investigación Cinara de acuerdo a un estudio realizado en el año 2001, reporta que el uso de las mantas sintéticas sobre el lecho de arena del FLA puede prolongar las carreras de filtración en un factor inclusive mayor a 2,0 y que en general tienden a mejorar la calidad del agua en parámetros como turbiedad y color real, además resalta que su implementación tiene gran potencial para la optimización de las unidades de filtración lenta en arena, apuntando a la reducción de área de los FLA, lo cual implica menores costos de inversión inicial, operación y mantenimiento, también sería posible la optimización de unidades en servicio de filtración lenta en arena, que hayan llegado al final de su periodo de diseño (Fernández et al., 2001)

En el presente documento se presentan los resultados de la evaluación de 3 filtros lentos en arena a escala piloto. Dos de ellos usaron geotextil sintético NT 1600 y uno funcionó como blanco sin el geotextil. El estudio comparó el efecto de introducir el geotextil NT 1600, en variables como la calidad de agua tratada y la duración de carrera, además se evaluó su incidencia en el incremento de las velocidades de filtración para FLA.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La falta de agua potable trae consecuencias muy serias, que se incrementan y se hacen más evidentes con las guerras, las catástrofes naturales y la pobreza. La OMS (2015) asegura que actualmente, aunque nadie se muera de sed, el 80% de los problemas de salud en los países en vía de desarrollo están relacionados con el agua. La supervivencia de millones de personas en todo el mundo está condicionada no solo a la preservación del recurso hídrico, sino también a su disponibilidad, accesibilidad y calidad (UNESCO, 2016).

En Colombia el acceso a agua potable y saneamiento básico ha mejorado en las últimas décadas. Sin embargo, se siguen observando grandes diferencias entre la calidad del agua suministrada en la zona urbana y la que abastece la rural. Según MinSalud (2014), en los grandes y medianos centros urbanos del país, sus habitantes reciben un suministro de agua de buena calidad, sin riesgo o riesgo bajo para la salud humana y que en la medida que disminuye su tamaño y la proporción de población rural aumenta sobre la urbana, la calidad del agua va desmejorando, aumentando su nivel de riesgo, de tal manera que en los municipios menores y en el área rural el IRCA (Índice de Riesgo de la Calidad del Agua para Consumo Humano) es predominantemente alto y en algunos casos invariablemente sanitario. En este sentido, el riesgo del consumo del agua en la zona urbana (cabecera), presentó un IRCA de 11,28 %, correspondiente a riesgo bajo y en zona rural (resto), alcanzó 52,12% clasificado en alto (Guzmán et al., 2014).

Referente a la baja calidad del agua suministrada a muchas comunidades, existen por lo menos 25 enfermedades que pueden ser provocadas por la contaminación del líquido según la OMS (2015). En el caso de Colombia, las enfermedades más comunes por esta causa son hepatitis A, fiebre tifoidea/paratifoidea y enfermedad diarreica aguda, advierte el INS (Instituto Nacional de Salud). (Ávila Jiménez, 2015).

Surge entonces la necesidad del involucramiento de las comunidades como factor crítico a considerar en los proyectos de prestación de servicios de agua y saneamiento en zonas rurales, de tal forma que los beneficiarios participen activamente en el desarrollo de las alternativas durante todo el ciclo (pre inversión, inversión, post inversión) procurando que las mismas se apropien del proyecto, tomen decisiones e internalicen sus alcances y beneficios, para una efectiva toma de decisiones respecto a la oferta de servicios de agua y saneamiento con tecnologías no convencionales acordes con su realidad fisiográfica y sociocultural. También es importante considerar la capacidad de gestión para la adecuada operación, administración y mantenimiento apuntando siempre a la implementación de proyectos sostenibles (Useche, 2012).

2. JUSTIFICACIÓN

La Filtración en Múltiples Etapas (FiME) es una combinación de Filtración Gruesa en Grava (FG) y de Filtración Lenta en Arena (FLA). Esta combinación hace posible el tratamiento de agua con niveles de contaminación muy superiores a los que se pueden tratar utilizando sólo la FLA, por lo que se presenta como una solución integrada para mejorar el abastecimiento de agua en comunidades rurales y en pequeños o medianos municipios de los países en vía desarrollo, así como para las áreas más remotas de los países industrializados. Esta tecnología, además de ser robusta y confiable, puede ser mantenida por operadores con bajos niveles de escolaridad, lo que la hace más sostenible frente al tratamiento químico del agua (Sánchez , Sánchez , Galvis, & Latorre, 2007)

Sin embargo su utilización en países como el nuestro, con respecto a los FLA tiene limitaciones importantes. En primer lugar, los niveles de contaminación en el agua cruda que superan la capacidad del tratamiento para cumplir con la normatividad vigente o para tener carreras o ciclos de filtración suficientemente largos, lo cual implica que el lavado del FLA sea más recurrente; y en segunda instancia, condiciones que reducen o inhiben la capacidad de tratamiento (Galvis et al., 1999). De otro lado los costos de inversión inicial de los FLA, comparado con el costo total de la planta de tratamiento, puede alcanzar entre el 45 y el 65% (Fernández et al., 2001).

Una alternativa que permite superar las limitaciones en la calidad del agua afluyente y así potenciar el uso de las FiME, es la utilización de geotextiles sintéticos NT sobre la superficie de la arena de los FLA ya que ofrecen un medio filtrante de mayor eficiencia, lo cual permite concentrar la mayor parte de los procesos de purificación en el geotextil y no en la superficie de la capa de arena, logrando así extender las carreras de filtración y disminuir las pérdidas de carga en el filtro. Investigaciones desarrolladas en Inglaterra y Brasil demuestran que es posible extender dichas carreras en un factor de 0,6 a 4,8 usando geotextiles y empleando velocidades de filtración entre 0,15 y 0,30 m/h y altura de lecho de arena entre 0,30 y 0,80 m (Graham et al., 1996) Citado por (Fernández et al., 2001, p. 3)

Según Graham et al. (1996) un incremento de velocidad de filtración mayor a 0,20 m/h en los FLA debería mantener la eficiencia del proceso de remoción, sin incrementar la frecuencia de mantenimiento en los filtros lentos (Fernández et al., 2001). Luego, es muy prometedor evaluar el efecto de velocidades de filtración más altas con respecto a las recomendadas, especialmente en los filtros que tienen capa de geotextil NT; lo anterior permitiría disminuir las áreas de filtración y por tanto los costos de inversión inicial de un proyecto diseñado con FLA, además frente a la disminución de pérdidas de carga asociadas al uso del geotextil, también es posible recortar costos considerando alturas menores en el diseño de los FLA.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar el uso de geotextiles NT con velocidades de filtración mayores a 0,20 m/h para optimizar el funcionamiento y disminuir los costos de inversión inicial en FLA a escala piloto.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar el impacto del uso de geotextil NT 1600 en el desarrollo de la pérdida de carga en FLA a velocidades de filtración superiores a 0,20 m/h.
- Evaluar el impacto del uso de geotextil NT 1600 en la calidad fisicoquímica del agua efluente del FLA a velocidades de filtración superiores a 0,20 m/h.

4. MARCO TEÓRICO

4.1 FILTRACIÓN LENTA EN ARENA (FLA)

La filtración consiste en la remoción de partículas suspendidas y coloidales presentes en una suspensión acuosa que pasa a través de un medio poroso. La filtración puede ser rápida o lenta, dependiendo de la tasa de filtración. Usualmente, los filtros rápidos funcionan con velocidades de filtración entre 5 y 15 m/h, mientras la filtración lenta opera a tasas entre 0,30 y 0,58 m/h. En tabla 1 se presenta algunas características específicas para el diseño de los sistemas de FLA según varios autores; nótese que para algunas de las características presentadas la variación que hay entre autores es poca (Jaramillo, 2013).

Tabla 1

Recomendaciones para el diseño de sistemas de FLA

| Criterio de diseño | Recomendaciones | | | | |
|---|-------------------------------|-----------------------------|--|------------------------------------|-------------------------|
| | Arboleda, (2000) ¹ | Cánepa, (1992) ² | Galvis, Latorre y Visscher (1998) ³ | Sánchez et al. (2007) ⁴ | Ras (2000) ⁵ |
| Profundidad lecho filtrante (m) | 0,90-1,10 | 0,50-1,00 | 0,80 | 0,80-1,20 | 0,8-1,0 |
| Tamaño efectivo (d_{10}) del lecho filtrante (mm) | 0,15-0,30 | 0,15-0,35 | 0,15-0,30 | 0,15-0,30 | 0,35-0,55 |
| Coefficiente de uniformidad del lecho filtrante (d_{10}/d_{60}) | 1,5-2,5 | 1,8-2,0 | <3,0 | <5,0 | 2-4 |
| Lecho de soporte, grava (m) | 0,30 | 0,30 | 0,25 | 0,30 | 0,25 |
| Velocidad de filtración (m/h) | 0,30-0,58 | 0,10-0,20 | 0,10-0,30 | 0,10-0,40 | 0,10-0,30 |
| Máxima altura del sobrenadante (m) | 1,20 | 1,0-1,50 | 0,75 | 0,6-1,2 | 0,7-1,0 |

¹Tomado de Arboleda, “Teoría y Práctica de la Purificación del Agua” (2000).

²Tomado de Cánepa, “Ciclo: Tratamiento, serie: Filtración Lenta. Manuales I, II y III” (1992).

³Tomado de Galvis, Latorre y Visscher, “Multi-stage filtration: An Innovative Water Treatment Technology” (1998).

⁴Tomado de Sánchez et al., “Filtración en Múltiples Etapas” (2007).

⁵Tomado de Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS - (2000).

Nota: tomado de Jaramillo (2013).

Una unidad de FLA está conformada por una estructura que contiene un lecho filtrante, una capa de agua sobrenadante, un sistema de drenaje y el control del flujo, como se puede apreciar en la figura 1. En la FLA ocurren procesos biológicos y fisicoquímicos

interactuando de forma compleja. A las unidades de FLA ingresa el flujo de agua sin tratar o pre-tratada, pasando a través del medio filtrante por gravedad. Se genera crecimiento de algas debido a la fotosíntesis, proporcionando materia orgánica adicional, que favorece la contaminación del agua y el crecimiento de bacterias y otros microorganismos, que ayudan a la remoción del material soluble del agua en el lecho de arena. El lecho filtrante funciona como una unidad de limpieza de materia orgánica y organismos aeróbicos, como el zooplancton y el resto de la biomasa, los cuales demandan oxígeno del agua, por tal razón se hace necesario el flujo continuo en el sistema (Sánchez et al., 2007).

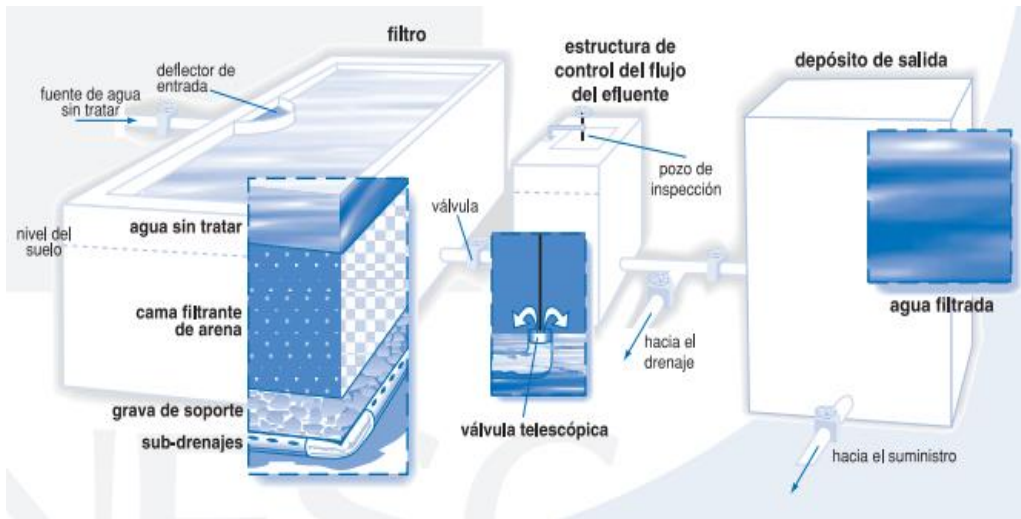


Figura 1. Componentes básicos de una unidad FLA.

Nota: tomada de (National Environmental Services Center, 2009)

Utilizado por primera vez en Estados Unidos en 1872, el sistema FLA, es el tipo más antiguo de filtración de agua municipal y debido a su simplicidad en cuanto a diseño, operación, requerimientos mínimos de compuestos químicos y energía; se presenta como una técnica apropiada para el retiro de materia suspendida orgánica e inorgánica, entre otras ventajas. La FLA reduce bacterias, la nubosidad y los niveles orgánicos; simplificando así, las necesidades de desinfección. También se presentan mínimos problemas de manejo de lodo, no es necesaria la supervisión cercana del operador y finalmente para estos sistemas se puede hacer uso de materiales y de mano de obra disponible localmente (National Environmental Services Center, 2009).

Por otro lado, como lo mencionan Sánchez et al. (2007), la FLA presenta dos limitaciones importantes. La primera es con respecto a la calidad del agua de la fuente, si esta es baja, puede exceder la capacidad de tratamiento, una turbiedad alta genera taponamientos prematuros de los filtros y altos niveles de color exceden la capacidad de remoción. La segunda limitante tiene que ver con la naturaleza biológica del tratamiento, estos sistemas requieren de un caudal continuo de agua para asegurar el suministro de oxígeno y

nutrientes. Las bajas temperaturas, la baja concentración de nutrientes y los bajos niveles de oxígeno disuelto pueden afectar negativamente el tratamiento. En la tabla 2, se pueden observar los parámetros más importantes para la selección del sistema de FLA, como turbiedad, color aparente y coliformes totales; estos parámetros son la referencia para determinar si se requieren unidades de prefiltración que permitan que la eficiencia del sistema aumente.

Tabla 2

Límites establecidos para los parámetros de mayor importancia en la FLA

| Parámetro | Arboleda, (2000)¹ | Di Bernardo y Dantas (2005)² | Galvis, (1999)³ |
|--|-------------------------------------|--|-----------------------------------|
| Turbiedad (UNT) | <10 | <15 | <10 |
| Color verdadero (UPC) | <10 | <15 | <10 |
| Coliformes totales (UFC/100 mL) | <800 | <1000 | <1000 |

¹Tomado de arboleda, “Teoría y práctica de la purificación del agua” (2000).

²Tomado de Di Bernardo y Dantas, “Métodos e Técnicas de Tratamiento de Agua” (2007).

³Tomado de Galvis, “Development and Evaluation of Multistage Plants: An Innovative, Robust and Efficient Water Treatment Technology” (1999).

Nota: tomado de Jaramillo (2013).

4.2 FILTRACIÓN EN MÚLTIPLES ETAPAS (FiME)

La Filtración en Múltiples Etapas (FiME), que es una combinación de FLA y filtros en grava, como se puede observar en la figura 2; es una tecnología que emerge como solución para superar parte de las limitaciones de los FLA. La integración de estas etapas de filtración permite el tratamiento de agua con niveles de contaminación más elevados que aquellos con que podría operar la tecnología de FLA independientemente (Fernández et al., 2001). La FiME conserva las ventajas de la FLA como una tecnología robusta y confiable, la cual puede ser mantenida por operadores con bajos niveles de escolaridad. Además, como resaltan Sánchez et al. (2007) es mucho más sostenible que el tratamiento químico del agua para las comunidades rurales, pequeños y medianos municipios de los países en vía desarrollo, así como para las áreas más remotas de los países industrializados. También es posible adicionar procesos de tratamiento como la sedimentación, las trampas de arena y rejillas, precediendo a los sistemas FiME y cuando sea posible, se debe incluir la desinfección final a manera de barrera de seguridad después de la FiME.

Aunque ha sido implementada en algunas zonas y probada en otras, la FiME como paquete tecnológico aún es desconocida en muchos países. Según Pardón (1989); Galvis et al. (1989) citados por Sánchez et al. (2007); el desarrollo de las FiME en Latinoamérica, inició en 1980 con prometedores resultados. En 1990 fueron estudiadas por investigadores

en Colombia, donde está siendo aplicado a gran escala, intentando ampliar su aplicación y promover su desarrollo, particularmente en América Latina. Sin embargo surgen limitaciones asociadas a los FLA, pues la tecnología no se aplica en armonía con las condiciones locales (Fernández et al., 2001).

Uno de los principales problemas que se presentan al usar FiME, de acuerdo a Fernández et al. (2001), es la corta duración de las carreras de filtración asociado directamente al FLA, lo cual demanda una alta dedicación del operador en labores mantenimiento. Además el componente de mayor peso porcentual en costos de inversión inicial se debe a los FLA.

FiME es una de las opciones más interesantes y quizá la única solución para muchos sistemas de abastecimiento de agua en las comunidades. El reto incluye la necesidad de mejorar los sistemas existentes, en particular los numerosos sistemas de filtración lenta en arena (FLA) alrededor del mundo, que no funcionan correctamente para que alcancen un mejor desempeño (Sánchez et al., 2007).

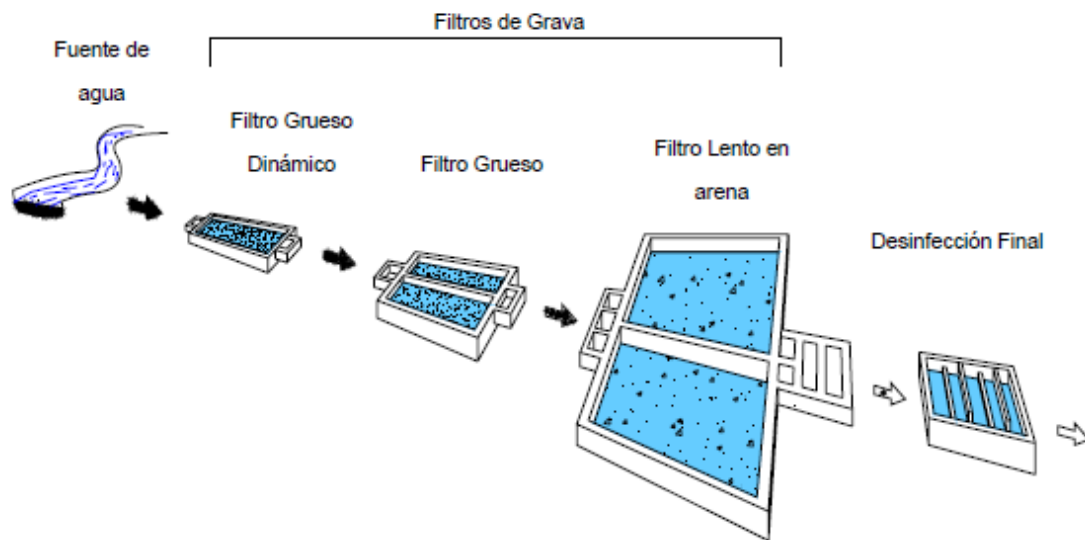


Figura 2. Esquema general de un sistema FiME.

Nota: tomado de Sánchez et al. (2007)

4.3 MANTAS O GEOTEXILES SINTÉTICOS

Para superar las limitaciones asociadas a las FiME, específicamente en relación a los FLA, se han llevado a cabo estudios en Inglaterra y Brasil desde la década de los ochenta asociados al uso de mantas sintéticas y naturales no tejidas como medio de protección y remoción de sólidos y turbiedad, en las unidades de FLA, sin la necesidad de hacer grandes inversiones de capital. Las investigaciones desarrolladas han mostrado que es posible extender las carreras de filtración en un factor de 0,6 a 4,8, usando velocidades de filtración

entre 0,15 y 0,30 m/h y alturas de lecho de arena entre 0,30 y 0,80 m (Fernández et al., 2001).

Mbwette y Graham (1990), Citados por Bueno y Quiñonez (2010), estudiaron las propiedades y características de los geotextiles sintéticos y los clasificaron en dos grupos: tejidos y no tejidos (NT). Los no tejidos poseen una porosidad entre 80 al 90% y área superficial específica entre 10.000 y 20.000 m²/m³, como lo indican (Graham et al., 1995) citados por Bueno y Quiñonez (2010); por lo cual la probabilidad de remover partículas y almacenarlas también es alta, los geotextiles tejidos presentan espesores, porosidades y superficie específicas más bajas que los de geotextiles NT, por lo cual su uso para la retención de sólidos es limitado.

La ubicación de geotextiles sintéticos sobre la superficie de la arena en los filtros lentos, concentra la mayor parte de los procesos de tratamiento en el geotextil y no en la superficie de la arena. De acuerdo a Graham et al. (1995), esto podría explicarse por las propiedades estructurales de los geotextiles NT que ofrecen un medio filtrante más eficiente que la arena. Pues, al comparar la filtrabilidad típica de una arena usada como medio filtrante en los filtros lentos y un geotextil con un área específica de 20.000 m²/m³, el resultado sugiere que este presenta un coeficiente de filtración 4,4 veces mayor que el de la arena, indicando que los geotextiles NT son un mejor medio de filtración que la arena (Bueno y Quiñonez, 2010).

Los geotextiles NT son mantas o láminas permeables y flexibles de fibras sintéticas punzonadas, principalmente hechas con polipropileno y poliéster. La textura altamente permeable del geotextil permite un rápido paso del agua, a la vez que retiene las partículas suspendidas de tamaño mayor al rango de poro del geotextil, el cual está entre 35 µm y 100 µm. Además, dada la naturaleza apolar del polipropileno, las partículas retenidas en el geotextil no se adhieren de manera permanente y por ende la limpieza del material es sencilla y con posibilidades de reutilización (Piegari, 2005, citado por Peña Escobar & Fernández, 2010). El Geotextil tipo NT 1600 es un Geotextil No Tejido por punzonamiento de agujas de 100% fibra sintética discontinua de polipropileno, que se forman en una red aleatoria de estabilidad dimensional. El Tipo No tejido NT - 1600 resiste la degradación ultravioleta, podredumbre, degradación biológica, elementos ácidos o básicos encontrados de manera natural. Polipropileno es estable dentro de un rango de pH de 2 a 13. (Geosoluciones SAS, 2016). Sus propiedades se indican en la tabla 3.

Tabla 3*Características del geotextil NT 1600*

| | Propiedad | Unidad | Valor típico |
|--------------------------------|-----------------------------|----------------------|---------------------|
| Propiedades hidráulicas | Tamaño de abertura aparente | Mm | 0.180 |
| | Permeabilidad | cm/s | 44×10^{-2} |
| | Permitividad | s^{-1} | 2.9 |
| | Tasa de flujo | L/min/m ² | 8109 |
| Propiedades físicas | Espesor | Mm | 1.5 |
| | Resistencia UV 500 horas | % | >70 |

Nota: tomado de Geosoluciones SAS (2016).

Los geotextiles sintéticos son fabricados en casi todo el mundo, y a nivel nacional se cuenta con una amplia gama de estos (PAVCO 2008).

Fernández et al. (2001), reporta el incremento en la eficiencia de remoción de sólidos suspendidos de filtros lentos que usaron geotextiles sintéticos NT comparados con un filtro sin los geotextiles. En el estudio, los geotextiles NT presentaron porosidades entre del 87,7% y 90,7 %, con un área superficial específica entre 11.212 y 15.860 m²/m². La eficiencia en la remoción de sólidos suspendidos se incrementó del 70 al 85 % por el efecto del geotextil. Aunque este incremento del 15 % parece bajo, su efecto sobre el desarrollo de la pérdida de carga es alto ya que la carrera de filtración se incrementó en un factor entre 1,33 a 1,92 respecto del filtro lento sin geotextil. Este resultado indica que una buena parte de los sólidos suspendidos son retenidos en este.

5. METODOLOGÍA

5.1 ZONA DE ESTUDIO

El estudio fue desarrollado a nivel de planta piloto en una parcelación privada de la vereda Los Llanos que pertenece al corregimiento Las Piedras ubicado al nororiente del municipio de Popayán. El lugar de trabajo se encuentra sobre el flanco central de la cordillera Central en una franja altitudinal entre los 2.000 y 3.000 msnm, presentando un clima frío y húmedo con temperaturas promedio similares de 18,4°C. La región se puede considerar monomodal teniendo en cuenta la precipitación promedio mensual multianual (160,5mm), enmarcado por un periodo de lluvias más pronunciado durante los meses de Noviembre y Abril.

Para la investigación se utilizará agua pretratada por un sistema de filtración gruesa dinámica (FGDi) y un filtro grueso ascendente (FGA) proveniente del Acueducto de la vereda Los Llanos, cuya fuente de suministro corresponde a la quebrada San Isidro y Velasquillo.

5.2 CONDICIONES GENERALES DE LA PLANTA PILOTO

El sistema experimental a escala piloto consta de tres columnas de filtración abastecidas mediante un tanque plástico de cabeza constante por gravedad, cuyo flujo de agua fue captado directamente de la red del acueducto veredal Los Llanos. Los caudales de agua fueron suministrados durante toda la carrera de filtración de cada unidad de FLA y estos eran controlados desde un sistema de flotación adaptado en el tanque dosificador. Ver figura 3 y foto 1.

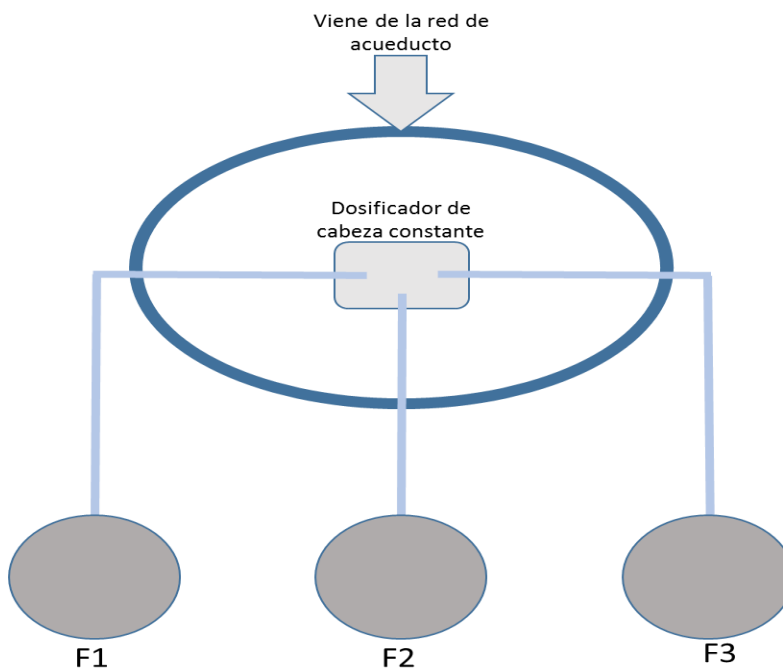


Figura 3. Vista en planta del sistema de FLA a escala piloto.

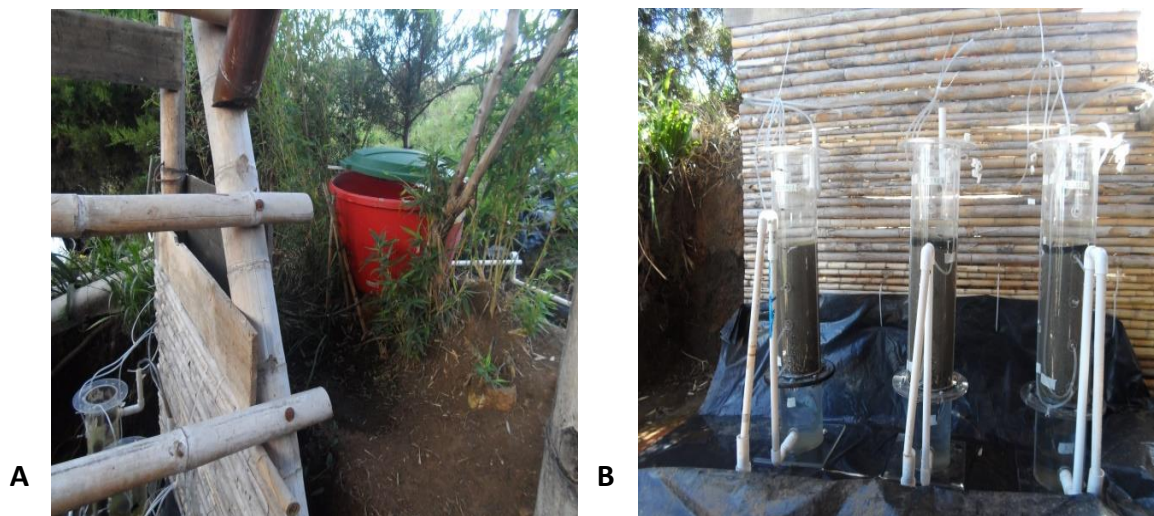


Foto 1. Visualización del montaje experimental. Foto A, vista del tanque de dosificación de agua cruda a los FLA. Foto B, vista de los sistemas de filtración.

5.3 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS FLA A ESCALA PILOTO

Las columnas de filtración son cilíndricas construidas en acrílico, miden 0,80 m de altura y 0,14 m de diámetro, el volumen de filtración es de aproximadamente 12 L. El lecho

filtrante varía de la siguiente forma en los FLA, la primera torre de filtración –FLA 1- es un sistema de control o blanco, tiene 0,30 m de lecho filtrante de arena con un tamaño efectivo de 0,15 a 0,30 mm y un coeficiente de uniformidad $Cu < 5$. La segunda y tercera torre de filtración (-FLA2-, -FLA3-) cuentan con un lecho filtrante de 0,30 m de arena con tamaño efectivo de 0,15 a 0,30 mm y en la superficie del lecho de arena se hallan ubicadas tres capas de manta sintética (Geotextil NT 1600 de PAVCO) de 1.5 mm de espesor cada una y cuya altura es de 0,045 m. Los sistemas de filtración tuvieron el mismo lecho de soporte constituido por una capa de grava de 0,025 m de espesor y con tamaños efectivos entre 1/8” y 1/16”. Además cada FLA tuvo una capa de agua sobrenadante, la cual proporciona la carga hidráulica necesaria para permitir el paso del agua a través de los lechos de filtración, esta última tiene una altura de 0,05 m por encima del lecho filtrante. Finalmente el sistema de drenaje es una placa perforada (3/8) que permite el paso del agua tratada en los FLA. Ver figura 4.

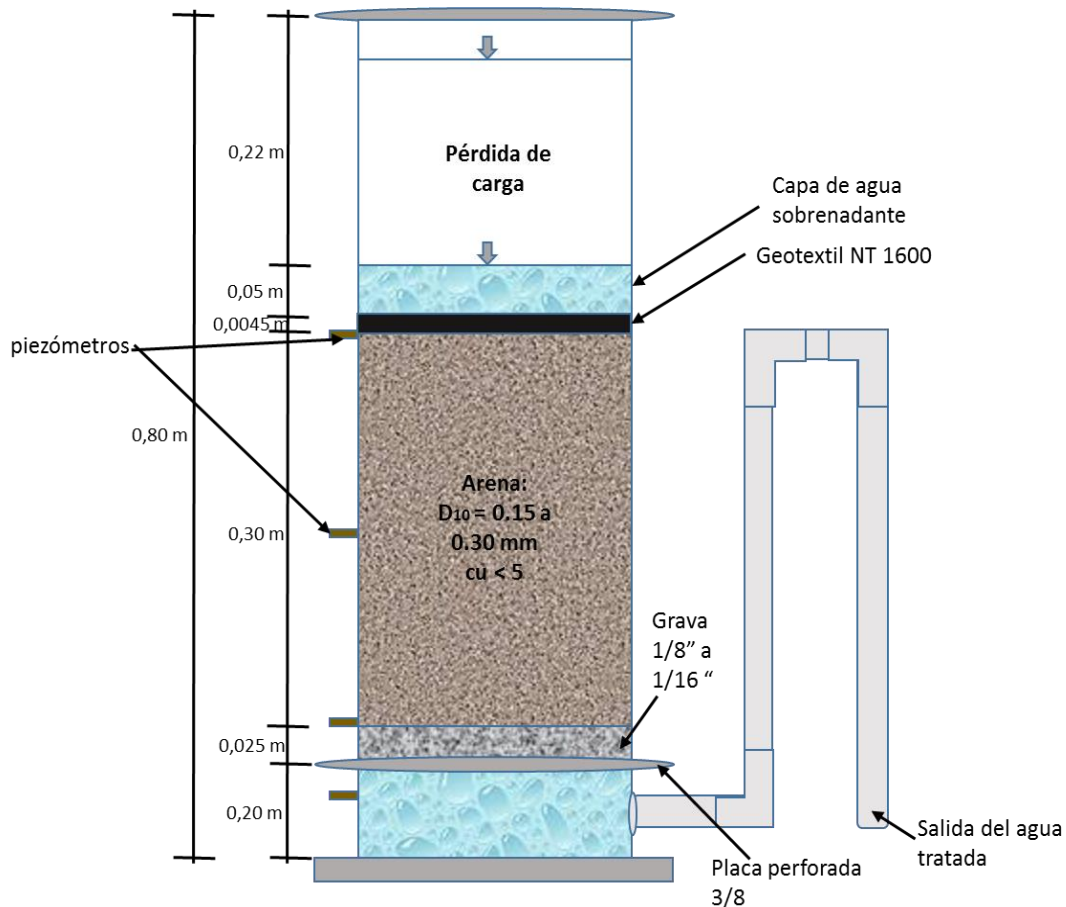


Figura 4. Características del filtro a escala piloto.

Nota: Sobre la superficie de arena del FLA 1 o blanco no se instaló geotextil NT 1600.

5.4 PARÁMETROS DE DISEÑO PARA LOS SISTEMAS DE FILTRACIÓN

Las unidades de filtración fueron diseñadas teniendo en cuenta las recomendaciones propuestas por algunos autores (Arboleda, 2000; Di Bernardo y Dantas, 2005; Galvis, Latorre y Visscher, 1998; Sanchez et al. 2007). Los cuales fueron citados por Jaramillo (2013). En el marco teórico, tabla 1, se presenta una recopilación de las recomendaciones para el diseño de los sistemas del FLA según los autores anteriormente citados.

Para evaluar los sistemas de filtración se escogieron dos tasas de filtración: 7,2 y 9,6 $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{día}$ que equivalen a 0,30 m/h y 0,40 m/h respectivamente. En la tabla 4 se hace una descripción de los sistemas de filtración diseñados, se muestra la altura de las torres de filtración y la profundidad del lecho filtrante y de soporte. Cabe resaltar que algunas características de los FLA, varían respecto a las que recomienda la literatura en la tabla 1 por tratarse de un estudio a escala piloto y no a escala real.

Tabla 4

Parámetros de diseño de cada una de las torres de filtración

| Parámetro | FLA1 | FLA2 | FLA3 |
|--|--------------------|---------------------|---------------------|
| Tasas de filtración evaluadas ($\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{día}$) | 7,2 | 7,2 | 9,6 |
| Velocidad de filtración | 0,30 | 0,30 | 0,40 |
| Caudal ($\text{m}^3/\text{día}$) | 0,11 | 0,11 | 0,15 |
| Máxima altura de nivel de agua (m) | 0,70 | 0,70 | 0,70 |
| Lecho filtrante (arena) | | | |
| Espesor del lecho filtrante (m) | 0,30 | 0,30 | 0,30 |
| Tamaño efectivo (d_{10}) (mm) y C_u (d_{60}/d_{10}) | 0,2 y 3,0 | 0,2 y 3,0 | 0,2 y 3,0 |
| Lecho filtrante (Geotextil NT 1600) | | | |
| Espesor del lecho filtrante (m) | No aplica | 0,0045 ¹ | 0,0045 ¹ |
| Lecho de soporte (grava) | | | |
| Tamaño efectivo de cada capa de grava (mm) | 3,2 y 1,6 | 3,2 y 1,6 | 3,2 y 1,6 |
| Espesor total del lecho de soporte (m) | 0,025 ² | 0,025 ² | 0,025 ² |

¹Éste se ubica en la superficie del lecho de arena y está constituida por tres capas de manta de 1,5 mm de espesor cada una.

²El valor es equivalente al espesor total del lecho de soporte. Con 1,25 cm de grava de 3,2 mm y 1,25 cm de grava de 1,6 mm.

5.5 GRANULOMETRÍA DE LA ARENA USADA EN LOS FLA

Para este estudio se usó arena de río con diámetro efectivo $D_{10}=0,2$ mm y coeficiente de uniformidad $C_u= 3$, obtenidos a partir del análisis granulométrico especificado en la figura 5.

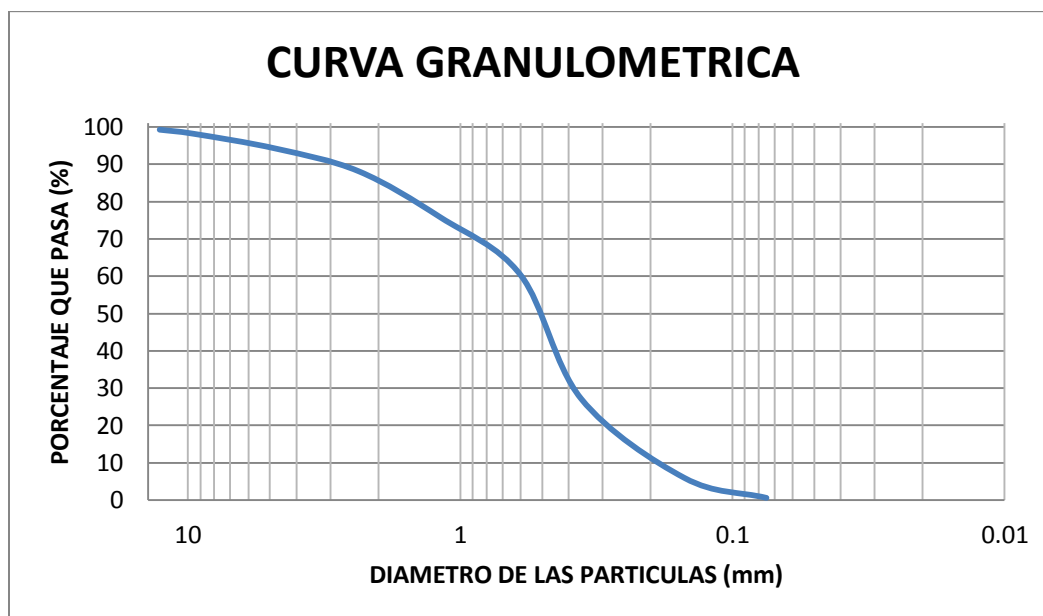


Figura 5. Estudio granulométrico de la arena usada en los FLA a escala piloto

De donde $D_{10}=0,2$ mm; $D_{30}=0,4$ mm; $D_{60}=0,6$ mm y $C_u= 3$

5.6 TIPO Y MODO DE USO DEL GEOTEXTIL EN LA INVESTIGACIÓN

Según el Cinara (2001) las mantas sintéticas son el material más viable para su uso sobre el lecho de arena del FLA, puesto que no se desarrollan procesos de degradación del geotextil sintético una vez inicia la actividad de la capa biológica que crece sobre la misma. Por lo anterior, para la evaluación se seleccionó geotextil NT 1600, el cual es una manta sintética fabricada y distribuida por PAVCO y cuyas características generales se encuentran en la tabla 5.

Tabla 5*Principales características del geotextil NT 1600 evaluado en la planta piloto*

| Fabricante | Referencia | Conductividad Hidráulica (mm/s) | Espesor (mm) | Porosidad (%) | Área superficial Específica (m ² /m ³) |
|------------|------------|---------------------------------------|-----------------|------------------|--|
| PAVCO | NT-1400 | 0,46 | 1,35 | 90,7 | 11273 |
| PAVCO | NT-1600 | 4,5 | 1,50 | 89,01 | 15160 |
| PAVCO | NT-2000 | 0,41 | 2,0 | 90,0 | 12903 |

Fuente: PAVCO 2010.

El geotextil NT 1600 se ubica sobre la superficie de la arena de las unidad piloto de filtración (ver figura 4), dada su capacidad de concentrar la mayor parte de los procesos de remoción en la manta sintética y no en la superficie de la capa de arena. El lecho de geotextil consta de tres capas de la manta sintética que fue asegurada en los filtros mediante aros circulares de plástico que se introdujeron a presión y ajustaron el geotextil a la pared de los FLA.

5.7 DESARROLLO DE LOS OBJETIVOS ESPECÍFICOS

5.7.1 OBJETIVO ESPECÍFICO 1

- Evaluar el impacto del uso de geotextiles NT en el desarrollo de la pérdida de carga en FLA a velocidades de filtración superiores a 0,20 m/h.

Para la evaluación del comportamiento hidráulico de las tres unidades de FLA, se midió la pérdida de carga de la manta (solo para los FLA que tuvieron geotextil), del lecho de arena y de la capa de soporte mediante la ubicación de piezómetros en las posiciones específicas indicadas en la tabla 6 y en la Figura 4. Se consideró que la carrera de filtración finalizaba cuando los FLA alcanzaran la máxima altura del nivel de agua especificada en la tabla 4; momento en el que además se desborda el agua de las unidades de filtración lenta.

Tabla 6*Localización de los piezómetros en los FLA*

| Piezómetro | Localización |
|------------|-------------------------------|
| 1 | Bajo el geotextil* (P1) |
| 2 | Bajo el lecho de arena (P2) |
| 3 | Bajo el lecho de soporte (P3) |

**En el FLA 1 este piezómetro no se utilizó.*

P1 = Pérdida de carga bajo el geotextil

P2 = Pérdida de carga bajo el lecho de arena

P3 = Pérdida de carga bajo el lecho de soporte

Para hallar puntualmente las pérdidas de carga del lecho de arena y del lecho de soporte en el FLA2 y FLA3, es necesario determinar los valores mediante las siguientes ecuaciones:

$$\text{Pérdida por el lecho de arena} = P2 - P1 \text{ (Ecuación 1)}$$

$$\text{Pérdida por el lecho de soporte} = P3 - P2 \text{ (Ecuación 2)}$$

$$\text{Pérdida de carga total} = P1 + P2 + P3 \text{ (Ecuación 3)}$$

En el trabajo de campo antes de realizar la lectura de las pérdidas de carga anteriormente mencionadas, siempre se verificó que los caudales de agua que llegaban a los filtros correspondieran a los teóricos. De lo contrario se debían ajustar mediante el sistema de dosificación y esperar a que los niveles de agua en filtro se estabilizaran. También era importante comprobar que las mangueras conectadas a los piezómetros en cada filtro estuvieran libres de burbujas, en caso de no ser así se debía desconectar las mangueras y liberar el aire al interior de los filtros.

La frecuencia de medición de pérdidas de carga en los filtros se realizó diariamente durante los primeros 36 días de funcionamiento de la planta piloto y los datos de pérdidas de carga correspondientes al tiempo restante se tomaron 4 veces por semana hasta el final de la carrera de filtración de cada FLA.

5.7.2 OBJETIVO ESPECÍFICO 2

- Evaluar el impacto del uso de geotextil NT 1600 en la calidad fisicoquímica del agua efluente del FLA a velocidades de filtración superiores a 0,20 m/h.

Los métodos analíticos usados para el análisis de los parámetros fisicoquímicos son los presentados por el *Standard Methods for the Examination of Water and Waste Water (APHA, 2005)*. En la tabla 7 se cita el parámetro evaluado, el método de referencia asociado según el *Standard Methods* y el equipo usado para llevar a cabo la medición. Luego se hace una descripción de cómo se realizó la medición de cada uno de los parámetros de calidad evaluados.

Tabla 7

Parámetros de calidad evaluados, métodos de referencia y equipos usados en la medición de calidad

| Parámetros | Método de referencia | Equipos |
|------------------------------------|--------------------------------------|--|
| Turbiedad (UNT) | Nefelométrico 2130-B | Turbidímetro portátil Hach modelo 2100P. |
| Color aparente (UPC) | Espectrofotométrico 2120-C | Colorímetro portátil Hach modelo DR/2010. |
| Materia orgánica | Espectrofotométrico UV-254nm | Espectrofotómetro Merk modelo Pharo 300. |
| Potencial de hidrogeno (pH) | Electrométrico 4500-H ⁺ B | Multi-parámetro Hach HQ 40d con sonda para medir potencial de hidrogeniones. |
| Temperatura (°C) | Potenciométrico 2550 | Multi-parámetro Hach HQ 40d con sonda para medir potencial de hidrogeniones. |

La frecuencia de análisis de los parámetros fisicoquímicos de las muestras de agua tomadas en campo se especifica en la tabla 8.

Tabla 8

Frecuencia de muestreo de parámetros fisicoquímicos medidos en el efluente y afluente del sistema piloto

| Frecuencia de muestreo de parámetros fisicoquímicos | | | | |
|--|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Parámetro | Entrada | Salida | | |
| | | Filtro 1 | Filtro 1 | Filtro 1 |
| Turbiedad (UNT) | 3*SEM | 3*SEM | 3*SEM | 3*SEM |
| Color aparente (UPC) | 3*SEM | 3*SEM | 3*SEM | 3*SEM |
| Espectrofotometría UV-254 nm | 3*SEM | 3*SEM | 3*SEM | 3*SEM |
| Potencial de hidrogeno (pH) | 3*SEM | 3*SEM | 3*SEM | 3*SEM |
| Temperatura (°C) | 3*SEM | 3*SEM | 3*SEM | 3*SEM |

*SEM: Semana

6. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Realizado el seguimiento de cada uno de los sistemas de filtración evaluados bajo los lineamientos presentados en la metodología, se obtienen los resultados que serán presentados y discutidos en los ítems a continuación. El detalle de los datos también se ha incluido en los anexos 1, 2, 3 y 4.

6.1 DESARROLLO DE LAS PÉRDIDAS DE CARGA EN LOS FLA

Los resultados sobre el desarrollo de la pérdida de carga total en los filtros lentos evaluados se presentan en la figura 6, mientras que en las figuras, 7 y 8 se reporta el comportamiento de las pérdidas de carga desarrolladas en los filtros considerando el uso del geotextil, las velocidades evaluadas (0,30 y 0,40 m/h) y su localización puntual en los filtros lentos. En el anexo 2 se encuentra la información detallada de todas las mediciones referentes a las pérdidas de carga de cada filtro en el periodo evaluado (septiembre-noviembre del 2016). Las figuras también incluyen la pérdida de carga total del filtro lento sin geotextil.

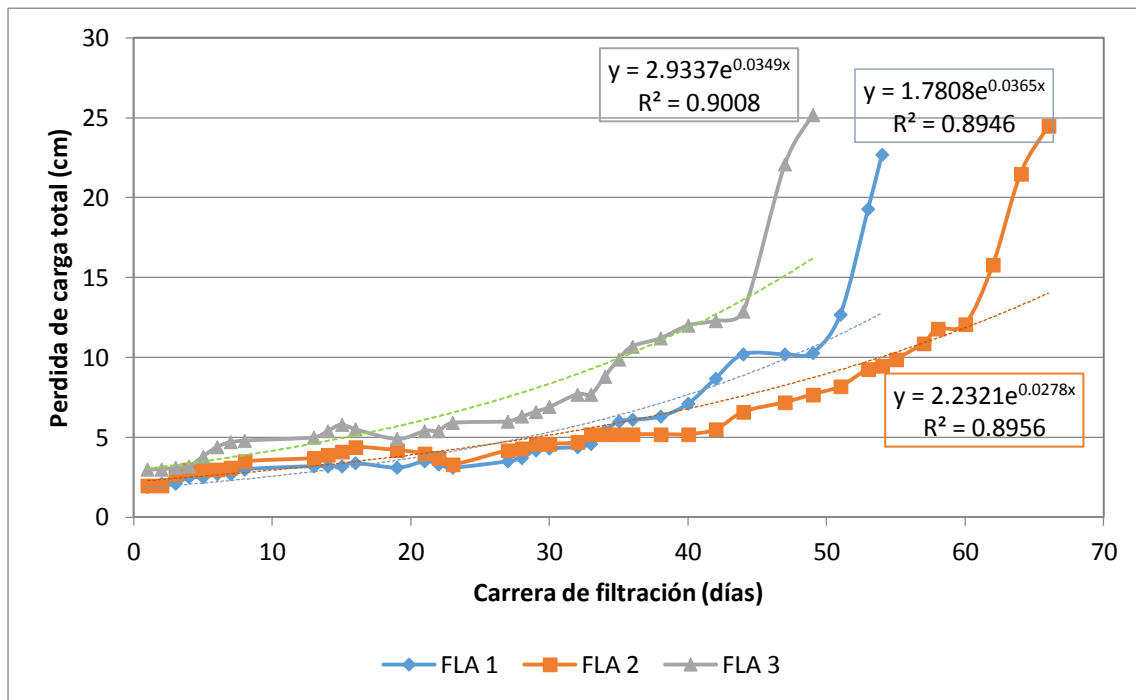


Figura 6. Desarrollo de las pérdidas de carga totales en el FLA 1, FLA 2 y FLA 3 en el periodo septiembre a noviembre del 2016.

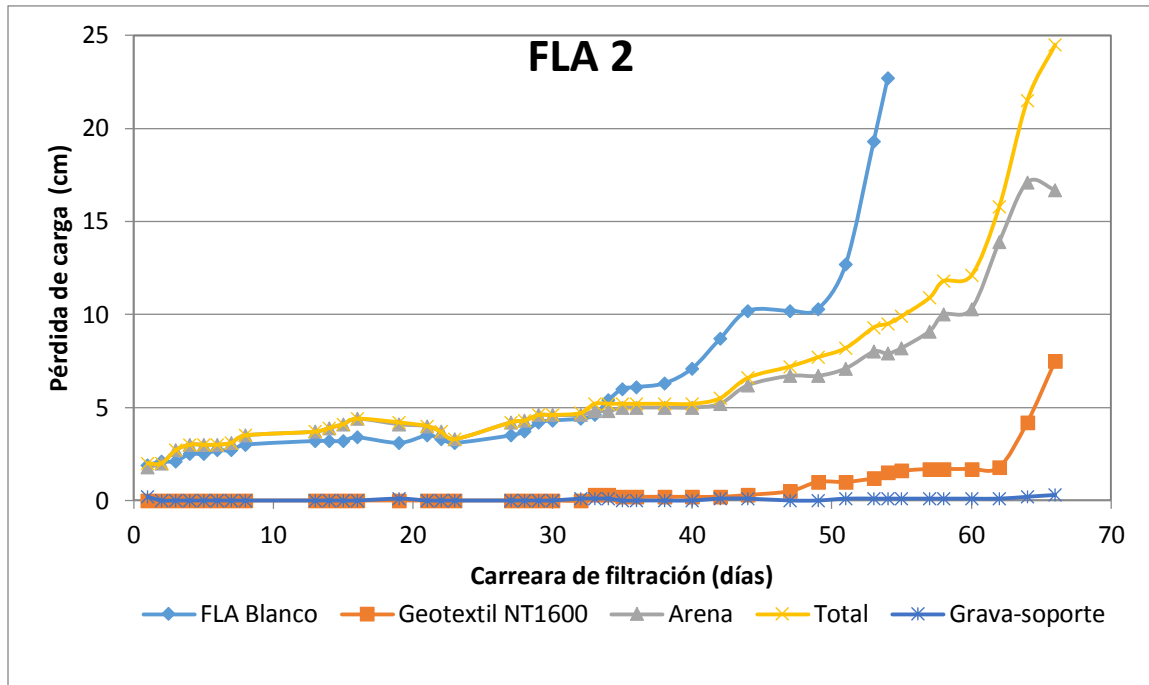


Figura 7. Comportamiento de la pérdida de carga en el FLA 2 con geotextil NT 1600, en comparación con el FLA 1(Blanco).

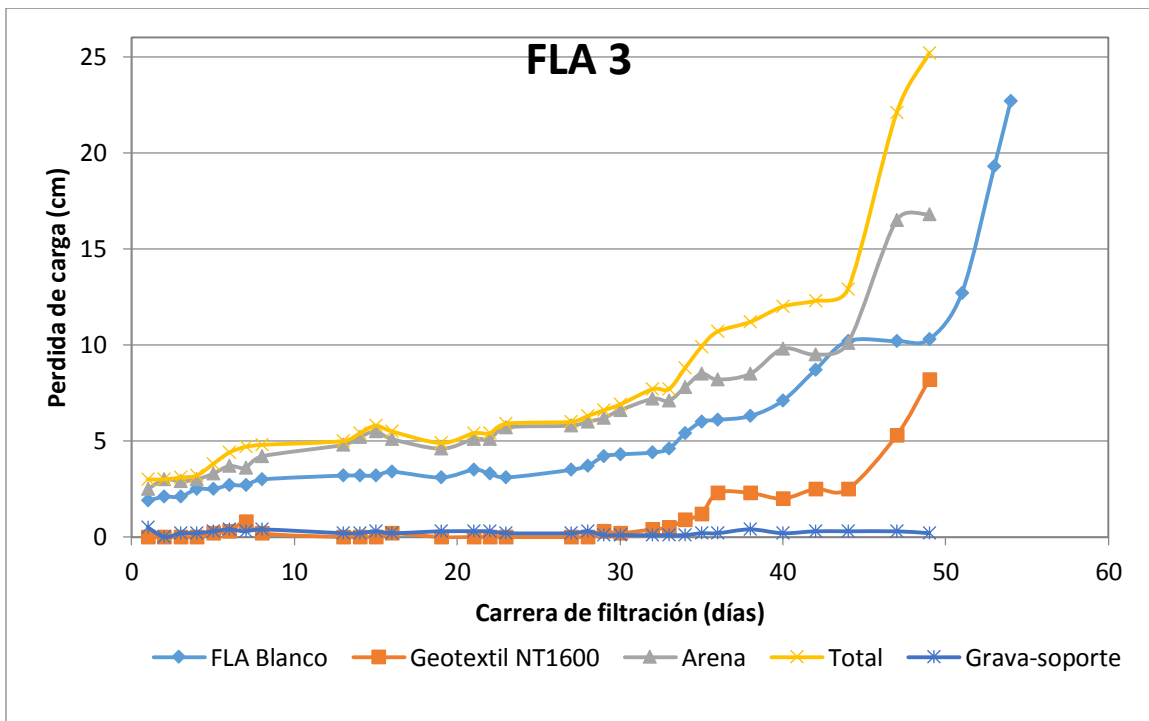


Figura 8. Comportamiento de la pérdida de carga en el FLA 3 con geotextil NT 1600, en comparación con el FLA 1(Blanco).

El desarrollo de pérdida de carga total de los sistemas de filtración se puede apreciar en la figura 6, en ella se evidencia la tendencia exponencial de los datos de campo de cada filtro y la similitud entre cada curva. Además se presenta el coeficiente de correlación R^2 de cada sistema de filtración, cuyos valores varían en menos del 1% asegurando la relación entre los datos y la confiabilidad de los mismos.

En los filtros que usaron geotextil NT 1600, la pérdida de carga se concentró en el lecho de arena y no en la manta sintética (Ver figura 8 y 9). Este resultado fue similar al reportado por Fernández et al (2001), e indica que se presenta penetración de lodo en la arena. Sin embargo, según lo reportado por Cinara (2001) en estudios de análisis de silt test realizados a superficies de arena de FLA con y sin geotextil, confirman que los porcentajes de trasvase de lodo son mucho menores cuando se implementan geotextiles NT sobre la superficie de lecho de arena sintético.

En las figuras 8 y 9 también se aprecia el desarrollo de las pérdidas de carga puntuales (Geotextil NT 1600, arena, total y grava-soporte) en el FLA 2 y FLA 3 en contraste con la pérdida total obtenida por el FLA 1 (blanco). Además en ambas figuras se observa que la progresión de la pérdida de carga del lecho de arena y la total tiende a ser semejantes entre los primeros 35 y 45 días, pero varían cuando la pérdida reportada del geotextil incrementa. Lo anterior está relacionado con la finalización del periodo de maduración de la capa biológica sobre el lecho filtrante y su mayor desarrollo.

Otro aspecto que se debe considerar es el desarrollo de pérdida de carga reportado por el geotextil sintético, cuyo comportamiento sugiere que este solo se presenta en las etapas finales de las carreras de filtración, indicando que la capa biológica se está desarrollando en el geotextil y no en el lecho filtrante de arena. Estudios realizados por Fernández et al (2001), muestran que durante las carreras de filtración en FLA, los geotextiles sintéticos NT no desarrollan considerables pérdidas de carga.

Mayores velocidades de filtración a 0,30 m/h implementadas en los FLA, incurrirían en un mayor trasvase de lodos del geotextil sintético al lecho de arena, razón por la cual se puede ver afectado el periodo de funcionamiento de los FLA ocasionando un acelerado crecimiento de pérdidas de carga. Otro factor que puede incidir en este tópico, es el crecimiento de materia orgánica en el lecho de arena como se aprecia en la foto 2 (La materia orgánica es de color verdosa).



Foto 2. Crecimiento de materia orgánica en el lecho de arena de los FLA.

6.2 EVALUACIÓN DE LAS CARRERAS DE FILTRACIÓN EN LOS FLA

Tal como se indicó en la metodología la duración de carrera es el tiempo en el cual el filtro alcanza la pérdida de carga máxima disponible, la cual para el presente proyecto fue de 30 cm. En la tabla 9 se hace un resumen de los diferentes tiempos de carrera de filtración obtenidos en la investigación en relación con las velocidades de filtración evaluadas.

Tabla 9

Tiempos de carrera de filtración para cada sistema de filtración

| Sistemas y velocidades de filtración | Carrera de filtración (días) | | |
|--------------------------------------|------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | FLA 1 (sin geotextil) | FLA 2 (Con geotextil) | FLA 3 (con geotextil) |
| 0,30 m/h | 54 | 66 | No aplica |
| 0,40 m/h | No aplica | No aplica | 49 |

Los resultados presentados en la tabla 9 demuestran que el geotextil NT 1600 incide en las carreras de filtración de los FLA al igual que las velocidades de filtración empleadas. Según Sánchez et al. (2007), Galvis, Latorre y Visscher (1998) y Fernández et al. (2001) las velocidades de filtración sugeridas para la operación de estas unidades de filtración lenta en arena deben estar en un rango de 0,10-0,30 m/h y al emplear una velocidad mayor, como 0,40 m/h en el FLA 3 se evidencia un decremento en la carrera de aproximadamente un 9% respecto del FLA 1.

El periodo de funcionamiento del FLA 2 culminó 12 días después del FLA 1 (blanco) aumentando en un 22% la carrera de filtración. Al operar estos filtros a la misma velocidad de filtración, se evidencia que el uso del geotextil protege el lecho filtrante de una más rápida obstrucción, permitiendo la circulación de agua en el sistema por un periodo mayor de tiempo. Según Luiz Di Bernardo de la Escuela de Ingeniería de Sao Carlos (Universidad de Sao Paulo, Brasil), “para una misma cantidad de impurezas retenidas en los sistemas de FLA la tasa de crecimiento de pérdidas de carga es menor si se usa la manta sintética sobre la superficie de la arena; lo anterior ocurre porque la porosidad del geotextil sintético es mucho mayor a la del lecho de arena por lo que puede retener partículas sin generar su obstrucción”.

Por otra parte Fernández (2001) reporta que estudios previos (Graham and Mbwette, 1991, Mbwette, 1989) muestran que una manta con alta porosidad (=90%) no contribuye significativamente al desarrollo de la pérdida de carga, pero si puede presentar un volumen de vacíos lo suficientemente grande para almacenar una mayor cantidad de partículas antes de generar la obstrucción del medio. En la foto 3 se observa la formación de la capa biológica sobre el FLA 1 (blanco) y sobre uno de los geotextiles NT 1600 ubicado sobre la superficie de arena del FLA 2.

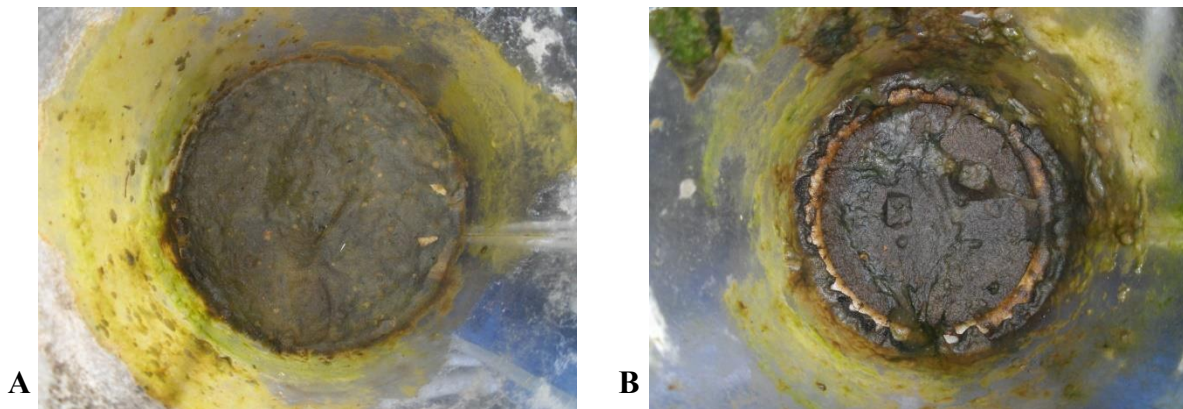


Foto 3. Capa biológica de los FLA. Foto A, formación de la capa biológica en el FLA 1 (blanco). Foto B, formación de la capa biológica en el FLA 2 (Sobre el geotextil).

El impacto del geotextil NT 1600 sobre la duración de carrera en los FLA se puede apreciar en la figura 9. El factor de aumento se reporta como la relación entre la duración de carrera de los filtros con geotextil y la duración de carrera del FLA sin geotextil. Los tiempos de colmatación de los sistemas de filtración son similares a los reportados por Graham, et al (1994), Di Bernardo et al (1994) según Fernández, et al (2001).

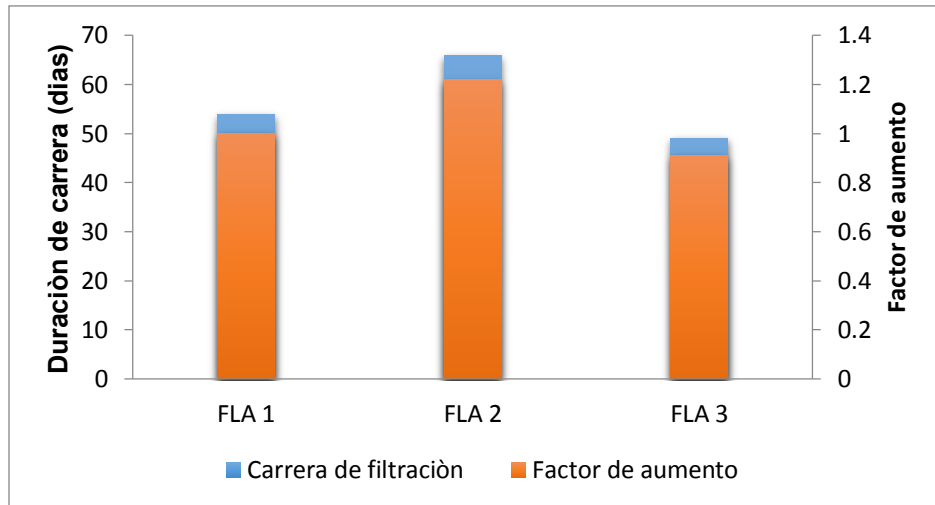


Figura 9. Duración de carrera y factor de aumento en los FLA, periodo de evaluación septiembre, noviembre de 2016.

El factor de aumento más alto fue 1,22, alcanzado por el FLA 2. Estos resultados son muy semejantes a los reportados por Fernández, et al (2001), utilizando geotextil NT 2000 sobre la superficie de arena del filtro lento, sin embargo cabe resaltar que las propiedades del geotextil NT 1600 son diferentes como se estipula en las tablas 3 y 5. Características de la manta sintética como el espesor y el área superficial específica parecen ser factores que pueden incidir notablemente en el periodo de colmatación del sistema, por lo anterior sería importante evaluar en futuras investigaciones la importancia de estas propiedades probando distintos tipos de geotextiles bajo las mismas condiciones en los FLA.

6.3 PRODUCCIÓN DE VOLUMEN TOTAL EFLUENTE DE LOS FLA

Uno de los objetivos fundamentales de esta investigación era evaluar la incidencia del aumento de la velocidad de filtración en un FLA con geotextil NT 1600 sobre la superficie del lecho de arena. Los resultados indicaron que al emplear mayores velocidades a las recomendadas (0,30 m/h), el periodo de colmatación del sistema disminuye. Sin embargo, al comparar los periodos de funcionamiento del FLA 1 (blanco) y el FLA 3, se calculó la producción de agua generada por cada filtro, la cual se presenta en la tabla 10. Se evidencia que aunque el FLA 1 funciona por un lapso mayor de tiempo respecto al FLA 3, este último produce 12,64% más volumen de agua tratada en su carrera de filtración, además el FLA 2 produce 18,80% más volumen de agua que el FLA 1.

Este resultado está indicando la importancia de usar una mayor velocidad de filtración y geotextiles sobre la superficie del lecho filtrante en la cantidad de agua producida. Particularmente en este caso la reducción de la duración de carrera alcanzada al implementar la velocidad de 0,4 m/h no generó un decremento del agua producida en

comparación con el FLA 1, que trabajo a una velocidad menor, pero sin geotextil. De otra parte el mayor incremento en la duración de carrera alcanzado por el FLA 3, utilizando una velocidad de filtración y geotextil sobre el lecho, permitió una mayor producción de agua, que incluso la producida con una mayor velocidad. En este sentido los resultados parecen indicar que el uso del geotextil en los filtros lentos va a generar una mayor producción de agua cuando son operados a la misma velocidad de filtración, pero que el uso de una velocidad de filtración mayor la puede reducir.

Tabla 10

Volúmenes totales de agua tratada producida por los FLA en los periodos de operación

| | FLA 1 | FLA 2 | FLA 3 |
|---|-------|-------|-------|
| Volumen de agua tratada producida (m ³) | 6,17 | 7,33 | 6,95 |
| Duración de carrera (días) | 54 | 66 | 49 |

6.4 EVALUACION DE LOS PORCENTAJES DE DESARROLLO DE LAS PÉRDIDAS DE CARGA DURANTE EL TIEMPO DE FUNCIONAMIENTO DE LOS FLA

En la figura 10 se presenta la relación del porcentaje de desarrollo de la pérdida de carga total del FLA 1, FLA 2 y FLA 3 en contraste con el porcentaje de tiempo total de funcionamiento empleado por cada sistema. En primer lugar la gráfica muestra que los datos no se encuentran dispersos entre si y su tendencia de tipo exponencial con un coeficiente de correlación R^2 de 0,8635. En segundo lugar la curva de pérdida de carga también permite apreciar que los filtros en general consumen el 50% de pérdida de carga total disponible en aproximadamente el 90% del tiempo que dura la carrera de filtración. Lo anterior quiere decir que entre 12 y 13 cm de perdida de carga se emplean alrededor de los 5 y 6 días finales del periodo de colmatación de los filtros. En consecuencia, se puede considerar la reducción de altura total disponible para perdida de carga de los filtros lentos en arena, sin mayores consecuencias en labores de operación y mantenimiento. Además la tecnología FiME resulta ser más sustentable al reducir costos de inversión inicial si se considera que los FLA son una de las unidades de mayor costo en la planta potabilizadora de agua.

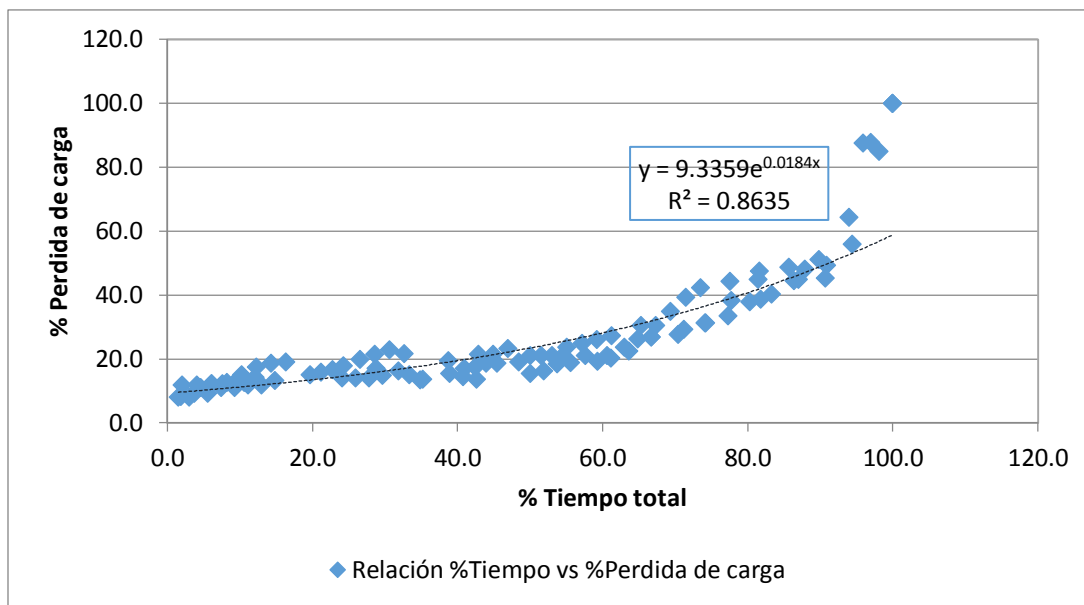


Figura 10. Relación porcentaje de pérdida carga en contraste con el porcentaje de tiempo total empleado.

6.5 EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS DE LOS FLA

En la tabla 11, se presentan los valores promedio, máximo, mínimo y desviación estándar de los parámetros evaluados tales como turbiedad, color aparente y materia orgánica (medida indirectamente mediante radiación UV-254 nm); tanto para el agua afluente y efluente de los tres FLA.

Durante la evaluación, el agua pretratada presentó niveles de turbiedad en un rango de calidad entre 1,02 y 6,03 UNT, con promedio de 2,01 UNT; niveles de color en un rango de calidad entre 6,0 y 57 UPC, con promedio de 24 UPC y niveles de materia orgánica (UV-254 nm) en un rango de 0,03 y 0,14, con promedio de 0,08. Se debe tener en cuenta que los anteriores parámetros fluctuaban en relación al clima, presentándose los valores más altos en días lluviosos. También es importante mencionar que el agua que abastece a los habitantes de esta zona rural es considerada no apta para su consumo directo.

Los valores alcanzados en turbiedad, en el efluente de los filtros evaluados, presentaron valores que cumplieron con la norma de calidad de agua potable de Colombia según la resolución 2115 de 2007. En el caso del parámetro de color aparente, se encontró que los efluentes cumplían con los valores establecidos por la norma en la mayoría de los muestreos; en aquellos días que se sobrepasaba la norma, se atribuye a un afluente más contaminado por las lluvias que se presentaban en el sector. En cuanto al parámetro UV-254 nm, el cual es un indicador de la presencia de materia orgánica, se observa un pequeño

descenso de su valor promedio en la salida de los FLA estudiados, indicando una baja remoción de este parámetro.

Tabla 11

Valores de los parámetros fisicoquímicos del afluente y efluente

| Parámetros | Agua tratada (Afluente) | FLA1 Velocidad (0,30 m/h) | FLA2 Velocidad (0,30 m/h) | FLA3 Velocidad (0,40 m/h) |
|------------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Turbiedad (UNT) | | | | |
| Promedio | 2,01 | 1,06 | 0,96 | 1,04 |
| Máximo | 6,03 | 2,04 | 1,84 | 1,74 |
| Mínimo | 1,02 | 0,49 | 0,42 | 0,56 |
| Desv. Est. | 1,07 | 0,44 | 0,38 | 0,41 |
| Nº total de datos | 28 | 22 | 28 | 20 |
| Color Aparente (UPC) | | | | |
| Promedio | 24,00 | 19,91 | 18,35 | 18,25 |
| Máximo | 57,00 | 41,00 | 40,00 | 42,00 |
| Mínimo | 6,00 | 5,00 | 7,00 | 8,00 |
| Desv. Est | 12,74 | 10,68 | 9,47 | 10,14 |
| Nº total de datos | 28 | 22 | 26 | 20 |
| Materia Orgánica (UV 254nm) | | | | |
| Promedio | 0,08 | 0,07 | 0,07 | 0,06 |
| Máximo | 0,14 | 0,14 | 0,14 | 0,14 |
| Mínimo | 0,03 | 0,02 | 0,03 | 0,02 |
| Desv. Est | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 |
| Nº total de datos | 28 | 22 | 26 | 20 |

Así mismo, las eficiencias de remoción promedio alcanzadas por cada sistema FLA en cuanto a los parámetros fisicoquímicos evaluados, se presentan en formato resumen en la tabla 12. También se anexan en la tabla 3.2 (Anexo 3) todos los datos de remoción obtenidos para el presente trabajo.

Tabla 12*Eficiencias de remoción promedio para los parámetros fisicoquímicos evaluados*

| Parámetros | FLA1 Velocidad (0,30 m/h) | FLA2 Velocidad (0,30 m/h) | FLA3 Velocidad (0,40 m/h) |
|---|--|--|--|
| % Remoción de Turbiedad | 45,11 | 47,76 | 44,29 |
| % Remoción máx. | 69,20 | 84,91 | 80,27 |
| % Remoción mín. | 4,83 | 6,21 | 5,52 |
| Desv. Est. | 16,54 | 18,87 | 20,90 |
| Nº total de datos | 22 | 28 | 20 |
| % Remoción de Color Aparente | 22,92 | 27,55 | 26,62 |
| % Remoción máx. | 52,94 | 68,97 | 52,94 |
| % Remoción mín. | 4,88 | 3,85 | 2,44 |
| Desv. Est | 13,87 | 14,81 | 12,87 |
| Nº total de datos | 22 | 26 | 20 |
| % Remoción de Materia Orgánica | 13,35 | 14,01 | 16,361 |
| % Remoción máx. | 41,18 | 29,73 | 44,928 |
| % Remoción mín. | -2,27 | -1,14 | -2,326 |
| Desvest | 12,60 | 8,75 | 12,351 |
| Nº total de datos | 22 | 26 | 20 |

A continuación se presenta el análisis individual para cada parámetro de calidad evaluado en términos de porcentaje y unidades, en cuanto a la remoción alcanzada por cada sistema FLA; así como también las consideraciones finales de forma global, para analizar de manera sintetizada la incidencia de la aplicación de geotextil NT 1600 en los FLA 2 y FLA 3, comparados con el blanco (FLA 1) y el aumento de las velocidades en la calidad del efluente.

6.5.1 EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE TURBIEDAD

Estudios realizados por Fernández et al (2001) y Jaramillo (2013) usando geotextiles sintéticos reportan remociones promedio de turbiedad entre 60 y 80% respectivamente, lo cual indica que la implementación del geotextil NT 1600, bajo las condiciones de operación que se presentaron durante la investigación no generan grandes impactos en el mejoramiento de la calidad del agua efluente.

En la tabla 12 se puede apreciar que el FLA 2 obtuvo el mayor porcentaje promedio de remoción en el parámetro fisicoquímico de turbiedad respecto de las otras columnas de

filtración, lo cual está asociado a la implementación del geotextil NT 1600 y al uso de la velocidad de filtración recomendada para los FLA.

Al realizar un análisis de varianza para comparar las eficiencias alcanzadas por las tres unidades en estudio, se estableció que no existe una diferencia estadísticamente significativa ($P=0,7951$) entre la media del % Remoción de Turbiedad entre un FLA y otro, con un nivel del 95,0% de confianza. (Anexo 4, tabla 4.1.2).

Como se observa en la figura 11, los tres sistemas presentan asimetría en la distribución de los datos, al no estar la mediana en el centro. En este sentido, La tendencia de la mediana en los tres filtros se comporta hacia la derecha, indicando que el 50% de los datos obtenidos están por encima de la media, presentando un comportamiento homogéneo.

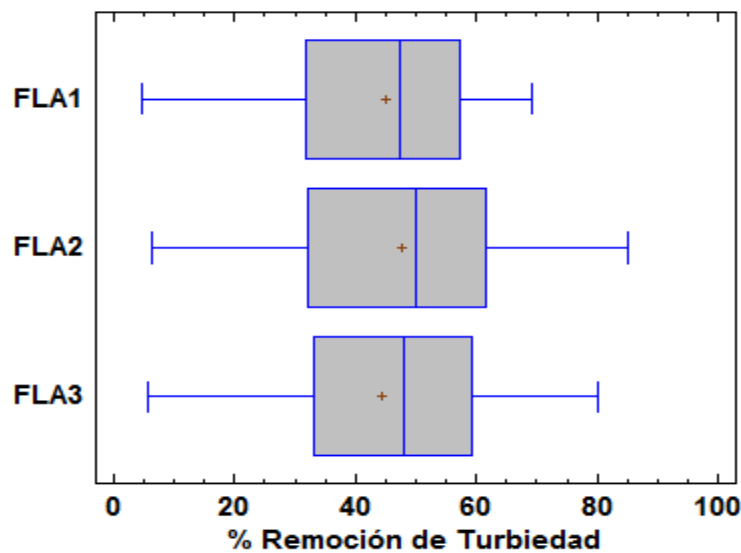


Figura 11. Dispersión de los datos de remoción de turbiedad para cada sistema FLA.

Si bien el análisis estadístico indica que cualquiera de las opciones evaluadas genera eficiencias de remoción de turbiedad similares y que por lo tanto no hay un gran impacto si se varía en los sistemas las velocidades de filtración o la implementación de geotextil, parece más importante considerar la duración de la carrera de filtración a la hora de seleccionar el sistema más apropiado. En ese sentido, el FLA 3 el cual funcionó con la velocidad de filtración más alta, finalizó su carrera de filtración en el menor tiempo (49 días) en comparación a los otros dos sistemas. De esta forma, en los FLA 1 y FLA 2, a pesar de que la velocidad de filtración aplicada fue la misma, difiriendo en la implementación del geotextil NT; la duración de carrera de filtración fue mayor para el FLA 2 (66 días), seguido del FLA 1 (54 días). A pesar que la implementación del geotextil NT influyó en el aumento de la carrera de filtración, este factor no incidió en una mejora significativa en cuanto a la remoción de turbiedad.

Por otra parte, al comparar el desempeño del FLA 1 y el FLA 2, para los cuales se aplicó la misma velocidad, pero en este caso, el segundo filtro con la implementación del geotextil; cabe resaltar que la introducción del mismo, influyó en una mejora promedio en la remoción de turbiedad; 2,65% de este con respecto al primero, aunque no es una diferencia significativa de acuerdo al análisis estadístico. En concordancia a lo anterior, De Souza (2015), explica que la obstrucción del filtro debido a la saturación del medio filtrante se produce de forma más acelerada en el filtro lento en arena en comparación al implementado con geotextil, gracias a la alta porosidad de este material. En el mismo sentido, en el FLA 3 (con implementación de geotextil NT), se obtiene un efluente con condiciones de turbiedad (1,04UNT) aceptables, a pesar de presentar la carrera de filtración más corta y tampoco existe una diferencia estadísticamente significativa en comparación a los otros dos sistemas. Así pues, Los resultados obtenidos en el presente trabajo coinciden con los obtenidos por De Souza (2015), quien realizó una comparación entre los medios filtrantes arena y geotextil NT en la eficiencia de la filtración lenta en arena; los resultados obtenidos son similares para remoción de turbiedad tanto en los filtros de arena como en los de geotextil NT, evaluados a tasas de 6 y 9 m³/m²-día, con un nivel de significancia del 5%. Por tanto se podría inferir que la tasa de filtración o velocidad poco interfiere en la actuación de los mecanismos de remoción de turbiedad independientemente del medio filtrante utilizado.

En concordancia, Pereira, Medri, Sánchez y Rosa (2013), reportan que la ubicación de los geotextiles NT en los filtros lentos en arena, no evidenciaron ventajas en cuanto a la remoción de turbiedad.

6.5.2 EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE COLOR APARENTE

Estudios realizados por Fernández et al. (2001) mostraron eficiencias de remociones en color aparente entre del orden del 55% en filtros lentos que usaron geotextiles sintéticos con velocidades de filtración de 0,15 m/h. Estos resultados contrastan con los obtenidos en la presente investigación cuyos porcentajes de remoción estuvieron en el rango de 22,9 a 27,5% (ver tabla 12). Está menor remoción alcanzada en presente estudio puede ser explicada por el uso de una velocidad de filtración mucho mayor, hasta 2,6 más que la alcanzada por Fernandez et al. (2001).

En la figura 12, se puede notar que la mediana tiende hacia la derecha en el FLA 1, contrario al comportamiento en el FLA 2, donde esta tiende hacia la izquierda. Es decir que para el blanco la mayor parte de los datos se encuentran por encima de la media, mientras que para el FLA 3 los datos en su mayoría se ubican por debajo. Pasando al FLA 2, se encuentra que la media coincide con la mediana, indicando que para este sistema los datos de porcentajes de remoción son simétricos. No obstante, es notoria la presencia de un dato atípico para dicho filtro. Razón que podría ser explicada con el hecho de que para el

desarrollo del presente trabajo de investigación no se tuvo en cuenta el análisis por separado para las dos estaciones del año (periodos secos y de lluvia), y en los meses de muestreo la variabilidad del tiempo fue bastante alta, pues se presentaban días muy soleados y a la vez días con fuertes precipitaciones; días en los cuales se presentaron picos en algunos valores de las características físicas del agua pretratada.

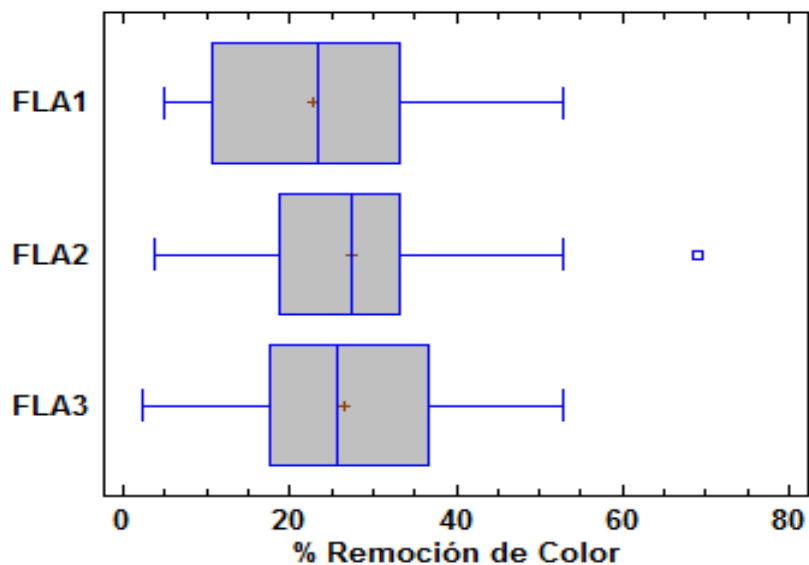


Figura 12. Dispersión de los datos de remoción de color aparente para cada sistema FLA.

Al realizar el análisis estadístico comparativo de ANOVA con las eficiencias de remoción alcanzadas por cada filtro se indicó que no existen diferencias significativas ($P=0,49$), con un nivel del 95,0% de confianza. Lo cual indica que la presencia de geotextil NT no influyó en la calidad del efluente en cuanto a la remoción de color, ni que las velocidades de filtración evaluadas tuvieron influencia sobre la eficiencia del filtro.

Investigaciones realizadas por Pereira et al. (2013) indican que la presencia o ausencia del geotextil no indican diferencias que favorezcan la eficiencia del sistema de tratamiento en cuanto a la remoción de color. También Fenga Ferraz (2002), advierte en su trabajo investigativo que en cuanto a este parámetro, los efluentes presentaron calidades semejantes para tasas de $6\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{día}$ y $9\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{día}$ es decir 0,25 y 0,38 m/h respectivamente, independientemente del uso de geotextil.

6.5.3 EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA

Como lo señala Jaramillo (2013), la evaluación en cuanto a la remoción de materia orgánica en FLA con aplicación de geotextil, ha sido poco estudiada por lo que las comparaciones son incipientes al usar métodos de medición distintos. Así, en su investigación encontró una remoción de materia orgánica como COT del 54,1%. Paralelamente cita otros autores como Naranjo (2009), cuya investigación fundamentada en FiME encontró eficiencias de remoción de MO de hasta el 50%, medida como DQO.

Los datos obtenidos en porcentaje de remoción de materia orgánica en la presente investigación, como se estipulan en la tabla 12, indican claramente que son bajos porcentajes de remoción. El FLA 3 fue quien removió con mayor eficiencia el parámetro fisicoquímico de materia orgánica, aunque este filtro opero con una mayor tasa de filtración. Si bien los sistemas con aplicación de geotextil NT 1600 (FLA2 y FLA3) presentaron los mejores resultados en comparación al blanco (FLA 1); no existieron diferencias estadísticamente significativas ($P=0,7652$) entre los tres sistemas. (Anexo 4 – tabla 4.3.1). Es importante tener en cuenta que se presentaron valores negativos de remoción de materia orgánica debido al crecimiento de material orgánico al interior de los filtros, afectante el agua efluente tratada por los sistemas potabilizadores. Estudios realizados por Jaramillo (2013), demuestran que el crecimiento de este material orgánico se puede evitar cubriendo los filtros con un material que impida el paso de los rayos de luz solar a través de las columnas de filtración lenta en arena.

La distribución de los datos de remoción de materia orgánica es asimétrica en los tres sistemas, tal como se muestra en la figura 13; tanto para el FLA 1 como para el FLA 2 el 50% de los datos se encuentra por debajo de la media, contrario a lo que pasa en el FLA 2, el cual a pesar de presentar la remoción más alta en este caso, también evidencia un dato por debajo de los valores normales positivos, lo cual podría ser explicado a causa de una posible interferencia en el equipo utilizado.

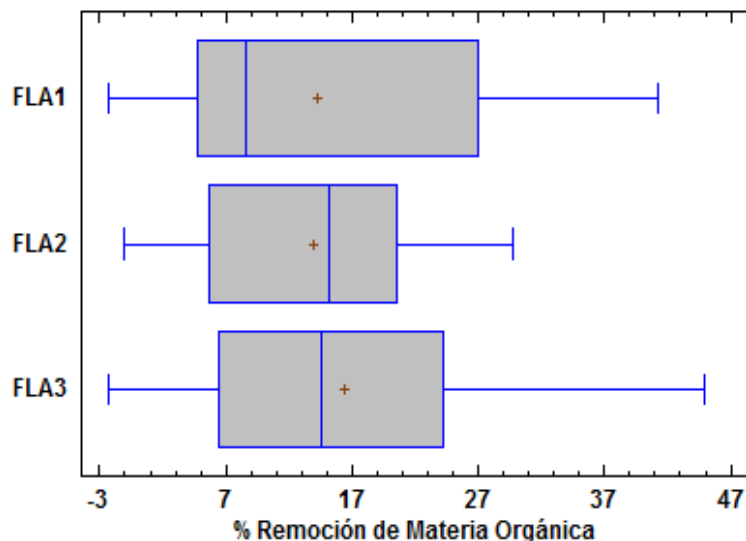


Figura 13. Dispersión de los datos de remoción de materia orgánica para cada sistema FLA

6.5.4 VARIABILIDAD EN EL PH Y LA TEMPERATURA

Los parámetros fisicoquímicos tales como el pH y la temperatura no variaron de forma significativa, de manera que incidiera en la calidad de los parámetros anteriormente evaluados. Por consiguiente, como se presenta en la tabla 13, el rango del pH para los efluentes de los sistemas de filtración se mantuvo entre 7,01 y 8,1UpH, y la temperatura entre 19 y 24,7°C. Igualmente se indican los promedios correspondientes a cada FLA, indicando la homogeneidad en los datos. Así que, al ser solo medidas de control en la fase de muestreo, no se presentan de forma integrada, pero la totalidad de los datos relacionados con estos parámetros; obtenidos en los ensayos, se muestran en el anexo 3 (tabla 3.1)

Tabla 13

Datos de pH y temperatura

| | | Agua pretratada | FLA1 | FLA2 | FLA3 |
|-------------------------|----------|-----------------|-------|-------|-------|
| pH (UpH) | Promedio | 7,54 | 7,48 | 7,57 | 7,49 |
| | Max. | 8,08 | 8,04 | 8,1 | 7,91 |
| | Min. | 7,17 | 7,05 | 7,12 | 7,01 |
| | Desvest. | 0,25 | 0,26 | 0,26 | 0,22 |
| Temperatura (°C) | Promedio | 21,48 | 21,56 | 21,31 | 21,90 |
| | Max. | 24,4 | 24,1 | 24,2 | 24,7 |
| | Min. | 19,5 | 19 | 19,2 | 20,2 |
| | Desvest. | 1,12 | 1,26 | 1,21 | 1,12 |

6.5.5 CONSIDERACIONES FINALES

El desempeño de los tres sistemas de filtración en cuanto a los porcentajes de remoción en los parámetros fisicoquímicos evaluados fue similar, por lo cual no existieron diferencias estadísticamente significativas. De acuerdo a lo anterior, se infiere que el uso de geotextil NT 1600 no incide en los mecanismos de remoción de estos parámetros, de manera que no afecta la calidad del efluente. De modo similar, De Souza (2015) concluye que el desempeño de remoción de color aparente fue semejante al desempeño de remoción de turbiedad, por ende, tanto la utilización de una capa de geotextil sobre la arena, como el uso exclusivo de geotextil como medio filtrante, posibilitan que los mecanismos de remoción de color y turbiedad tengan una actuación semejante a la actuación que desempeña el medio filtrante de arena.

Así mismo, las velocidades de filtración tuvieron poca influencia en la remoción de estos parámetros, independientemente de la implementación o no de geotextil NT 1600. En concordancia, De Souza (2015), cita a Paterniani (1991), Staciarini (1998) e Ferraz e Paterniani (2002), quienes verificaron que no existe diferencia significativa entre la actuación de las velocidades de filtración en la remoción de impurezas del agua, o sea que la velocidad de filtración adoptada no tuvo influencia en la calidad del agua tratada.

En cuanto a los periodos de carrera de filtración de los FLA, se debe destacar que la implementación del geotextil NT 1600 permitió alargar la duración de funcionamiento de uno de los sistemas evaluados en contraste con el filtro blanco. Respecto a la columna de FLA que funciona con una mayor velocidad de filtración, se debe resaltar que generó una alta producción en volumen de agua a pesar de ser la primera en culminar su carrera de filtración.

Si bien el uso de los geotextiles NT sobre la superficie de arena de los FLA y la utilización de velocidades más altas no presentó efectos significativos desde el punto de vista de calidad de agua, los resultados indican que su uso genera condiciones positivas en la duración de carrera de los FLA y en el volumen de agua producido, generando además posibles beneficios referentes a los costos de infraestructura de estas unidades de potabilización.

7. CONCLUSIONES

La investigación muestra que la implementación de geotextil sintético no tejido como el NT1600 en los FLA permite extender las carreras de filtración hasta en un 22% en contraste con un filtro lento sin manta; además permite suponer que al emplear velocidades de filtración superiores a 0,30 m/h (FLA 3) no se afecta significativamente el periodo de funcionamiento de los filtros, lo cual posibilita la generación de mayor volumen de agua tratada por filtros lentos en arena con el geotextil en comparación al filtro blanco (FLA 1).

El estudio también señala que se presenta trasvase de lodos a pesar de aplicar la manta sintética sobre la superficie de la arena, al encontrar que la mayor concentración de pérdida de carga estaba en esta capa de lecho filtrante de arena.

Por otro lado, la implementación del geotextil NT 1600 sobre el lecho de arena no influyó en la calidad del agua efluente, así como tampoco tuvo efecto sobre esta condición el aumento de las velocidades de filtración

Los resultados mencionados al usar el geotextil NT 1600 sobre el desarrollo de pérdida de carga y la calidad fisicoquímica del agua tratada, indican que es posible reducir costos de inversión inicial de los filtros disminuyendo la altura total del filtro e incrementando las velocidades de filtración, lo cual puede generar impactos significativos en inversiones iniciales que involucren este tipo de tecnologías. Adicionalmente, se puede pensar en optimizar unidades en servicio de filtración lenta en arena, que hayan llegado al final de su periodo de diseño usando la manta sintética y sin necesidad de reconstruir la infraestructura del FLA.

8. RECOMENDACIONES

Evaluar características de los geotextiles como el espesor y porosidad en función de la duración de carrera.

Evaluar el impacto de la altura de lecho filtrante y el espesor del geotextil en la remoción fisicoquímica y microbiológica del filtro lento.

Estudiar la implementación del geotextil sobre la superficie del filtro lento, particularmente para áreas de filtración que superen los 3.0 m².

Estudiar el lavado de los geotextiles usado en los filtros lentos en función de la recuperación de la pérdida de carga.

BIBLIOGRAFÍA

- Ávila Jiménez, C. (24 de Marzo de 2015). ¿Cómo es el avance en la cobertura de acueducto en Colombia? *El Tiempo*.
- APHA, A. (1998). WEF Los métodos estándar para el examen de agua y aguas residuales
- Bueno Zabala, K. A., & Quiñonez Torres, A. (2010). *Uso de Geotextiles Sintéticos NT para el Control de la Contaminación Generada por Sólidos Suspendidos en la Cría de Trucha*. Santiago de Cali: (Tesis de pregrado): Universidad del Valle.
- Cinara. (30 de Marzo de 2001). *Abatecimiento de Agua*. Recuperado el 22 de Julio de 2016, de Sitio web de Cinara: <http://cinara.univalle.edu.co/index.php/abastecimiento-de-agua>
- Defensoría del Pueblo. (2006). *Diagnóstico sobre la calidad del agua para el consumo humano en Colombia, en el marco del derecho humano al agua*. Bogotá: Informe defensorial No. 39 - B.
- De Souza Dos Santos, F.F. (2015). *Comparação entre os meios filtrantes areia e nãotecido sintético na eficiência da filtração lenta para tratamento de agua*. (Tesis doctoral). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil.
- DNP. (3 de Julio de 2014). *POLÍTICA PARA EL SUMINISTRO DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO*. Recuperado el 9 de Octubre de 2016, de Sitio web de Departamento Nacional de Planeación: <http://www.minvivienda.gov.co/conpesagua/3810%20-%202014.pdf>
- FCAS fondo de Cooperación para Agua y Saneamiento. (3 de Junio de 2016). Obtenido de <http://www.fondodelagua.aecid.es/es/fcas/donde-trabaja/paises/colombia.html>
- Fenga Ferraz, C., Stipp Paterniani, J.E. (2002). Redução da espessura da camada suporte através da substituição por mantas não-tecidas na filtração lenta de águas de abastecimento. *Engenharia sanitária e ambiental*, 7(1), 8-15.
- Fernández M., J., Latorre M., J., Berón C., F., Muñoz, N., & Vargas, V. (año 2001). Uso de mantas sintéticas y naturales en filtración lenta en arena. Una experiencia en ambientes tropicales. *Cinara. Universidad del Valle*, 2-9.
- Fernández M., J., Sanchez T., A., Latorre M., J., Muñoz S., N., Berón C., F., & Restrepo, M. (2001). *Uso de Fibras Naturales y Sintéticas en filtración Lenta en Colombia*. Cali, Colombia.: Universidad del Valle. Cinara.

- Galvis Castaño, G., Latorre Montero, J., & Visscher, J. (1999). *Filtración en múltiples etapas. Tecnología innovativa para el tratamiento de agua*. Cali, Colombia: Cinara. Universidad del Valle.
- Geosoluciones SAS. (26 de Noviembre de 2016). *GSI*. Obtenido de <http://www.geomembranas.com.co/wp-content/uploads/2012/06/Geotextil-NT-1600.pdf>
- Guzmán, B., Nava, G., Mejía, A., & Soler, J. (15 de Noviembre de 2014). *Estado de la Vigilancia de la calidad del Agua para consumo Humano en Colombia - 2013*. Recuperado el 20 de Junio de 2016, de Sitio web SIVICAP: http://www.ins.gov.co/sivicap/Normatividad/2014%20Estado%20de%20la%20vigilancia%20de%20la%20calidad%20del%20agua%202013.pdf?Mobile=1&Source=%2F%2Fsivicap%2F_layouts%2Fmobile%2Fview.aspx%3FList%3Ddc462e4b-5de8-4a2f-be3a-08ad1c837db7%26View%3D0ac5f5c5-4988-442
- Instituto Nacional de Salud. (2014). *Estado de la Vigilancia de la Calidad del Agua para Consumo Humano*. Bogotá, D.C., Colombia.
- Jaramillo Sanín, M. (2013). *Evaluación de una manta sintética no tejida en un sistema piloto de filtración lenta para el tratamiento del agua*. Tesis de Ingeniería Ambiental. Universidad de Medellín. Medellín.
- Ministerio de Protección Social, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (4 de julio del 2007). *Resolución 2115 del 2007*. DO: 46.679.
- MinSalud. (15 de Diciembre de 2014). *Ministerio de Salud y Protección Social*. Recuperado el 9 de Octubre de 2016, de Informe nacional de la calidad del agua para consumo humano año 2014 con base en el IRCA: <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/VS/PP/SA/informe-nacional-de-la-calidad-del-agua-para-consumo-humano-ano-2013-con-base-en-el-irca.pdf>
- National Environmental Services Center. (2009). *Filtración Lenta con Arena*. Morgantown: West Virginia University.
- OMS. (Junio de 2015). *Organización Mundial de la Salud*. Recuperado el 25 de Septiembre de 2016, de Sitio web de OMS: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs391/es/>
- PAVCO. (2008). Mexichem. Recuperado de <https://pavco.com.co/2/geotextiles/5-1212-1227/i/1227>

- Peña P., W. A., Escobar H., I. D., & Fernández M., J. E. (2010). Determinación de la viabilidad en uso de geotextil no tejido como medio filtrante, en flujo horizontal, para la remoción de sólidos suspendidos, materia orgánica y nutriente en efluentes de piscifactorías de trucha. *Journal de Ciencia e Ingeniería*, 33-41.
- Pereira Tangerino, Edson; Medri Borges, Rívea; Sánchez Ortiz, Iván Andrés; Rosa Araujo, Laryssa Melo; (2013). Evaluación del desempeño de filtración en múltiples etapas usando carbón activado granular y mantas sintéticas no tejidas. *Interciencia*, Octubre, 726-732.
- Sánchez, L. D., Sánchez, A., Galvis, G., & Latorre, J. (2007). *Filtración en Múltiples Etapas*. Cali, Colombia: Universidad del Valle. Cinara.
- OMS. (Junio de 2015). *Organización Mundial de la Salud*. Recuperado el 25 de Septiembre de 2016, de Sitio web de OMS: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs391/es/>
- UNESCO. (2016). *Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura*. Recuperado el 25 de Julio de 2016, de Sitio web de UNESCO: <http://unesdoc.unesco.org/images/0024/002441/244103s.pdf>
- Useche Melo, C. (2012). *Agua y saneamiento rural. Oportunidades para participación comunitaria en Colombia*. Bogotá D.C., Colombia: Banco Interamericano de Desarrollo

ANEXOS

Anexo 1 Datos de pérdida de carga de los sistemas de filtración lenta en arena medidos en el periodo septiembre-noviembre del 2016

Tabla 1.1 Reporte de pérdidas de carga de los FLA hasta el final de su carrera de filtración.

| FECHA | HORA | DÍA | FILTRO 1 (Blanco) | | | FILTRO 2 (Con Geotextil NT 1600) | | | | | FILTRO 3 (Con Geotextil NT 1600) | | | | |
|---------|-------------|-----|-------------------|----------|----------|----------------------------------|---------|---------|----------|----------|----------------------------------|---------|---------|----------|----------|
| | | | HF Are | HF Total | HF Grava | HF Geo. | HF Acu. | HF Are. | HF Total | HF Grava | HF Geo. | HF Acu. | HF Are. | HF Total | HF Grava |
| 8-sept | 4:00 p. m. | 1 | 1,6 | 1,9 | 0,3 | 0 | 1,8 | 1,8 | 2 | 0,2 | 0 | 2,5 | 2,5 | 3 | 0,5 |
| 9-sept | 10:30 a. m. | 2 | 2,1 | 2,1 | 0 | 0 | 2 | 2 | 2 | 0 | 0 | 3 | 3 | 3 | 0 |
| 10-sept | 12:00 p. m. | 3 | 2,1 | 2,1 | 0 | 0 | 2,7 | 2,7 | 2,7 | 0 | 0 | 2,9 | 2,9 | 3,1 | 0,2 |
| 11-sept | 3:00 p. m. | 4 | 2,5 | 2,5 | 0 | 0 | 3 | 3 | 3 | 0 | 0 | 3 | 3 | 3,2 | 0,2 |
| 12-sept | 1:30 p. m. | 5 | 2,5 | 2,5 | 0 | 0 | 3 | 3 | 3 | 0 | 0,2 | 3,5 | 3,3 | 3,8 | 0,3 |
| 13-sept | 3:30 p. m. | 6 | 2,7 | 2,7 | 0 | 0 | 3 | 3 | 3 | 0 | 0,3 | 4 | 3,7 | 4,4 | 0,4 |
| 14-sept | 2:30 p. m. | 7 | 2,7 | 2,7 | 0 | 0 | 3,1 | 3,1 | 3,1 | 0 | 0,8 | 4,4 | 3,6 | 4,7 | 0,3 |
| 15-sept | 3:30 p. m. | 8 | 3 | 3 | 0 | 0 | 3,5 | 3,5 | 3,5 | 0 | 0,2 | 4,4 | 4,2 | 4,8 | 0,4 |
| 20-sept | 12:00 p. m. | 13 | 3 | 3,2 | 0,2 | 0 | 3,7 | 3,7 | 3,7 | 0 | 0 | 4,8 | 4,8 | 5 | 0,2 |
| 21-sept | 10:15 a. m. | 14 | 3 | 3,2 | 0,2 | 0 | 3,9 | 3,9 | 3,9 | 0 | 0 | 5,2 | 5,2 | 5,4 | 0,2 |
| 22-sept | 12:00 p. m. | 15 | 3 | 3,2 | 0,2 | 0 | 4,1 | 4,1 | 4,1 | 0 | 0 | 5,5 | 5,5 | 5,8 | 0,3 |
| 23-sept | 11:30 a. m. | 16 | 3,3 | 3,4 | 0,1 | 0 | 4,4 | 4,4 | 4,4 | 0 | 0,2 | 5,3 | 5,1 | 5,5 | 0,2 |
| 26-sept | 3:00 p. m. | 19 | 3 | 3,1 | 0,1 | 0 | 4,1 | 4,1 | 4,2 | 0,1 | 0 | 4,6 | 4,6 | 4,9 | 0,3 |
| 28-sept | 12:00 p. m. | 21 | 3,5 | 3,5 | 0 | 0 | 4 | 4 | 4 | 0 | 0 | 5,1 | 5,1 | 5,4 | 0,3 |
| 29-sept | 3:00 p. m. | 22 | 3,1 | 3,3 | 0,2 | 0 | 3,7 | 3,7 | 3,7 | 0 | 0 | 5,1 | 5,1 | 5,4 | 0,3 |
| 30-sept | 10:00 a. m. | 23 | 3,1 | 3,1 | 0 | 0 | 3,3 | 3,3 | 3,3 | 0 | 0 | 5,7 | 5,7 | 5,9 | 0,2 |
| 4-oct | 3:00 p. m. | 27 | 3,5 | 3,5 | 0 | 0 | 4,2 | 4,2 | 4,2 | 0 | 0 | 5,8 | 5,8 | 6 | 0,2 |
| 5-oct | 10:00 a. m. | 28 | 3,7 | 3,7 | 0 | 0 | 4,3 | 4,3 | 4,3 | 0 | 0 | 6 | 6 | 6,3 | 0,3 |
| 6-oct | 12:00 p. m. | 29 | 4 | 4,2 | 0,2 | 0 | 4,6 | 4,6 | 4,6 | 0 | 0,3 | 6,5 | 6,2 | 6,6 | 0,1 |
| 7-oct | 10:30 a. m. | 30 | 4,2 | 4,3 | 0,1 | 0 | 4,6 | 4,6 | 4,6 | 0 | 0,2 | 6,8 | 6,6 | 6,9 | 0,1 |
| 9-oct | 12:30 p. m. | 32 | 4,4 | 4,4 | 0 | 0 | 4,6 | 4,6 | 4,7 | 0,1 | 0,4 | 7,6 | 7,2 | 7,7 | 0,1 |
| 10-oct | 2:00 p. m. | 33 | 4,6 | 4,6 | 0 | 0,3 | 5,1 | 4,8 | 5,2 | 0,1 | 0,5 | 7,6 | 7,1 | 7,7 | 0,1 |
| 11-oct | 2:00 p. m. | 34 | 5,3 | 5,4 | 0,1 | 0,3 | 5,1 | 4,8 | 5,2 | 0,1 | 0,9 | 8,7 | 7,8 | 8,8 | 0,1 |
| 12-oct | 10:00 a. m. | 35 | 5,9 | 6 | 0,1 | 0,2 | 5,2 | 5 | 5,2 | 0 | 1,2 | 9,7 | 8,5 | 9,9 | 0,2 |
| 13-oct | 2:00 p. m. | 36 | 6 | 6,1 | 0,1 | 0,2 | 5,2 | 5 | 5,2 | 0 | 2,3 | 10,5 | 8,2 | 10,7 | 0,2 |
| 15-oct | 12:00 p. m. | 38 | 6,2 | 6,3 | 0,1 | 0,2 | 5,2 | 5 | 5,2 | 0 | 2,3 | 10,8 | 8,5 | 11,2 | 0,4 |
| 17-oct | 3:00 p. m. | 40 | 6,9 | 7,1 | 0,2 | 0,2 | 5,2 | 5 | 5,2 | 0 | 2 | 11,8 | 9,8 | 12 | 0,2 |
| 19-oct | 10:00 a. m. | 42 | 8,5 | 8,7 | 0,2 | 0,2 | 5,4 | 5,2 | 5,5 | 0,1 | 2,5 | 12 | 9,5 | 12,3 | 0,3 |
| 21-oct | 3:15 p. m. | 44 | 10,1 | 10,2 | 0,1 | 0,3 | 6,5 | 6,2 | 6,6 | 0,1 | 2,5 | 12,6 | 10,1 | 12,9 | 0,3 |
| 24-oct | 11:00 a. m. | 47 | 10,1 | 10,2 | 0,1 | 0,5 | 7,2 | 6,7 | 7,2 | 0 | 5,3 | 21,8 | 16,5 | 22,1 | 0,3 |
| 26-oct | 11:15 a. m. | 49 | 10,2 | 10,3 | 0,1 | 1 | 7,7 | 6,7 | 7,7 | 0 | 8,2 | 25 | 16,8 | 25,2 | 0,2 |
| 28-oct | 10:30 a. m. | 51 | 12,5 | 12,7 | 0,2 | 1 | 8,1 | 7,1 | 8,2 | 0,1 | | | | | |
| 30-oct | 2:00 p. m. | 53 | 19,1 | 19,3 | 0,2 | 1,2 | 9,2 | 8 | 9,3 | 0,1 | | | | | |
| 31-oct | 3:00 p. m. | 54 | 22,5 | 22,7 | 0,2 | 1,5 | 9,4 | 7,9 | 9,5 | 0,1 | | | | | |
| 1-nov | 4:00 p. m. | 55 | | | | 1,6 | 9,8 | 8,2 | 9,9 | 0,1 | | | | | |
| 3-nov | 3:00 p. m. | 57 | | | | 1,7 | 10,8 | 9,1 | 10,9 | 0,1 | | | | | |
| 4-nov | 2:00 p. m. | 58 | | | | 1,7 | 11,7 | 10 | 11,8 | 0,1 | | | | | |
| 6-nov | 4:00 p. m. | 60 | | | | 1,7 | 12 | 10,3 | 12,1 | 0,1 | | | | | |
| 8-nov | 2:00 p. m. | 62 | | | | 1,8 | 15,7 | 13,9 | 15,8 | 0,1 | | | | | |
| 10-nov | 2:30 p. m. | 64 | | | | 4,2 | 21,3 | 17,1 | 21,5 | 0,2 | | | | | |
| 12-nov | 5:00 p. m. | 66 | | | | 7,5 | 24,2 | 16,7 | 24,5 | 0,3 | | | | | |

Anexo 2. Reporte de volumen de agua tratada efluente de cada FLA por día.

Tabla 2.2. Volumen total producido por cada FLA en su respectiva carrera de filtración.

| FECHA | HORA | DIA | Filtro 1 V/d (L) | Filtro 2 V/d (L) | Filtro 3 V/d (L) |
|--------------|-------------|------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 08/09/2016 | 4:00 p. m. | 1 | 97,92 | 95,04 | 141,12 |
| 09/09/2016 | 10:30 a. m. | 2 | 112,32 | 86,4 | 141,12 |
| 10/09/2016 | 12:00 p. m. | 3 | 109,44 | 92,16 | 135,36 |
| 11/09/2016 | 4:00 p. m. | 4 | 115,2 | 106,56 | 129,6 |
| 12/09/2016 | 1:30 p. m. | 5 | 115,2 | 100,8 | 152,64 |
| 13/09/2016 | 3:30 p. m. | 6 | 115,2 | 72 | 144 |
| 14/09/2016 | 2:30 p. m. | 7 | 112,32 | 97,92 | 132,48 |
| 15/09/2016 | 3:30 p. m. | 8 | 112,32 | 100,8 | 132,48 |
| 16/09/2016 | 2:00 p. m. | 9 | 115,2 | 112,32 | 135,36 |
| 17/09/2016 | 4:00 p. m. | 10 | 115,2 | 115,2 | 135,36 |
| 18/09/2016 | 1:00 p. m. | 11 | 123,84 | 112,32 | 141,12 |
| 20/09/2016 | 12:00 a. m. | 13 | 118,08 | 115,2 | 146,88 |
| 21/09/2016 | 12:00 a. m. | 14 | 115,2 | 118,08 | 144 |
| 22/09/2016 | 12:00 a. m. | 15 | 126,72 | 115,2 | 132,48 |
| 23/09/2016 | 12:00 a. m. | 16 | 115,2 | 118,08 | 129,6 |
| 26/09/2016 | 12:00 a. m. | 19 | 103,68 | 118,08 | 123,84 |
| 27/09/2016 | 3:00 p. m. | 20 | 106,56 | 115,2 | 141,12 |
| 28/09/2016 | 12:00 p. m. | 21 | 129,6 | 115,2 | 135,36 |
| 29/09/2016 | 3:00 p. m. | 22 | 115,2 | 112,32 | 141,12 |
| 30/09/2016 | 10:00 a. m. | 23 | 106,56 | 97,92 | 152,64 |
| 01/10/2016 | 10:00 a. m. | 24 | 103,68 | 100,8 | 144 |
| 02/10/2016 | 1:00 p. m. | 25 | 115,2 | 112,32 | 144 |
| 04/10/2016 | 3:00 p. m. | 27 | 109,44 | 115,2 | 144 |

Tabla 2.2 Volumen total producido por cada FLA en su respectiva carrera de filtración. (Continuación)

| FECHA | HORA | DIA | Filtro 1 V/d (L) | Filtro 2 V/d (L) | Filtro 3 V/d (L) |
|----------------------|-------------|------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 05/10/2016 | 10:00 a. m. | 28 | 115,2 | 112,32 | 132,48 |
| 06/10/2016 | 12:00 p. m. | 29 | 115,2 | 112,32 | 144 |
| 07/10/2016 | 10:30 a. m. | 30 | 115,2 | 112,32 | 141,12 |
| 09/10/2016 | 12:30 p. m. | 32 | 109,44 | 109,44 | 144 |
| 10/10/2016 | 2:00 p. m. | 33 | 109,44 | 112,32 | 144 |
| 11/10/2016 | 2:00 p. m. | 34 | 115,2 | 109,44 | 144 |
| 12/10/2016 | 10:00 a. m. | 35 | 115,2 | 115,2 | 146,88 |
| 13/10/2016 | 2:00 p. m. | 36 | 112,32 | 109,44 | 144 |
| 15/10/2016 | 12:00 p. m. | 38 | 115,2 | 112,32 | 146,88 |
| 17/10/2016 | 3:00 p. m. | 40 | 118,08 | 112,32 | 149,76 |
| 19/10/2016 | 10:00 a. m. | 42 | 120,96 | 115,2 | 149,76 |
| 21/10/2016 | 3:15 p. m. | 44 | 120,96 | 118,08 | 144 |
| 24/10/2016 | 11:00 a. m. | 47 | 118,08 | 118,08 | 132,48 |
| 26/10/2016 | 11:15 a. m. | 49 | 120,96 | 115,2 | 115,2 |
| 28/10/2016 | 10:30 a. m. | 51 | 109,44 | 106,56 | |
| 30/10/2016 | 2:00 p. m. | 53 | 109,44 | 106,56 | |
| 31/10/2016 | 3:00 p. m. | 54 | 103,68 | 103,68 | |
| 01/11/2016 | 4:00 p. m. | 55 | | 109,44 | |
| 03/11/2016 | 3:00 p. m. | 57 | | 109,44 | |
| 04/11/2016 | 2:00 p. m. | 58 | | 115,2 | |
| 06/11/2016 | 4:00 p. m. | 60 | | 115,2 | |
| 08/11/2016 | 2:00 p. m. | 62 | | 112,32 | |
| 10/11/2016 | 2:30 p. m. | 64 | | 120,96 | |
| 12/11/2016 | 5:00 p. m. | 66 | | 115,2 | |
| Volumen parcial (m3) | | | 4,55 | 5,14 | 5,18 |
| Volumen total (m3) | | | 6,17 | 7,33 | 6,95 |

Anexo 3. Datos obtenidos para las características fisicoquímicas

Tabla 3.1. Datos fisicoquímicos obtenidos para el afluente (tanque) y para el efluente de cada sistema de FLA.

| FECHA | DIA | FLA1 | | | | | FLA2 | | | | | FLA3 | | | | | TANQUE (AFLUENTE) | | | | |
|-------------------|-----|-----------|------------|--------------|-------------|-----------|-----------|------------|--------------|-------------|-----------|-----------|------------|--------------|-------------|-----------|-------------------|------------|--------------|-------------|-----------|
| | | pH (U pH) | Temp. (°C) | Turbi. (UNT) | Color (UPC) | UV 254 nm | pH (U pH) | Temp. (°C) | Turbi. (UNT) | Color (UPC) | UV 254 nm | pH (U pH) | Temp. (°C) | Turbi. (UNT) | Color (UPC) | UV 254 nm | pH (U pH) | Temp. (°C) | Turbi. (UNT) | Color (UPC) | UV 254 nm |
| 09/09/2016 | 2 | 7,53 | 22,4 | 1,38 | 14 | 0,027 | 7,31 | 22,2 | 1,36 | 14 | 0,026 | 7,35 | 22,4 | 1,37 | 13 | 0,034 | 7,21 | 22,8 | 1,45 | 16 | 0,037 |
| 12/09/2016 | 5 | 7,05 | 21,9 | 1,22 | 14 | 0,052 | 7,61 | 22 | 1,31 | 12 | 0,051 | 7,67 | 22,2 | 1,49 | 11 | 0,047 | 7,51 | 22,3 | 1,67 | 15 | 0,055 |
| 14/09/2016 | 7 | 7,14 | 19 | 1,67 | 39 | 0,12 | 7,34 | 19,5 | 1,84 | 37 | 0,119 | 7,46 | 20,2 | 1,74 | 40 | 0,106 | 7,67 | 20,7 | 2,68 | 41 | 0,122 |
| 17/09/2016 | 10 | 7,41 | 21,2 | 0,77 | 18 | 0,05 | 7,26 | 21,2 | 0,96 | 17 | 0,053 | 7,27 | 21,2 | 0,68 | 14 | 0,042 | 7,29 | 21,3 | 1,23 | 24 | 0,054 |
| 19/09/2016 | 12 | 7,08 | 22,3 | 0,65 | 8 | 0,028 | 7,21 | 22 | 0,58 | 7 | 0,036 | 7,32 | 22,2 | 0,63 | 9 | 0,044 | 7,17 | 22,4 | 1,5 | 12 | 0,043 |
| 21/09/2016 | 14 | 7,46 | 24,1 | 0,49 | 8 | 0,026 | 7,41 | 24,2 | 0,59 | 8 | 0,025 | 7,39 | 24,7 | 0,7 | 8 | 0,023 | 7,67 | 24,4 | 1,15 | 12 | 0,033 |
| 23/09/2016 | 16 | 7,44 | 22,7 | 0,73 | 8 | 0,02 | 7,36 | 23,1 | 0,84 | 8 | 0,075 | 7,27 | 23,4 | 0,73 | 8 | 0,022 | 7,27 | 23 | 2,37 | 17 | 0,034 |
| 26/09/2016 | 19 | 7,47 | 20,5 | 1,9 | 18 | 0,075 | 7,48 | 20,6 | 1,3 | 14 | 0,05 | 7,49 | 21 | 1,6 | 18 | 0,074 | 7,4 | 20,8 | 2,4 | 21 | 0,081 |
| 28/09/2016 | 21 | 7,43 | 21,8 | 1,1 | 5 | 0,061 | 7,54 | 22 | 1 | 7 | 0,092 | 7,6 | 22 | 0,9 | 9 | 0,051 | 7,45 | 21,5 | 1,6 | 10 | 0,064 |
| 30/09/2016 | 23 | 7,22 | 23 | 1,32 | 21 | 0,094 | 7,45 | 22,7 | 1,41 | 23 | 0,1 | 7,44 | 22,8 | 1,7 | 20 | 0,073 | 7,2 | 22,6 | 1,94 | 30 | 0,096 |
| 04/10/2016 | 27 | 7,53 | 21,3 | 0,91 | 27 | 0,096 | 7,4 | 20,7 | 0,99 | 26 | 0,079 | 7,4 | 20,5 | 0,87 | 26 | 0,101 | 7,33 | 20,3 | 1,92 | 36 | 0,134 |
| 05/10/2016 | 28 | 7,39 | 23 | 0,94 | 25 | 0,08 | 7,12 | 22,9 | 0,61 | 19 | 0,098 | 7,01 | 23,1 | 0,86 | 23 | 0,087 | 7,32 | 23,1 | 1,79 | 28 | 0,089 |
| 07/09/2016 | 30 | 8,04 | 21,1 | 2,04 | 39 | 0,114 | 7,97 | 21 | 0,91 | 32 | 0,137 | 7,91 | 21,2 | 1,19 | 32 | 0,099 | 7,69 | 21 | 6,03 | 57 | 0,116 |
| 10/10/2016 | 33 | 7,47 | 23,1 | 1,64 | 41 | 0,143 | 7,42 | 23 | 1,73 | 40 | 0,066 | 7,46 | 23 | 1,63 | 42 | 0,138 | 7,47 | 22,9 | 4,53 | 51 | 0,144 |
| 12/10/2014 | 35 | 7,73 | 22 | 1,28 | 25 | 0,072 | 7,47 | 21,8 | 0,87 | 21 | 0,058 | 7,45 | 21,9 | 1,17 | 22 | 0,079 | 7,41 | 22,1 | 1,75 | 28 | 0,083 |
| 17/10/2016 | 40 | 7,62 | 21,3 | 0,85 | 14 | 0,063 | 7,66 | 21 | 0,89 | 16 | 0,04 | 7,76 | 21,1 | 0,83 | 16 | 0,038 | 7,43 | 21,6 | 2,12 | 22 | 0,069 |
| 19/10/2016 | 42 | 7,18 | 21,7 | 0,75 | 10 | 0,043 | 7,31 | 21,7 | 0,71 | 9 | 0,063 | 7,46 | 21,9 | 0,72 | 9 | 0,041 | 7,46 | 22 | 1,51 | 15 | 0,047 |
| 21/10/2016 | 44 | 7,67 | 20,9 | 0,54 | 14 | 0,053 | 7,69 | 20,9 | 0,84 | 15 | 0,043 | 7,75 | 21,2 | 0,84 | 14 | 0,06 | 7,73 | 20,8 | 1,02 | 16 | 0,074 |
| 24/10/2016 | 47 | 7,47 | 20,7 | 0,69 | 15 | 0,045 | 7,55 | 20,4 | 0,61 | 13 | 0,089 | 7,52 | 20,7 | 0,59 | 12 | 0,04 | 7,48 | 20,6 | 1,22 | 16 | 0,054 |
| 26/10/2016 | 49 | 7,87 | 20,9 | 0,93 | 30 | 0,09 | 7,91 | 20,9 | 1,15 | 28 | 0,051 | 7,88 | 21,2 | 0,56 | 19 | 0,088 | 7,79 | 20,8 | 1,72 | 32 | 0,088 |
| 28/10/2016 | 51 | 7,34 | 20,4 | 0,83 | 29 | 0,038 | 7,38 | 20,2 | 0,94 | 28 | 0,07 | | | | | | 7,31 | 20,6 | 2,37 | 37 | 0,064 |
| 31/10/2016 | 54 | 7,91 | 19 | 0,74 | 16 | 0,058 | 7,76 | 19,2 | 0,64 | 19 | 0,083 | | | | | | 7,92 | 20,4 | 1,47 | 22 | 0,062 |
| 03/11/2016 | 57 | | | | | | 7,82 | 21,1 | 0,7 | 9 | 0,042 | | | | | | 7,76 | 20,9 | 1,36 | 6 | 0,077 |
| 04/11/2016 | 58 | | | | | | 8,1 | 21,2 | 1,5 | 7 | 0,066 | | | | | | 7,94 | 21 | 3,24 | 29 | 0,086 |
| 06/11/2016 | 60 | | | | | | 7,77 | 21,3 | 0,42 | 25 | 0,06 | | | | | | 7,57 | 21,2 | 1,39 | 10 | 0,052 |
| 08/11/2016 | 62 | | | | | | 7,95 | 19,6 | 1,2 | 23 | 0,099 | | | | | | 8,08 | 20,2 | 1,58 | 26 | 0,07 |
| 10/11/2016 | 64 | | | | | | 7,89 | 19,4 | 0,45 | | | | | | | | 7,84 | 19,5 | 1,44 | 8 | 0,078 |
| 12/11/2016 | 66 | | | | | | 7,79 | 20,8 | 0,6 | | | | | | | | 7,83 | 20,6 | 1,78 | 35 | 0,133 |
| PROMEDIO | | 7,48 | 21,56 | 1,06 | 19,91 | 0,07 | 7,57 | 21,31 | 0,96 | 18,35 | 0,07 | 7,49 | 21,90 | 1,04 | 18,25 | 0,06 | 7,54 | 21,48 | 2,01 | 24,00 | 0,08 |
| DESVIACION | | 0,26 | 1,26 | 0,44 | 10,68 | 0,03 | 0,26 | 1,21 | 0,38 | 9,47 | 0,03 | 0,22 | 1,12 | 0,41 | 10,14 | 0,03 | 0,25 | 1,12 | 1,07 | 12,74 | 0,03 |
| DATO MAX. | | 8,04 | 24,1 | 2,04 | 41 | 0,143 | 8,1 | 24,2 | 1,84 | 40 | 0,14 | 7,91 | 24,7 | 1,74 | 42 | 0,138 | 8,08 | 24,4 | 6,03 | 57 | 0,144 |
| DATO MIN. | | 7,05 | 19 | 0,49 | 5 | 0,02 | 7,12 | 19,2 | 0,42 | 7 | 0,025 | 7,01 | 20,2 | 0,56 | 8 | 0,022 | 7,17 | 19,5 | 1,02 | 6 | 0,033 |
| NºDATOS | | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 28 | 28 | 28 | 26 | 26 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 28 | 28 | 28 | 28 | 28 |

Tabla 3.2. Datos de porcentajes de remoción de los parámetros fisicoquímicos evaluados para cada sistema FLA

| FECHA | DIA | % de Remoción de Turbiedad | | | % Remoción de color | | | % Remoción de Materia Orgánica | | |
|-------------------|-----|----------------------------|-------|-------|---------------------|------------|-------|--------------------------------|-------|-------|
| | | FLA1 | FLA2 | FLA3 | FLA1 | FLA2 | FLA3 | FLA1 | FLA2 | FLA3 |
| 09/09/2016 | 2 | 4,83 | 6,21 | 5,52 | 12,50 | 12,50 | 18,75 | 27,03 | 29,73 | 8,11 |
| 12/09/2016 | 5 | 26,95 | 21,56 | 10,78 | 6,67 | 20,00 | 26,67 | 5,45 | 7,27 | 14,55 |
| 14/09/2016 | 7 | 37,69 | 31,34 | 35,07 | 4,88 | 9,76 | 2,44 | 1,64 | 2,46 | 13,11 |
| 17/09/2016 | 10 | 37,40 | 21,95 | 44,72 | 25,00 | 29,17 | 41,67 | 7,41 | 1,85 | 22,22 |
| 19/09/2016 | 12 | 56,67 | 61,33 | 58,00 | 33,33 | 41,67 | 25,00 | 34,88 | 16,28 | -2,33 |
| 21/09/2016 | 14 | 57,39 | 48,70 | 39,13 | 33,33 | 33,33 | 33,33 | 21,21 | 24,24 | 30,30 |
| 23/09/2016 | 16 | 69,20 | 64,56 | 69,20 | 52,94 | 52,94 | 52,94 | 41,18 | 7,41 | 35,29 |
| 26/09/2016 | 19 | 20,83 | 45,83 | 33,33 | 14,29 | 33,33 | 14,29 | 7,41 | 21,88 | 8,64 |
| 28/09/2016 | 21 | 31,25 | 37,50 | 43,75 | 50,00 | 30,00 | 10,00 | 4,69 | 4,17 | 20,31 |
| 30/09/2016 | 23 | 31,96 | 27,32 | 12,37 | 30,00 | 23,33 | 33,33 | 2,08 | 25,37 | 23,96 |
| 04/10/2016 | 27 | 52,60 | 48,44 | 54,69 | 25,00 | 27,78 | 27,78 | 28,36 | 11,24 | 24,63 |
| 05/10/2016 | 28 | 47,49 | 65,92 | 51,96 | 10,71 | 32,14 | 17,86 | 10,11 | 15,52 | 2,25 |
| 07/09/2016 | 30 | 66,17 | 84,91 | 80,27 | 31,58 | 43,86 | 43,86 | 1,72 | 4,86 | 14,66 |
| 10/10/2016 | 33 | 63,80 | 61,81 | 64,02 | 19,61 | 21,57 | 17,65 | 0,69 | 20,48 | 4,17 |
| 12/10/2014 | 35 | 26,86 | 50,29 | 33,14 | 10,71 | 25,00 | 21,43 | 13,25 | 15,94 | 4,82 |
| 17/10/2016 | 40 | 59,91 | 58,02 | 60,85 | 36,36 | 27,27 | 27,27 | 8,70 | 14,89 | 44,93 |
| 19/10/2016 | 42 | 50,33 | 52,98 | 52,32 | 33,33 | 40,00 | 40,00 | 8,51 | 14,86 | 12,77 |
| 21/10/2016 | 44 | 47,06 | 17,65 | 17,65 | 12,50 | 6,25 | 12,50 | 28,38 | 20,37 | 18,92 |
| 24/10/2016 | 47 | 43,44 | 50,00 | 51,64 | 6,25 | 18,75 | 25,00 | 16,67 | -1,14 | 25,93 |
| 26/10/2016 | 49 | 45,93 | 33,14 | 67,44 | 6,25 | 12,50 | 40,63 | -2,27 | 20,31 | 0,00 |
| 28/10/2016 | 51 | 64,98 | 60,34 | | 21,62 | 24,32 | | 40,63 | 9,09 | |
| 31/10/2016 | 54 | 49,66 | 56,46 | | 27,27 | 13,64 | | 6,45 | 3,49 | |
| 03/11/2016 | 57 | | 48,53 | | | 68,97 | | | 19,23 | |
| 04/11/2016 | 58 | | 53,70 | | | 30,00 | | | 5,71 | |
| 06/11/2016 | 60 | | 69,78 | | | 3,85 | | | 23,08 | |
| 08/11/2016 | 62 | | 24,05 | | | 34,29 | | | 25,56 | |
| 10/11/2016 | 64 | | 68,75 | | | | | | | |
| 12/11/2016 | 66 | | 66,29 | | | | | | | |
| PROMEDIO | | 45,11 | 47,76 | 44,29 | 22,92 | 27,55 | 26,62 | 13,35 | 14,01 | 16,36 |
| DESVIACION | | 16,54 | 18,87 | 20,90 | 13,87 | 14,8110363 | 12,87 | 12,60 | 29,73 | 12,35 |
| DATO MAX. | | 69,20 | 84,91 | 80,27 | 52,94 | 3,85 | 52,94 | 41,18 | -1,14 | 44,93 |
| DATO MIN. | | 4,83 | 6,21 | 5,52 | 4,88 | 68,97 | 2,44 | -2,27 | 8,75 | -2,33 |
| NºDATOS | | 22,00 | 28,00 | 20,00 | 22,00 | 26 | 20,00 | 22,00 | 26,00 | 20,00 |

Anexo 4. Datos estadísticos de la remoción de los parámetros fisicoquímicos, obtenidos mediante la herramienta de análisis de datos **STATGRAPHICS Centurion**

Tabla 4.1. Resumen estadístico para % Remoción de Turbiedad

| <i>FLA</i> | <i>Recuento</i> | <i>Promedio</i> | <i>Desviación Estándar</i> | <i>Coefficiente de Variación</i> | <i>Mínimo</i> | <i>Máximo</i> | <i>Rango</i> | <i>Sesgo Estandarizado</i> | <i>Curtosis Estandarizada</i> |
|------------|-----------------|-----------------|----------------------------|----------------------------------|---------------|---------------|--------------|----------------------------|-------------------------------|
| 1 | 22 | 45,1091 | 16,5368 | 36,6596% | 4,83 | 69,2 | 64,37 | -1,16477 | 0,0576386 |
| 2 | 28 | 47,7629 | 18,8714 | 39,5107% | 6,21 | 84,91 | 78,7 | -0,860605 | -0,444404 |
| 3 | 20 | 44,2925 | 20,8997 | 47,1855% | 5,52 | 80,27 | 74,75 | -0,693421 | -0,558017 |
| Total | 70 | 45,9373 | 18,58 | 40,4465% | 4,83 | 84,91 | 80,08 | -1,44132 | -0,725323 |

El StatAdvisor

Esta tabla muestra diferentes estadísticos de % Remoción de Turbiedad para cada uno de los 3 niveles de FLA. La intención principal del análisis de varianza de un factor es la de comparar las medias de los diferentes niveles, enlistados en la columna de Promedio.

Tabla 4.1.2 ANOVA para % Remoción de Turbiedad por FLA

| <i>Fuente</i> | <i>Suma de Cuadrados</i> | <i>Gl</i> | <i>Cuadrado Medio</i> | <i>Razón-F</i> | <i>Valor-P</i> |
|---------------|--------------------------|-----------|-----------------------|----------------|----------------|
| Entre grupos | 162,512 | 2 | 81,2561 | 0,23 | 0,7951 |
| Intra grupos | 23657,5 | 67 | 353,096 | | |
| Total (Corr.) | 23820,0 | 69 | | | |

El StatAdvisor

La tabla ANOVA descompone la varianza de % Remoción de Turbiedad en dos componentes: un componente entre-grupos y un componente dentro-de-grupos. La razón-F, que en este caso es igual a 0,230124, es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la razón-F es mayor o igual que 0,05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de % Remoción de Turbiedad entre un nivel de FLA y otro, con un nivel del 95,0% de confianza.

Tabla 4.1.3 Prueba de Kruskal-Wallis para % Remoción de Turbiedad por FLA

| <i>FLA</i> | <i>Tamaño</i> | <i>Rango</i> |
|------------|---------------|--------------|
|------------|---------------|--------------|

| | <i>Muestra</i> | <i>Promedio</i> |
|---|----------------|-----------------|
| 1 | 22 | 33,7955 |
| 2 | 28 | 37,6429 |
| 3 | 20 | 34,375 |

Estadístico = 0,525913 Valor-P = 0,768775

El StatAdvisor

La prueba de Kruskal-Wallis evalúa la hipótesis de que las medianas de % Remoción de Turbiedad dentro de cada uno de los 3 niveles de FLA son iguales. Primero se combinan los datos de todos los niveles y se ordenan de menor a mayor. Luego se calcula el rango (rank) promedio para los datos de cada nivel. Puesto que el valor-P es mayor o igual que 0,05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95,0% de confianza.

Tabla 4.2 Resumen estadístico para % Remoción de Color

| <i>FLA</i> | <i>Recuento</i> | <i>Promedio</i> | <i>Desviación Estándar</i> | <i>Coefficiente de Variación</i> | <i>Mínimo</i> | <i>Máximo</i> | <i>Rango</i> | <i>Sesgo Estandarizado</i> | <i>Curtosis Estandarizada</i> |
|------------|-----------------|-----------------|----------------------------|----------------------------------|---------------|---------------|--------------|----------------------------|-------------------------------|
| 1 | 22 | 22,915 | 13,8713 | 60,5338% | 4,88 | 52,94 | 48,06 | 1,04767 | -0,331501 |
| 2 | 26 | 27,5469 | 14,5767 | 52,9161% | 3,85 | 68,97 | 65,12 | 1,68389 | 1,47388 |
| 3 | 20 | 26,62 | 12,8702 | 48,3479% | 2,44 | 52,94 | 50,5 | 0,354061 | -0,365639 |
| Total | 68 | 25,7757 | 13,8088 | 53,5729% | 2,44 | 68,97 | 66,53 | 1,84666 | 0,551787 |

El StatAdvisor

Esta tabla muestra diferentes estadísticos de %Remoción de Color para cada uno de los 3 niveles de FLA. La intención principal del análisis de varianza de un factor es la de comparar las medias de los diferentes niveles, enlistados en la columna de Promedio.

Tabla 4.2.1 ANOVA para %Remoción de Color por FLA

| <i>Fuente</i> | <i>Suma de Cuadrados</i> | <i>Gl</i> | <i>Cuadrado Medio</i> | <i>Razón-F</i> | <i>Valor-P</i> |
|---------------|--------------------------|-----------|-----------------------|----------------|----------------|
| Entre grupos | 275,864 | 2 | 137,932 | 0,72 | 0,4919 |
| Intra grupos | 12499,9 | 65 | 192,307 | | |
| Total (Corr.) | 12775,8 | 67 | | | |

El StatAdvisor

La tabla ANOVA descompone la varianza de % Remoción de Color en dos componentes: un componente entre-grupos y un componente dentro-de-grupos. La razón-F, que en este caso es igual a 0,717251, es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el

valor-P de la razón-F es mayor o igual que 0,05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de % Remoción de Color entre un nivel de FLA y otro, con un nivel del 95,0% de confianza.

Tabla 4.2.2 Prueba de Kruskal-Wallis para % Remoción de Color por FLA

| <i>FLA</i> | <i>Tamaño Muestra</i> | <i>Rango Promedio</i> |
|------------|-----------------------|-----------------------|
| 1 | 22 | 30,5682 |
| 2 | 26 | 36,6731 |
| 3 | 20 | 36,0 |

Estadístico = 1,30189 Valor-P = 0,521554

El StatAdvisor

La prueba de Kruskal-Wallis evalúa la hipótesis de que las medianas de % Remoción de Color dentro de cada uno de los 3 niveles de FLA son iguales. Primero se combinan los datos de todos los niveles y se ordenan de menor a mayor. Luego se calcula el rango (rank) promedio para los datos de cada nivel. Puesto que el valor-P es mayor o igual que 0,05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95,0% de confianza.

Tabla 4.3 Resumen Estadístico para % Remoción de Materia Orgánica

| <i>FLA</i> | <i>Recuento</i> | <i>Promedio</i> | <i>Desviación Estándar</i> | <i>Coefficiente de Variación</i> | <i>Mínimo</i> | <i>Máximo</i> | <i>Rango</i> | <i>Sesgo Estandarizado</i> | <i>Curtosis Estandarizada</i> |
|------------|-----------------|-----------------|----------------------------|----------------------------------|---------------|---------------|--------------|----------------------------|-------------------------------|
| 1 | 22 | 14,2809 | 13,4326 | 94,0597% | -2,27 | 41,18 | 43,45 | 1,59359 | -0,536158 |
| 2 | 26 | 14,0058 | 8,7455 | 62,4421% | -1,14 | 29,73 | 30,87 | -0,113421 | -1,24427 |
| 3 | 20 | 16,362 | 12,3507 | 75,484% | -2,33 | 44,93 | 47,26 | 0,950838 | -0,0233141 |
| Total | 68 | 14,7878 | 11,3759 | 76,9278% | -2,33 | 44,93 | 47,26 | 2,03768 | -0,409098 |

El StatAdvisor

Esta tabla muestra diferentes estadísticos de % Remoción de Materia Orgánica para cada uno de los 3 FLA. La intención principal del análisis de varianza de un factor es la de comparar las medias de los diferentes niveles, enlistados en la columna de Promedio.

Tabla 4.3.1 ANOVA para % Remoción de Materia Orgánica por FLA

| <i>Fuente</i> | <i>Suma de Cuadrados</i> | <i>Gl</i> | <i>Cuadrado Medio</i> | <i>Razón-F</i> | <i>Valor-P</i> |
|---------------|--------------------------|-----------|-----------------------|----------------|----------------|
| Entre | 71,1156 | 2 | 35,5578 | 0,27 | 0,7652 |

| | | | | | |
|---------------|---------|----|---------|--|--|
| grupos | | | | | |
| Intra grupos | 8599,47 | 65 | 132,299 | | |
| Total (Corr.) | 8670,58 | 67 | | | |

El StatAdvisor

La tabla ANOVA descompone la varianza de % Remoción de Materia Orgánica en dos componentes: un componente entre-grupos y un componente dentro-de-grupos. La razón-F, que en este caso es igual a 0,268768, es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la razón-F es mayor o igual que 0,05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de % Remoción de Materia Orgánica entre un nivel de FLA y otro, con un nivel del 95,0% de confianza.

Tabla 4.3.2 Prueba de Kruskal-Wallis para % Remoción de Materia Orgánica por FLA

| <i>FLA</i> | <i>Tamaño Muestra</i> | <i>Rango Promedio</i> |
|------------|-----------------------|-----------------------|
| 1 | 22 | 32,4545 |
| 2 | 26 | 34,5385 |
| 3 | 20 | 36,7 |

Estadístico = 0,483134 Valor-P = 0,785396

El StatAdvisor

La prueba de Kruskal-Wallis evalúa la hipótesis de que las medianas de % Remoción de Materia Orgánica dentro de cada uno de los 3 niveles de FLA son iguales. Primero se combinan los datos de todos los niveles y se ordenan de menor a mayor. Luego se calcula el rango (rank) promedio para los datos de cada nivel. Puesto que el valor-P es mayor o igual que 0,05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95,0% de confianza.

