

**EVALUACIÓN DE UN CARTUCHO CON GEOTEXTIL SINTÉTICO NO TEJIDO
(NT) PARA EL PRETRATAMIENTO DE AGUAS NATURALES DEL RÍO MOLINO**



Universidad
del Cauca

**CLAUDIA MARCELA CAMPO YULE
SHARON GISELLA VELASCO MOSQUERA**

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

Asesor:
YENIFER YADIRA TOVAR ROSERO
Bióloga, M.Sc.

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
POPAYÁN- CAUCA
2019**

**EVALUACIÓN DE UN CARTUCHO CON GEOTEXTIL SINTÉTICO NO TEJIDO
(NT) PARA EL PRETRATAMIENTO DE AGUAS NATURALES DEL RÍO MOLINO**

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO
AMBIENTAL
MODALIDAD INVESTIGACIÓN**

**CLAUDIA MARCELA CAMPO YULE
SHARON GISELLA VELASCO MOSQUERA**

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

Asesor:
YENIFER YADIRA TOVAR ROSERO
Bióloga, M.Sc.

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
POPAYÁN- CAUCA
2019**

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma de jurado

Firma de jurado

Popayán, 1 de noviembre del 2019

DEDICATORIA

A mi madre, María Dolly, por su infinito amor y comprensión a lo largo de mi vida, por tener ese talento increíble para ser dulce y dura en los momentos precisos y por brindarme esa luz de esperanza y optimismo cuando el camino empezaba a volverse algo oscuro. A mi padre, Víctor Hugo, por haber impulsado mi interés por hacer investigación desde pequeña, por reconocer y creer en mis capacidades intelectuales y motivarme a aprender a profundidad las cosas que me daban curiosidad. A mi hermana, Sarita, porque con su existencia me ha impulsado a ser un mejor ser humano, por la responsabilidad que implica ser una hermana mayor. A mis tías y tíos, abuelas y abuelo, primos y primas y demás familiares que han sido mi motor y aliento desde que tengo memoria y me hacen sentir bendecida y orgullosa de la familia que tengo.

Claudia Marcela Campo Yule

A Dios, quien es la razón de mi existir, por acompañarme fielmente en cada paso de este camino, por darme la fe y sabiduría que requerí para afrontar cada obstáculo. A mi madre, Nohra Mosquera, por sus palabras de apoyo, por su sacrificio e infinito amor que me han brindado. A mi padre, Orlando Velasco, por sus oraciones permanentes, e instrucción espiritual. A mis hermanas, Kate y Liz, por ser ejemplo de abnegación, y permitirme emprender mi formación universitaria, por y para ellas es este logro. A mi compañera de tesis, amiga y futura colega, por acompañarme en este proyecto, por su tolerancia, cariño y comprensión. Finalmente, a los profesores que fueron actores fundamentales en mi proceso educativo, a mis compañeros con los cuales compartí muchas experiencias enriquecedoras, y a mis amigos, que me dieron aliento en los momentos más difíciles.

Sharon G. Velasco Mosquera

AGRADECIMIENTOS

A nuestro director, Javier Fernández, por compartirnos su conocimiento y brindarnos su orientación y tiempo durante el desarrollo de esta investigación.

A la profesora Yenifer Tovar, por su asesoría en la parte microbiológica, su voz de apoyo y aliento de perseverar a pesar de las dificultades presentadas.

Al Laboratorio de Hidráulica y a su laboratorista Don Alfonso, quien siempre tuvo la mejor disposición para brindarnos su ayuda las muchas veces que la necesitamos.

Al Laboratorio de Ingeniería Ambiental y Sanitaria a cargo del ingeniero Carlos Cabezas, y a su laboratorista Ricardo Varela, por el préstamo de material, equipos y disponibilidad del lugar.

Al jefe de departamento de Biología, Jimmy Guerrero, por facilitarnos los reactivos y materiales necesarios para el desarrollo de este trabajo, además de permitirnos usar las instalaciones del Laboratorio de Microbiología, en donde todos sus laboratoristas nos acogieron y colaboraron durante todo el periodo experimental.

A la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Popayán, en representación de los jefes de operación, los ingenieros Silvio Muñoz y Mauricio Ramírez. Un agradecimiento muy especial a los operarios de la Planta de Tratamiento de Agua Potable Tulcán, por transmitirnos su conocimiento y experiencia, por estar siempre prestos a ayudarnos en los imprevistos que se presentaron, además de hacernos sentir como en casa cada vez que estábamos en las instalaciones de la planta

En general, a todas las personas que conocimos durante el desarrollo de la investigación, que en mayor o menor medida, nos brindaron su apoyo, y nos alentaron para culminar con éxito este trabajo

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
2. JUSTIFICACIÓN	3
3. OBJETIVOS	4
3.1. OBJETIVO GENERAL	4
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
4. REVISIÓN DE LITERATURA	5
4.1. MARCO TEÓRICO	5
4.1.1. GEOTEXTILES	6
4.1.2. GEOTEXTILES SINTÉTICOS NO TEJIDOS (NT)	7
4.2. EXPERIENCIAS INVESTIGATIVAS	8
5. METODOLOGÍA	10
5.1. TIPO DE ESTUDIO	10
5.2. ÁREA DE ESTUDIO Y CONDICIONES DEL SISTEMA EN EVALUACIÓN	10
5.3. CONDICIONES GENERALES DE PLANTA PILOTO	10
5.4. METODOLOGÍA PARA EL OBJETIVO 1	13
5.5. METODOLOGÍA PARA EL OBJETIVO 2	15
6. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	15
6.1. CALIDAD DEL AGUA DEL AFLUENTE	15
6.2. PARÁMETROS DE CALIDAD DEL AGUA	16
6.2.1. TURBIEDAD	16
6.2.2. COLOR APARENTE	18
6.2.3. SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (SST)	19
6.2.4. COLIFORMES TOTALES	21
6.2.5. COLIFORMES FECALES	23
6.3. EFICIENCIAS DE REMOCIÓN	24
6.3.1. EFICIENCIA PARA TURBIEDAD	25
6.3.2. EFICIENCIA PARA COLOR	26
6.3.3. EFICIENCIA PARA SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (SST)	27
6.4. COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO	27
6.4.1. CAUDAL	27
6.4.2. PÉRDIDA DE CARGA	29
7. CONCLUSIONES	31
RECOMENDACIONES	32
REFERENCIAS	33
ANEXOS	35

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación de los geotextiles	6
Figura 2. Especificaciones técnicas de los Geotextiles No Tejidos.....	8
Figura 3. Esquema del cartucho.....	11
Figura 4. Montaje en campo del dispositivo	12
Figura 5. Detalle 1: Dosificador de cabeza constante.....	12
Figura 6. Turbiedades de entrada y salida para cada carrera de filtración.....	16
Figura 7. Color aparente de entrada y salida para cada carrera filtración.	18
Figura 8. Sólidos suspendidos totales de entrada y salida para cada carrera filtración.	20
Figura 9. Coliformes totales de entrada y salida para cada carrera filtración.....	21
Figura 10. Pasos implicados en la formación de una biopelícula.....	22
Figura 11. Coliformes fecales de entrada y salida vs días para cada carrera filtración.	24
Figura 12. Caudal vs tiempo para cada carrera de filtración.	28
Figura 13. Pérdida de carga vs tiempo para cada carrera de filtración.	29
Figura 14. Ajuste de la nube de puntos de pérdida de carga	30

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características del geotextil NT 1600.....	10
Tabla 2. Evaluación de los parámetros de calidad de agua por cada carrera de filtración	14
Tabla 3. Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del agua cruda.....	15
Tabla 4. Parámetros de calidad de agua, turbiedad (UNT).....	17
Tabla 5. Parámetros de calidad del agua, color (UPC)	19
Tabla 6. Parámetros de calidad de agua, SST (mg/L).....	20
Tabla 7. Parámetros de calidad de agua, coliformes totales (UFC/100mL)	21
Tabla 8. Parámetros de calidad de agua, coliformes fecales (UFC/100mL).....	23
Tabla 9. Eficiencia de remoción para turbiedad, color, y SST para cada réplica.	25
Tabla 10. Influencia de la turbiedad de entrada en la eficiencia de remoción.....	25
Tabla 11. Influencia del color de entrada en la eficiencia de remoción.....	26
Tabla 12. Influencia de los SST de entrada en la eficiencia de remoción.	27
Tabla 13. Comportamiento del caudal (mL/min).....	28

LISTA DE ANEXOS

ANEXO 1. Datos obtenidos para los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos.....	35
ANEXO 2. Resultados estadísticos para determinación de distribución de datos y diferencias significativas.....	39
ANEXO 3. Datos obtenidos del comportamiento hidráulico.....	41

INTRODUCCIÓN

La disminución en la calidad y cantidad del recurso hídrico, se han convertido en problemáticas de interés para las naciones. Aun cuando en un 0.7% de tierras de la superficie continental mundial, correspondientes a la superficie de Colombia, se concentra el 5% de la riqueza hídrica mundial (IDEAM, 2018); la mala distribución, manejo y utilización del recurso, ha hecho que tanto los ríos, arroyos, cuencas, quebradas, entre otras fuentes de agua, presenten problemáticas que generan repercusiones económicas, sociales, culturales y ambientales en las comunidades. Si bien es cierto el desarrollo y la industrialización son asociados a mejoras en la calidad de vida de los seres humanos, también han supuesto un incremento en la demanda de agua y generación de residuos dentro de las actividades, ocasionando que el derecho al acceso de agua potable sea vea vulnerado.

Por lo anterior se vuelve necesario fomentar la investigación de soluciones eficaces, y adecuadas para cada una de los contextos en donde se presentan las problemáticas mencionadas, teniendo en cuenta las necesidades y diferencias de la zona urbana y rural, siendo esta última la que presenta más inconvenientes en cuanto a cobertura y acceso al agua potable. En particular, la zona rural representa un reto mayor; el difícil acceso a sus territorios, los costos elevados de construcción y mantenimiento de las tecnologías existentes, y el poco conocimiento del entorno social, han llevado a que las soluciones planteadas tengan limitaciones en cuanto a su sostenibilidad y queden obsoletas e inutilizadas al poco tiempo de su instalación.

Es así como en la búsqueda de brindarle cobertura de agua potable a las poblaciones más vulnerables y con menor capacidad de obtener y mantener sistemas de tratamiento convencionales, se propone evaluar un cartucho de geotextil sintético no tejido alimentado por agua cruda natural del Río Molino, como pretratamiento de agua potable, analizando comportamiento hidráulico, parámetros microbiológicos y fisicoquímicos como turbiedad, color, y sólidos suspendidos totales.

Este documento presenta los resultados de la evaluación realizada al cartucho de geotextil sintético no tejido utilizando agua natural. Partiendo de una revisión literaria como fundamento para desarrollar la metodología, presentación de datos y análisis de los mismos, y concluir si el sistema de pretratamiento es eficiente la remoción de los parámetros evaluados, y finalmente plantear algunas recomendaciones que pueden ser objeto de posteriores investigaciones.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La calidad del agua para consumo humano, constituye uno de los ejes fundamentales para la salud pública, e incluso se engloba dentro del objetivo seis de desarrollo sostenible “Agua limpia y saneamiento”. Autoridades internacionales como la Organización Mundial de la Salud (OMS), promueven la implementación de estrategias para prevenir la propagación de enfermedades de origen hídrico. Considerando que el acceso al agua potable para las diferentes poblaciones constituye un mecanismo importante en la reducción de la pobreza y el mejoramiento de las condiciones de salud; por consiguiente, la obligación de los diferentes gobiernos radica en adoptar reglamentaciones sanitarias pertinentes para mitigar dicha problemática. A pesar de las estrategias ya mencionadas, estadísticas del año 2017 muestran que 844 millones de personas a nivel mundial aún no cuentan con acceso a agua potable (WHO/UNICEF, 2017).

En Colombia, la cobertura de agua potable según cifras recientes es considerablemente buena. Estadísticas del gobierno nacional proyectan que para el 2019, el 95% de la población tuvo acceso a agua potable (Departamento Nacional De Planeación (DNP), 2014); sin embargo, al revisar la calidad del agua suministrada, sobre la base del Índice de Riesgo de la Calidad del Agua para Consumo Humano (IRCA), el panorama es preocupante. Para el 2017, en la zona urbana del país el IRCA fue 7,4, correspondiente a riesgo bajo mientras que en la zona rural fue de 31,1; clasificado como riesgo medio. Los índices mencionados anteriormente llaman la atención, considerando que históricamente la zona urbana ha presentado mejor calidad del agua que la zona rural. Del total de departamentos, el 48,4% (15) presentaron agua sin riesgo en la zona urbana y dos departamentos en riesgo alto. Por el contrario, el 18,5% (5) de los departamentos en la zona rural estuvieron sin riesgo y el 37,0% (10) tuvieron riesgo alto, incluso un departamento se catalogó inviable sanitariamente (Instituto Nacional de Salud, 2017). Es evidente entonces, que 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. Pero a medida que disminuye la urbanidad y la ruralidad aumenta, la calidad del agua desmejora incrementando su nivel de riesgo, de tal manera que, en los municipios con mayor área rural, el IRCA es predominantemente alto y en algunos casos, inviable sanitariamente.

La poca presencia del estado en estas localidades, el difícil acceso a las mismas, y los elevados costos de construcción, operación y mantenimiento, han contribuido a que en estas zonas sean prácticamente inexistentes los sistemas de tratamiento para potabilización del agua. Además, en los lugares donde existen sistemas de tratamiento, las tecnologías seleccionadas parecen no funcionar de manera óptima, ya que en su construcción y posterior implementación, no se tuvieron en cuenta factores socioeconómicos, culturales y organizacionales de las comunidades; por lo que con el paso del tiempo, estos sistemas se convierten en estructuras ineficaces para la tarea para la que fueron construidas (Fundación Reto Colombia, 2016). Sumado a lo anterior, se tiene que en la zona rural, es común encontrar a la comunidad dispersa en el territorio, lo que se traduce en la dificultad de poder abastecer de agua potable a todas las casas, escuelas y centros de salud.

Por lo anterior, son necesarias opciones tecnológicas acordes con las particularidades de la zona rural, que solucionen el problema existente con respecto al agua para consumo humano; con el fin de poder disminuir el elevado costo de su instalación, haciendo más viable su construcción e implementación, así como su funcionamiento en el tiempo.

2. JUSTIFICACIÓN

En la búsqueda de sistemas de potabilización que respondan a las necesidades de la zona rural, se han explorado diversas alternativas que garanticen agua de calidad, al igual que prometan viabilidad económica. La tecnología de filtración en múltiples etapas (FiME), combina los filtros gruesos en grava (FG) y los filtros lentos en arena (FLA), los cuales además de remover turbiedad y color, se les atribuyen niveles considerables de remoción microbiana; otra particularidad es que, al no emplear productos químicos en el proceso, se constituye como una tecnología limpia que opera sin dejar residuos nocivos, y se cataloga de fácil operación en comparativa con los métodos convencionales. Sin embargo, dentro de sus mayores limitaciones se encuentran sus costos de inversión inicial, los cuales pueden ser mayores a los de otras tecnologías como las plantas compactas y convencionales (Fernandez et al., 2001).

En el esfuerzo de disminuir costos, se proponen los geotextiles sintéticos no tejidos (NT), los cuales al introducirse sobre la superficie del lecho filtrante de los FLA, apuntan a la reducción de: área superficial y altura del filtro, además de la prolongación de las carreras de filtración, manteniendo o mejorando la calidad del agua en parámetros como turbiedad y color real (Fernandez et al., 2001). Recientemente, una investigación evaluó el geotextil NT 1600 en los FLA, arrojando resultados que ratifican las bondades de esta tecnología. En este estudio se concluye que existe una disminución en la pérdida de carga en los filtros lentos en arena, por lo que hay un incremento en la duración de la carrera de filtración de hasta un 36% en comparación a un filtro lento en arena regular. Dicho comportamiento exponencial de la pérdida de carga, posibilitaría la reducción de la altura de las estructuras de los FLA considerablemente, reduciendo costos de inversión inicial (Capote & Leyton, 2018).

Nuevas investigaciones se han orientado a optimizar los sistemas de pretratamiento actuales utilizados en FiME. En este sentido, en el Departamento de Ingeniería Ambiental y Sanitaria de la Universidad del Cauca se viene desarrollando un filtro en geotextil NT, que facilita la remoción de sólidos en suspensión y turbiedad. Una primera investigación evaluó, con diferentes caudales, el comportamiento hidráulico y la remoción de los parámetros fisicoquímicos anteriormente mencionados, utilizando como agua cruda las almacenadas en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad del Cauca, la cual fue mezclada con lodo natural para simular fuentes con altos contenido de sedimentos. Los mejores resultados fueron obtenidos con el caudal de 0,1 L/s, alcanzando eficiencias de remoción del 64% para sólidos suspendidos y del 40% para turbiedad (Palechor & Pérez, 2017). Otro estudio realizado por Bravo & Caicedo (2019) determinó la influencia del espesor del geotextil NT utilizado en la eficiencia de remoción de turbiedad y sólidos en suspensión, en donde se obtuvo que con un

espesor de 8.1 cm y un tiempo de retención de 5 min en el filtro, se alcanzan remociones de hasta 72.45% y 91.73% en turbiedad y sólidos suspendidos respectivamente.

Aun cuando los resultados anteriores demuestran la efectividad del uso del geotextil NT 1600 para el pretratamiento del agua, con posible aplicabilidad para la zona rural; se requiere avanzar con la investigación, estudiando la eficiencia de remoción con aguas crudas naturales, añadiendo el estudio de la remoción de parámetros microbiológicos. Se presume, que en condiciones definidas: tiempo de retención de 5 minutos y un espesor del cartucho de 8.1 cm, se lograrían alcanzar remociones superiores al 50% en turbiedad, 70% en sólidos suspendidos y al menos 0,5 unidades logarítmicas en coliformes totales.

De demostrarse la viabilidad del filtro con geotextil NT, se pensaría en sustituir los sistemas de pretratamiento con gravas utilizados en la tecnología FiME, con lo cual se alcanzarían impactos positivos en la reducción de costos de inversión, facilitando su implementación.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar el comportamiento de la tecnología de filtración con un cartucho en geotextil sintético NT en la remoción de parámetros fisicoquímicos, microbiológicos y de operación con agua cruda natural.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Verificar la capacidad de remoción en sólidos suspendidos, turbiedad, color, coliformes totales y fecales, de un cartucho en geotextil sintético NT, conformado con el espesor de 8.1cm.

Evaluar el comportamiento hidráulico de un cartucho en geotextil sintético NT conformado con el espesor 8.1 cm.

4. REVISIÓN DE LITERATURA

4.1. MARCO TEÓRICO

El proceso de filtración parte de que las partículas por remover son transportadas a un medio filtrante, de modo que permanecen ahí mientras resistan la intervención de fuerzas hidrodinámicas. Por ende, la filtración es resultado de dos mecanismos diferentes, pero complementarios entre sí, denominados: transporte y adherencia. El primero es un fenómeno físico de carácter hidráulico que se ve influenciado por la transferencia de masas, mientras que el segundo es un fenómeno de acción superficial (Maldonado, 2004). Los mecanismos de transporte son: el colado, difusión, sedimentación, e intercepción; y para los mecanismos de adherencia se consideran: el puente químico, las fuerzas electroquímicas y fuerzas de Van der Waals, siendo estas últimas las más notables dentro del proceso (BVSDE, n.d.)

El colado o cernido resulta cuando la partícula es de tamaño mayor que los poros del lecho filtrante, de modo que queda atrapada en los intersticios de las capas más superficiales; la difusión, hace referencia a la relación de la temperatura y viscosidad del agua con la tasa de velocidad, diámetro de la partícula y el diámetro del colector o filtro, permitiendo de esta forma la remoción de las partículas más pequeñas; la sedimentación se presenta cuando una partícula es transportada por fuera de su línea de flujo a la superficie del colector debido a la fuerza de la gravedad; y la intercepción ocurre cuando una partícula que sigue una línea de flujo entra en contacto con el colector (Yao, 2011. Citado por Sánchez, 2017) Sin embargo, acorde con investigaciones (Wegelin et al, 1987. Boller, 1993. & Collins, 1994. Citados por Sánchez, 2017), el principal mecanismo de remoción cuando las partículas no han sido coaguladas, es el de sedimentación.

Cuando no hay intervención de coagulantes, la eficiencia de la sedimentación, está determinada por dos características de los medios filtrantes, como lo son:

Área superficial específica: Corresponde a la relación entre la superficie del lecho filtrante y su masa (m^2 /g). De modo que, a mayor área superficial específica, mejor proceso de sedimentación se dará, por tanto se cree que un filtro con una elevada superficie específica, tendrá un gran potencial de remover partículas por el mecanismo de sedimentación.

Porosidad: Se refiere a la relación porcentual (%) entre el volumen de orificios o poros, y el volumen total del medio que los contiene (Rodríguez, 2010). Este es un aspecto muy importante dentro de la filtración, puesto que implica la presencia de vacíos, donde se puede acumular los sólidos que han sido retenidos durante el proceso. La duración de la carrera de filtración es directamente proporcional a la porosidad, es decir que si un lecho es considerablemente poroso, garantizará carreras de filtración más prolongadas. Además, la porosidad permite una mejor filtración a profundidad, con lo cual se aprovecha todo el lecho filtrante.

Los geotextiles se presentan como una nueva opción de materiales para los sistemas de filtración, que responden a relaciones favorables entre la porosidad y la superficie específica. Su composición filamentosa otorga una mayor cantidad de vacíos, lo que está relacionado con una menor caída de presión y, por lo tanto, un aumento de duración de la carrera de filtración. Al mismo tiempo, la estructura filamentosa de alta porosidad es capaz de mantener una gran superficie específica, que garantiza mayor contacto para atrapar impurezas.

4.1.1. GEOTEXTILES

Los geotextiles son un tipo de geosintéticos definido como “un material textil plano, permeable polimérico que puede ser no tejido, tejido, o tricotado” (PAVCO, 2009). Dentro de las aplicaciones de los geotextiles, una fracción considerable van encaminadas a la filtración como función principal; en estructuras como bordes del pavimento, zanjas de desagüe, pendientes blindadas y litorales, paneles de drenaje prefabricados y de los sistemas de recolección de lixiviados (Luettich et al., 1992).

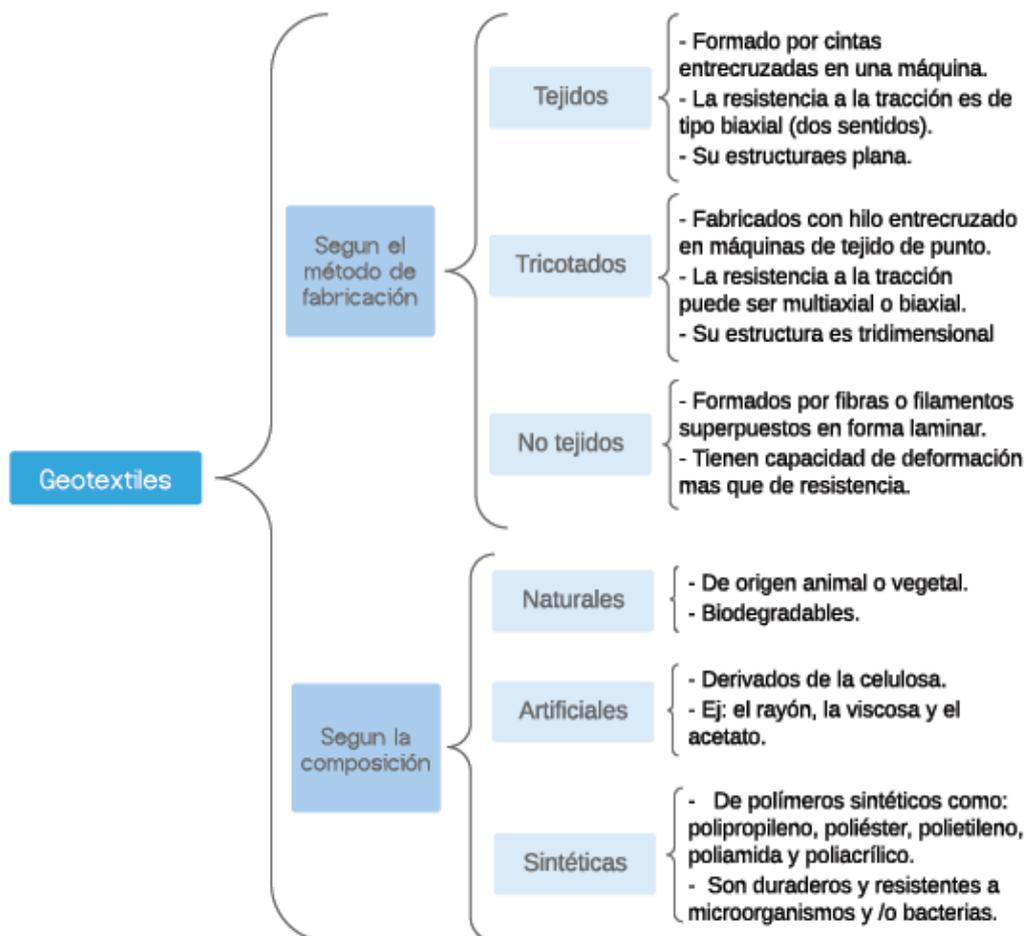


Figura 1. Clasificación de los geotextiles

Fuente: Propia

Los geotextiles presentan dos clasificaciones, como muestra la Figura 1. Dependiendo de la función que desempeñará, se determina la escogencia de cada tipo. Para efectos de procesos de filtración, los más adecuados son los de tipo no tejido, puesto que se caracterizan por tener la capacidad de deformación, siendo a su vez robustos y de gran porosidad, mientras que los tejidos o tricotados por su alta resistencia a la tracción, se especifican más en el recubrimiento de suelos y estabilidad de taludes (Heibaum, 2016). En cuanto a la composición del geotextil, los polímeros mayoritariamente usados, suelen ser de origen sintético debido a su mayor durabilidad frente a los naturales, de modo que si se está expuesto a procesos degradativos, el geotextil garantice su permanencia en el tiempo (Departamento de Transportes y Tecnología de Proyectos y Proceso, n.d.).

4.1.2. GEOTEXTILES SINTÉTICOS NO TEJIDOS (NT)

Los geotextiles sintéticos no tejidos (NT) están siendo estudiados desde hace algunos años en el tratamiento de agua para consumo humano debido a que estos presentan varias propiedades hidráulicas favorecedoras. Su porosidad siempre es superior al 70%, oscilando en promedio entre 80% y 99%, a causa de ello la conductividad hidráulica es mayor que en un FLA (Fernandez et al., 2001). Otro aspecto destacable es que pueden llegar a tener un área superficial específica de 20.000 m²/m³, presentando coeficientes de filtración bastante altos (Fernandez et al., 2010).

Su naturaleza de alta permeabilidad, permite que el fluido atraviese las fibras del geotextil de una manera más rápida, además que es eficaz en la retención de partículas, así sean muy finas, debido a que poseen un tamaño de poro aparente a partir de 35 μm (Piegari, 2005. Citado por Fernández et al, 2010). Además, al estar compuesto de un polímero de origen apolar, las partículas que se retienen en los geotextiles no se adhieren de manera permanente a este, razón por la cual la limpieza del material se puede realizar de manera sencilla, y existe la posibilidad de su reutilización (Piegari, 2005). En consecuencia, se encuentran a la fecha múltiples estudios que por sus cualidades, han ido aportando elementos claves para el desarrollo de esta tecnología.

En el mercado se encuentra gran variedad de geotextiles sintéticos NT, para el caso de Colombia PAVCO es la mayor comercializadora, que pone en manifiesto las respectivas fichas técnicas, especificando las propiedades físicas e hidráulicas, de manera que el usuario puede escoger el más indicado para determinada actividad. En la Figura 2, dentro del amplio espectro de geotextiles, el NT 1600 presenta excelentes cualidades para los procesos de filtración a un menor costo que las demás referencias, si bien es cierto que el tamaño de tamiz es el menor (80) que corresponde a un mayor tamaño de abertura, tanto la permeabilidad (0.44cm/s), la permitividad (2.9s⁻¹) y la tasa de flujo (8109 L/min/m²), son valores altos y adecuados. Su espesor es de 1.5 mm y el porcentaje de resistencia a la radiación UV supera el 70%.

PROPIEDADES HIDRÁULICAS	NORMA	UNIDAD	NT 1600	NT 1800	NT 2000	NT 2500	NT 3000	NT 4000	NT 5000	NT 6000	NT 7000
Tamaño de abertura aparente	ASTM D4751	mm (N.º Tamiz)	0.180 (80)	0.150 (100)	0.150 (100)	0.125 (120)	0.125 (120)	0.09 (170)	0.09 (170)	0.09 (170)	0.09 (170)
Permeabilidad	ASTM D4491	cm/s	44 x 10 ⁻²	42 x 10 ⁻²	38 x 10 ⁻²	38 x 10 ⁻²	35 x 10 ⁻²	26 x 10 ⁻²	24 x 10 ⁻²	22 x 10 ⁻²	15 x 10 ⁻²
Permitividad	ASTM D4491	s ⁻¹	2.9	2.5	2.2	1.9	1.8	1.2	1.0	0.7	0.5
Tasa de flujo	ASTM D4491	L/min/m ²	8109	6563	6120	5043	4890	3440	3160	2284	2060
PROPIEDADES FÍSICAS	NORMA	UNIDAD	NT 1600	NT 1800	NT 2000	NT 2500	NT 3000	NT 4000	NT 5000	NT 6000	NT 7000
Espesor	ASTM D5199	mm	1.5	1.7	1.7	2.0	2.0	2.2	2.4	3.1	3.2
Resistencia UV @ 500 horas	ASTM D4355	%	>70	>70	>70	>70	>70	>70	>70	>70	>70

Figura 2. Especificaciones técnicas de los Geotextiles No Tejidos

Fuente: Imagen tomada y modificada de PAVCO, 2012

El geotextil de referencia NT 1600, está conformado por un sistema de fibras de polipropileno punzonado por agujas, que forman una red aleatoria de estabilidad dimensional; es resistente a la podredumbre, a los elementos ácidos o básicos encontrados de manera natural, a la degradación ultravioleta y biológica. Además, es estable dentro de un rango considerable de pH de 2 a 13 unidades (Geosoluciones SAS, 2016. Citado por Hoyos y Méndez, 2016). Recientemente se ha publicado investigaciones que han hecho uso de este geotextil como medio filtrante, para lograr resultados satisfactorios.

Se presume que los geotextiles sintéticos NT se comportan de manera similar que un medio filtrante granular, planteando la hipótesis de que sería una alternativa de sustitución para los filtros gruesos en grava. Para comprobar la premisa se espera que dichos geotextiles como pretratamiento previo a los FLA, cumpla unos estándares mínimos de calidad de agua, reportados por Cleasby et al., 1984; Spencer et al, 1991; y Galvis et al., 1999.

4.2. EXPERIENCIAS INVESTIGATIVAS

En el XXVI Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, investigadores brasileños (Pádua & Di Bernardo, 1998) plantearon resultados satisfactorios de un estudio, donde se evaluaron trece geotextiles no tejidos en términos de mejoramiento de calidad de agua y caída de presión, para una planta piloto. Ciertamente las propiedades de los mismos, influyeron significativamente en la capacidad de retención de impurezas, a su vez que disminuyó la caída de presión en los filtros de arena.

Un caso especial, que ratificó los resultados esperados por parte del uso de geotextiles NT en procesos de filtración, es el realizado por De Souza (2015), donde el objetivo primordial radicó en comparar el rendimiento de un filtro lento de arena tradicional, con respecto a un filtro solo compuesto por geotextiles sintéticos NT de doce espesores graduados entre 1 a 40 cm. Los resultados mostraron que el comportamiento del filtro de geotextiles se equiparó en rendimiento con el tradicional, en aspectos como: periodo de maduración similar (15 días), cobertura de todas las tasas de filtración propuestas, cumplimiento de los estándares de calidad de agua en cuanto turbiedad y color, y eficiencias de remoción notables en coliformes fecales y totales. Por último, se definió un grosor óptimo para el filtro compuesto por geotextil de 25 cm, el cual sería una opción viable para la sustitución de un filtro en arena, en pro de la disminución de costos.

En un trabajo de investigación (Hoyos & Méndez, 2016) realizado a nivel de planta piloto en la vereda Los Llanos del municipio de Popayán, Cauca, se evaluaron tres filtros lentos en arena para tratar agua proveniente de un sistema de Filtración Gruesa Dinámica (FGDi) y de un Filtro Grueso Ascendente (FGA). Los tres filtros contaron con un lecho filtrante de 0,30m de arena, pero solo a dos de ellos se les añadieron tres capas de geotextil sintético NT 1600. El geotextil aumentó en un 22% la carrera de filtración, y al operar estos a la misma velocidad de filtración, se evidenció que el uso de la manta sintética retiene y protege de posibles impurezas el lecho de arena permitiendo la circulación de agua en el sistema por un periodo mayor de tiempo. Estos resultados demuestran que el geotextil NT 1600 incide en las carreras de filtración de los FLA al igual que las velocidades de filtración empleadas.

Otro estudio (Palechor & Pérez, 2017) también a escala de planta piloto llevado a cabo en la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad del Cauca, evaluó el comportamiento hidráulico y la remoción de sólidos suspendidos, turbiedad y color de un cartucho con geotextil sintético NT 1600, como sistema de pretratamiento para aguas destinadas para consumo humano. Se tomaron muestras de calidad de agua a la entrada y salida del dispositivo; se determinó la pérdida de carga y la reducción de caudal en el tiempo, teniendo en cuenta que se emplearon diferentes caudales (0.1L/s, 0.2L/s, 0.3L/s y 0.4L/s). El caudal que presentó los mejores resultados en términos de eficiencias de remoción fue el de 0.1L/s, arrojando resultados promedio de 64% para sólidos suspendidos, 40% para turbiedad y 38% para color, además que con este caudal se presentaron pérdidas de carga muy bajas, cercanas a cero. Finalmente, en este estudio se concluye que el uso de un cartucho con geotextil sintético NT 1600, se puede aplicar como sistema de pretratamiento de agua cruda para soluciones individuales de potabilización en zonas rurales.

Bravo & Caicedo (2019), realizaron un trabajo de investigación en las instalaciones de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad del Cauca, en el que evaluaron el efecto de diferentes espesores de unos cartuchos con geotextil sintético NT 1600 en la remoción de sólidos suspendidos, turbiedad y su comportamiento hidráulico. En el montaje experimental, se emplearon tres cartuchos con geotextil NT 1600 con diferentes diámetros de tubos de PVC (2, 3 y 4 pulgadas) obteniendo espesores de 2.8, 5.6 y 8.1 cm respectivamente. En este trabajo, se obtuvo que la mayor eficiencia para turbiedad fue alcanzada por el espesor de 5.6 cm con un valor de 85.69%, para sólidos suspendidos se presentó una eficiencia máxima del 98, 36 % en el espesor de 2.8 cm. Con respecto al comportamiento hidráulico, las pérdidas de carga son relativamente bajas, a causa de su alta porosidad.

Se concluye en este estudio, que los filtros con geotextil sintético NT 1600 de PAVCO son viables como alternativa de pretratamiento de agua para soluciones individuales de potabilización, en zonas rurales. Debido a que entre los tres espesores no existen diferencias significativas en cuanto a eficiencia de remoción de sólidos suspendidos totales, turbiedad y color aparente, es viable utilizar el filtro con geotextil de 8.1 cm de espesor, ya que produce mayor volumen de agua (m^3) con similares parámetros de calidad que los otros dos espesores evaluados, además, de bajas pérdidas de carga.

5. METODOLOGÍA

5.1. TIPO DE ESTUDIO

La ejecución del trabajo de investigación propuesto, se llevó a cabo a nivel de planta piloto en las instalaciones de la Planta de Tratamiento de Agua Potable - PTAP Tulcán.

5.2. ÁREA DE ESTUDIO Y CONDICIONES DEL SISTEMA EN EVALUACIÓN

El área de estudio corresponde a la Planta de Tratamiento Tulcán, perteneciente a la empresa de Acueducto y Alcantarillado de la ciudad de Popayán, se encuentra localizada en el barrio Caldas, en el sector conocido como “El morro” (2.44°N; 76.60°W) y está ubicada sobre la cota 1773 m.s.n.m. Las condiciones climatológicas promedio del área de estudio se caracterizan por registrar una precipitación anual de 1941 mm y una temperatura oscila entre 14 y 23 °C. El estudio se dividió en dos fases: la etapa preliminar comprendida entre los meses de mayo a julio donde se instaló el montaje, se definió aspectos hidráulicos, y se monitoreó los parámetros de manera individual. Y las pruebas definitivas ejecutadas entre septiembre y octubre.

La planta piloto fue alimentada por el afluente de la PTAP que es el río Molino, de modo que se evaluó el comportamiento del mismo, en condiciones reales, no controladas. Durante la evaluación del sistema los parámetros de calidad de agua oscilaron en amplios rangos, puesto que fluctúan acorde de las condiciones climatológicas del sitio. En cuanto a los parámetros fisicoquímicos, la turbiedad reportó un promedio de 10.8 UNT; el color aparente de 18.3 UPC; y los sólidos suspendidos de 14,3 mg/L. Por otro lado, el reporte microbiológico indica que las medias de coliformes totales y fecales fueron de 40 UFC/100mL y 5 UFC/100mL respectivamente.

5.3. CONDICIONES GENERALES DE PLANTA PILOTO

Para la investigación se construyó un dispositivo representado en el esquema de la Figura 3, compuesto de un geotextil NT 1600, con las especificaciones denominadas por el fabricante en la tabla 1; dicho geotextil con dimensiones de 1 metro de ancho por 3.5 metros de largo se instala al interior de un tubo de PVC de 4” (8.1cm de espesor), con aditamentos, que permitieron el ingreso y salida del flujo de agua a través de las conducciones, y el desmonte e instalación del geotextil cuando se requirió, tal y como lo especifica Bravo & Caicedo (2019).

Tabla 1. Características del geotextil NT 1600

Parámetro	Propiedad	Valor típico
Hidráulicas	Tamaño de abertura aparente	0,18 mm
	Permeabilidad	4400 cm/s
	Porosidad	86,5 %
	Tasa de flujo	8109 L/min/m ²
Físicas	Espesor	1,5 mm

Fuente: (Geosistemas PAVCO, 2012)

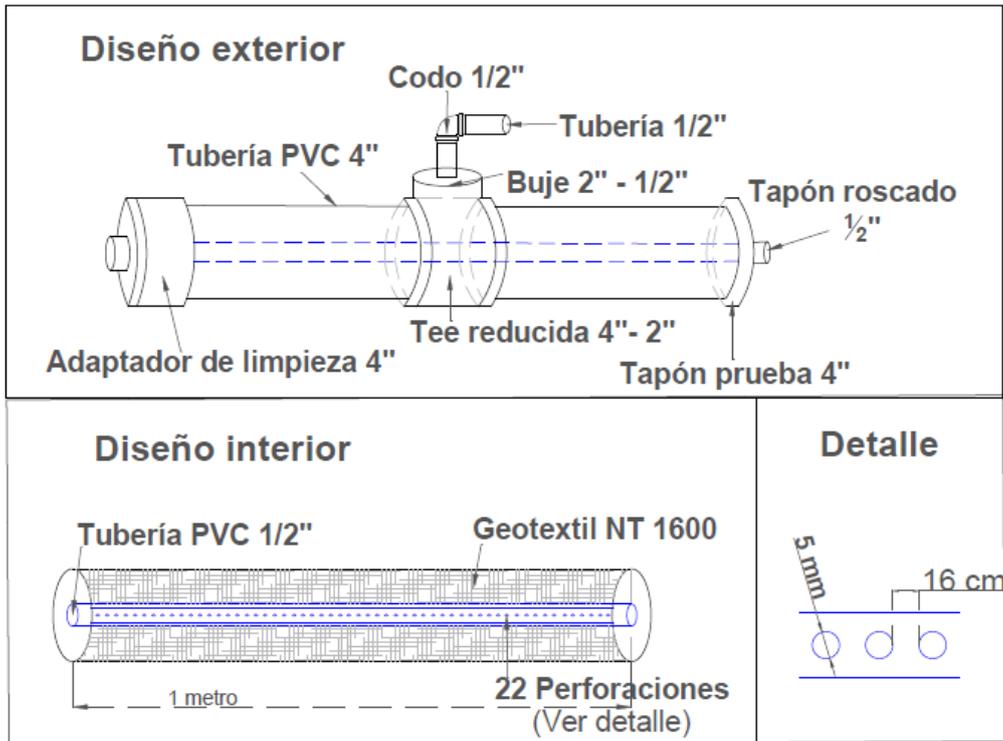


Figura 3. Esquema del cartucho
Fuente: Propia

La planta piloto operó con un caudal de 1,35 L/min gracias al trabajo realizado por un dosificador de cabeza constante. Considerando que:

$$1,35 \frac{L}{min} \approx 2000 \frac{L}{día}, \text{ y la dotación neta de } 130 \frac{L}{hab*día} \text{ (Resolución 330, 2017)}$$

Entonces el cartucho es capaz de abastecer 15 habitantes.

El tiempo de retención en el cartucho fue de aproximadamente de 5 minutos, valores cercanos a los recomendados por Bravo & Caicedo (2019).

En campo, el montaje del sistema se ilustra en la Figura 4 y Foto 1, compuesto por un tanque de carga, donde se almacenó el agua del afluente. Se dispuso un mecanismo de llenado compuesto por una válvula de flotador para bebedero de ganado, el cual requiere bajas presiones para suspender la entrada de agua cuando esta llega a la altura esperada. El tanque de almacenamiento se conectó al sistema de filtración por una conducción, la cual llegaba a una cámara de aquietamiento, correspondiente a un tubo de PVC de 1" por 50 cm de altura, cuya función fue mantener el cartucho libre de aire durante la operación. Finalmente, para la determinación de la presión de carga, fueron instalados dos piezómetros: uno antes y otro después del tratamiento de agua efectuado por el dispositivo.

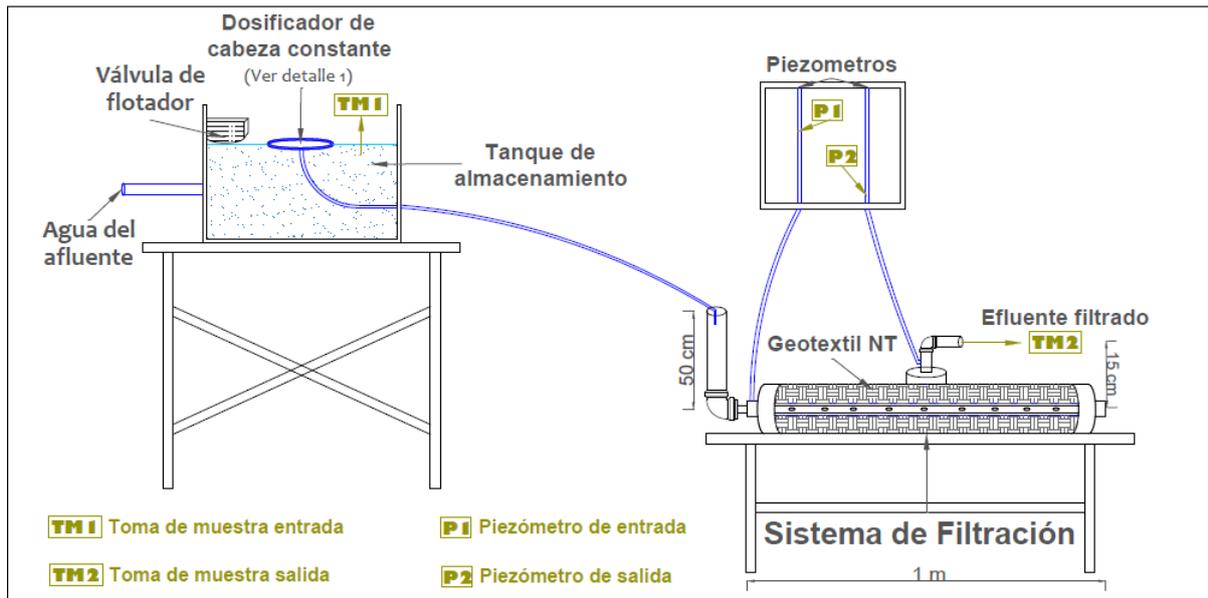


Figura 4. Montaje en campo del dispositivo
Fuente: Propia

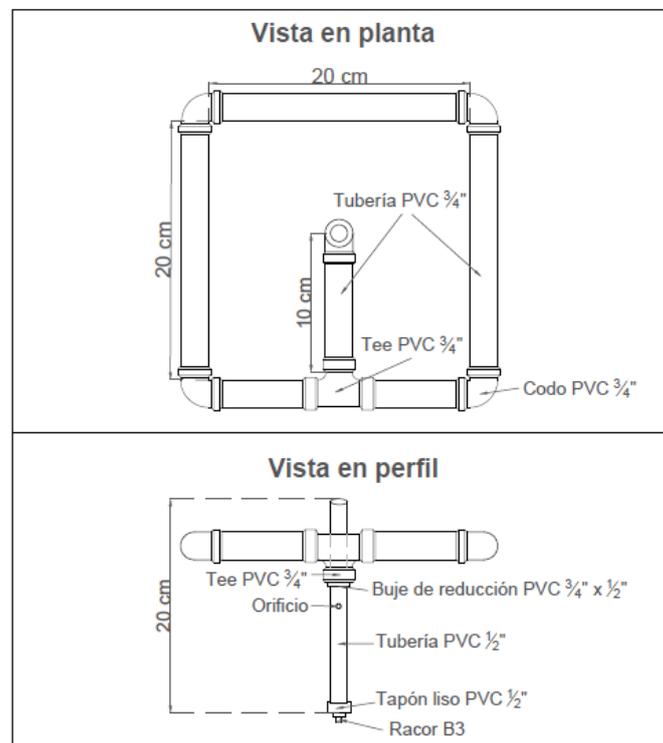


Figura 5. Detalle 1: Dosificador de cabeza constante
Fuente: Propia



Foto 1. Planta piloto: (1) Montaje en campo, (2) Sistema de filtración y piezómetros, y (3) Tanque de almacenamiento

Fuente: Propia

Para el lavado posterior a cada carrera de filtración, se extendió el geotextil sobre una superficie limpia, con flujo de agua a presión se retiraron las impurezas adheridas, y finalmente se dispuso a secar al aire libre. El cartucho y aditamentos también se lavaron con agua y cloro para remover el lodo que quedaba luego del funcionamiento.

5.4. METODOLOGÍA PARA EL OBJETIVO 1

Con el propósito de conocer la eficiencia de remoción del sistema, se midieron los parámetros de calidad de agua: sólidos suspendidos, turbiedad, color, coliformes totales y fecales. Los puntos de muestreo considerados fueron la entrada y salida, los cuales fueron denominados como toma de muestra 1 y 2 respectivamente (TM1, TM2) ilustrados en la Figura 4, aclarando que la toma de muestra uno se realizó en la parte superficial del tanque de almacenamiento. En

la tabla 2 se presentan los métodos de medición según el *Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2005)*, el tipo, frecuencia de muestreo, el número de datos obtenidos por carrera de filtración, y las unidades de medida en la que se expresarán dichos datos.

Tabla 2. Evaluación de los parámetros de calidad de agua por cada carrera de filtración

Parámetro	Método de referencia para muestreo	Tipo de muestra	Frecuencia de muestreo	Número de datos	Unidad de medida
Sólidos suspendidos	Filtración y secado	Compuesta	Una muestra compuesta por día	5	Miligramos / Litro (mg/L)
Turbiedad	Nefelométrico 2130-B	Puntual	Tres muestras por día	15	Unidades Nefelométricas de Turbidez (UNT)
Color	Espectrofotométrico 2120-C	Puntual	Tres muestras por día	15	Unidades de Platino Cobalto (UPC)
Coliformes totales	Filtración por membrana	Puntual	Tres muestras por carrera de filtración	3	Conteo de Unidades Formadoras de Colonia (UFC/100mL)
Coliformes fecales	Filtración por membrana	Puntual	Tres muestras por carrera de filtración	3	Conteo de Unidades Formadoras de Colonia (UFC/100mL)

Los análisis de los parámetros se realizaron en tres laboratorios diferentes. La determinación de sólidos suspendidos, se efectuó en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental y Sanitaria la Universidad del Cauca; la turbiedad y color fue monitoreada en el Laboratorio de la Planta de Tratamiento de Agua Potable Tulcán; y las muestras para el análisis microbiológico fueron procesadas en el Laboratorio de Biología adscrito a la Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y de la Educación de la Universidad del Cauca.

Finalmente se determinó si para cada parámetro existen o no diferencias significativas entre la entrada y salida del sistema de filtración, a través de pruebas de hipótesis. Verificada dichas diferencias, se calculó las eficiencias de remoción, tal y como se muestra en la ecuación 1.

$$Eficiencia\ de\ Remoción\ (\%) = \frac{Entrada - Salida}{Entrada} * 100$$

Ecuación 1. Eficiencia de remoción

5.5. METODOLOGÍA PARA EL OBJETIVO 2

El comportamiento hidráulico del sistema de filtración, se evaluó mediante el monitoreo del caudal (1,35 L/min), que fue garantizado por un dosificador de cabeza constante debidamente calibrado, al cual se le hizo seguimiento con el método volumétrico a la salida. La pérdida de carga se midió con base a los niveles piezométricos de la entrada y salida del proceso de filtración, ilustrados en la figura 4 como P1 y P2 respectivamente, teniendo en cuenta que el piezómetro de salida (P2), permaneció constante durante cada carrera de filtración. Con lo anterior, se tiene que:

$$\text{Pérdida de carga} = P1 - P2$$

Ecuación 2. Pérdida de carga

La toma de caudales y pérdidas de carga se llevó a cabo tres veces al día, durante los 5 días de la carrera de filtración. El conjunto de datos recolectados fue analizado por medio de gráficas que relacionaron la variación del caudal y la pérdida de carga en el tiempo, para conocer el comportamiento de carácter hidráulico del sistema de filtración. Para el caso de la pérdida de carga se ajustaron los datos a una tendencia lineal, además se analizó el porcentaje de la pérdida de carga respecto al porcentaje de tiempo transcurrido.

6. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1. CALIDAD DEL AGUA DEL AFLUENTE

Durante el desarrollo de esta investigación, se monitorearon los parámetros de calidad del agua cruda proveniente del Río Molino, la cual ingresaba al sistema de filtración mediante una manguera alimentada por un tanque de almacenamiento. Durante cada una de las semanas en las que se llevó a cabo el trabajo experimental, se presentaron variaciones en la calidad del agua en los diferentes parámetros fisicoquímicos y microbiológicos tal como se resume en la Tabla 3. La dispersión de los datos se les atribuye a diferentes causas, como la variabilidad del clima, precipitaciones, y la exposición a la que se encontraba el tanque de almacenamiento.

Tabla 3. Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del agua cruda

	Turbiedad (UNT)	Sólidos suspendidos (mg/L)	Color UPC	Coliformes Totales (UFC/100mL)	Coliformes Fecales (UFC/100mL)
Promedio	10.8	14.3	18.3	40	5
Desviación estándar	11.1	9.3	16.5	18	2
Valor máximo	69.1	35.6	110.0	72	9
Valor mínimo	1.9	5.0	7.0	18	2
Número de datos	45	15	45	9	9

De Acuerdo al Título B del Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS, 2000) las medias de los parámetros de calidad de agua del Río Molino reportadas durante este estudio, indican que dicha fuente tiene un nivel regular, lo que no exigiría un tratamiento convencional ni específico, pero sí la implementación de procesos como la filtración lenta o directa, y la desinfección.

6.2. PARÁMETROS DE CALIDAD DEL AGUA

A continuación, se presenta la descripción del comportamiento y las estadísticas obtenidas para los parámetros de calidad de agua correspondientes a turbiedad, sólidos suspendidos totales (SST), color aparente, coliformes totales y coliformes fecales tanto para el agua cruda como para el agua filtrada.

6.2.1. TURBIEDAD

Durante el periodo de estudio fue posible evaluar el sistema de filtración en condiciones de picos de turbiedad tanto altos como bajos, tal como se observa en la figura 6.

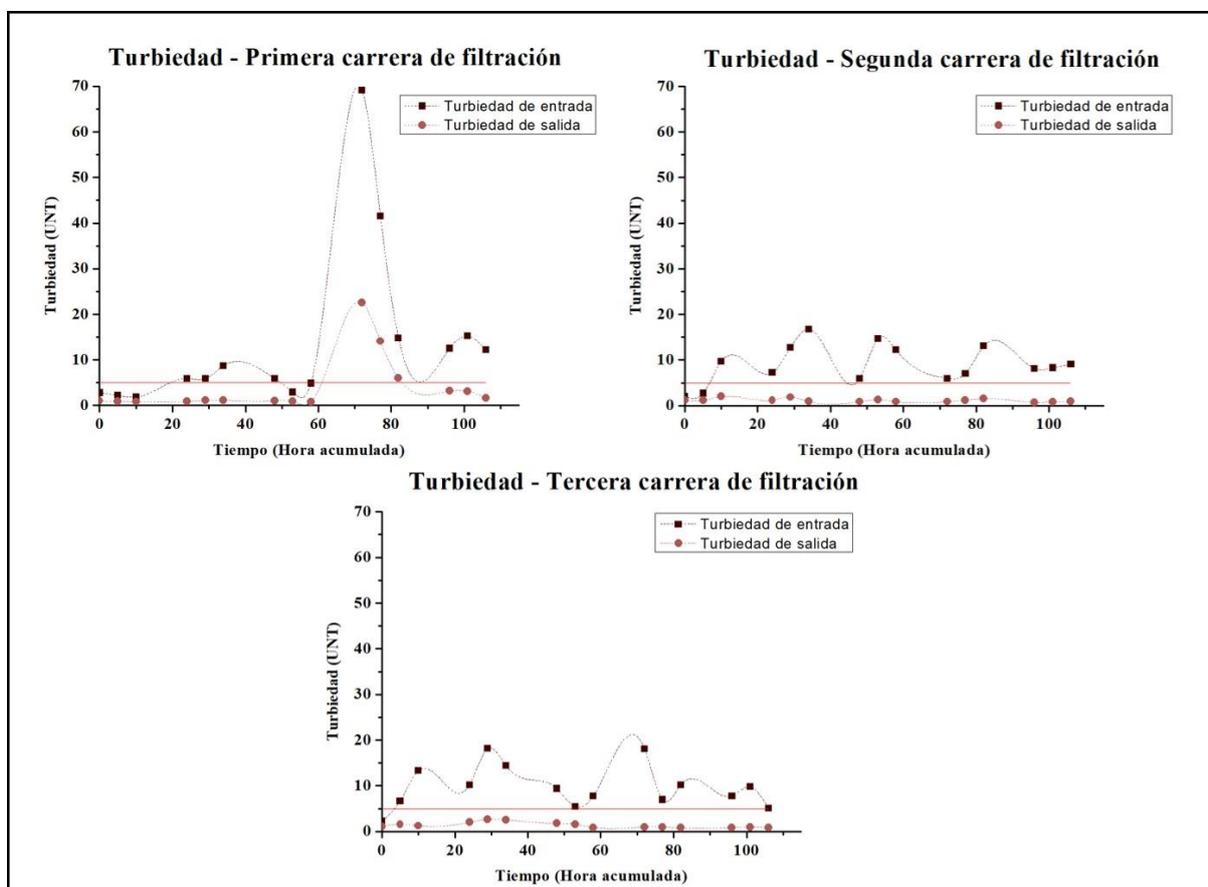


Figura 6. Turbiedades de entrada y salida para cada carrera de filtración.

En general, las turbiedades de entrada se mantuvieron relativamente constantes a excepción de la Carrera 1, en donde se obtuvo el valor de turbiedad más alto (69.1 UNT) así como la desviación más alta de la totalidad de carreras (18.2). Este pico fue ocasionado por una fuerte

lluvia presentada en horas de la madrugada en la bocatoma del Río Molino en el tercer día de funcionamiento del sistema, lo que provocó un aumento en la cantidad de sedimentos arrastrados y materia en suspensión que ingresaron al filtro. Las otras dos carreras de filtración presentaron promedios de turbiedades de entrada muy similares, así como desviaciones muy bajas. Las turbiedades de salida se mantuvieron en su mayoría por debajo de 2 UNT (Según la resolución 2115 del 2007 - Artículo 2, es el límite permisible para aguas de consumo humano) lo que se puede apreciar en la Tabla 4, en donde los promedios del agua filtrada de la segunda y tercera carrera de filtración fueron de 1.2 y 1.4 UNT respectivamente

Considerando que el cartucho ha sido diseñado como un sistema de pretratamiento, lo cual indica que el agua efluente debe ser sometida a otro proceso, que en el caso particular de la FiME corresponde a los filtros lentos en arena, la calidad del agua producida facilitaría el tratamiento por este tipo de unidades. Para prevenir colmataciones frecuentes, Cleasby et al., 1984 (Citado por Galvis et al., 1999) recomienda que a la entrada de los FLA las turbiedades sean menores a 5 UNT. Los resultados obtenidos en esta investigación muestran que tan solo 3 de los 45 datos correspondientes a turbiedad de salida superan este valor recomendado (Ver Anexo 1), además que los valores promedio de turbiedades del efluente son de 3.9, 1.2 y 1.4 UNT para las réplicas 1, 2 y 3 respectivamente como se puede apreciar en la Tabla 4, de tal forma que el cartucho podría ser una opción muy efectiva para los filtros lentos en arena.

Tabla 4. Parámetros de calidad de agua, turbiedad (UNT)

Réplica	Parámetro estadístico	Agua cruda	Agua filtrada
1	Promedio	13.8	3.9
	Desviación estándar	18.2	6.2
	Valor máximo	69.1	22.6
	Valor mínimo	1.9	0.8
	Número de datos	15	15
2	Promedio	9.0	1.2
	Desviación estándar	4.2	0.4
	Valor máximo	16.8	2.0
	Valor mínimo	2.0	0.7
	Número de datos	15	15
3	Promedio	9.7	1.4
	Desviación estándar	4.6	0.6
	Valor máximo	18.1	2.7
	Valor mínimo	2.3	0.8
	Número de datos	15	15

6.2.2. COLOR APARENTE

Para la variación de color aparente presentada en la Figura 7, los datos para segunda y tercera carrera de filtración de agua cruda fluctuaron en rangos que apenas superaban el límite permisible (Para aguas de consumo humano la resolución 2115 del 2007 - Artículo 2 los valores de referencia para color son hasta 15 UPC), mientras que en la carrera de filtración número uno reportó un valor atípico al comportamiento (110 UPC) a las 72 horas de funcionamiento, producto de fuertes precipitaciones en la zona, que generó aumento de la materia disuelta y en suspensión, y por ende tal pico de color; sin embargo, rápidamente el filtro intentó regularse en el tiempo restante de duración de carrera, y su comportamiento se asemejó al presentado en las réplicas 2 y 3.

El color aparente muestra una tendencia de regularidad a la salida del filtro, ya que a pesar de arrojar valores por encima de la norma en el agua filtrada cuando se presentan picos máximos de color a la entrada, se puede apreciar que en los datos promedio el dispositivo es capaz de entregar agua con color aparente menor a 15 UPC.

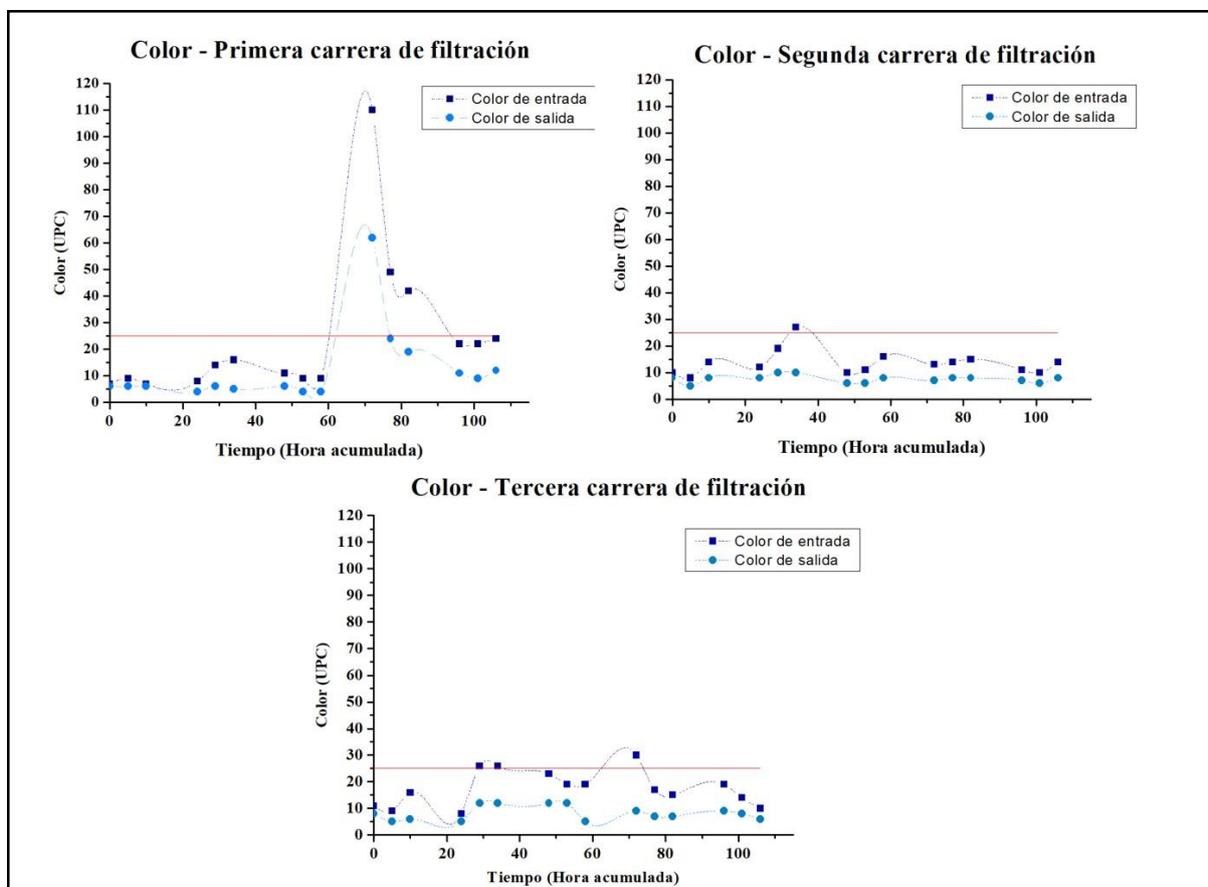


Figura 7. Color aparente de entrada y salida para cada carrera filtración.

Para un buen desempeño de los FLA, se recomiendan valores de hasta 25 UPC (Spencer et al, 1991 Citado por Galvis et al., 1999) de color real en el afluente. Del total de datos registrados (45) para color aparente en esta investigación, el 97.8% de ellos se encuentran por debajo del rango expuesto anteriormente, así como se evidencia en la Tabla 5, en donde los valores

promedio para la réplica 1, 2 y 3 son 12.3 ,7.5 y 8.2 respectivamente, por lo que el sistema evaluado podría realizar un muy buen trabajo de pretratamiento para estos filtros, teniendo en cuenta además que el color aparente contiene partículas en suspensión, por lo que al determinar el color real del efluente del sistema de filtración, se obtendrían valores aún menores.

Tabla 5. Parámetros de calidad del agua, color (UPC)

Réplica	Parámetro estadístico	Agua cruda	Agua filtrada
1	Promedio	23.9	12.3
	Desviación estándar	27.0	14.9
	Valor máximo	110.0	62.0
	Valor mínimo	7.0	4.0
	Número de datos	15	15
2	Promedio	13.6	7.5
	Desviación estándar	4.7	1.4
	Valor máximo	27.0	10.0
	Valor mínimo	8.0	5.0
	Número de datos	15	15
3	Promedio	17.5	8.2
	Desviación estándar	6.7	2.7
	Valor máximo	30.0	12.0
	Valor mínimo	8.0	5.0
	Número de datos	15	15

6.2.3. SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (SST)

Como se ha mencionado anteriormente, el filtro estuvo expuesto a distintas condiciones meteorológicas, de modo que al igual que los dos parámetros previos, se presentó variabilidad en los resultados reportados. Para sólidos suspendidos totales a la entrada del sistema, los datos oscilaron entre 5.0 mg/L y 35.6 mg/L, y los valores de salida se presentaron desde 0.6 mg/L hasta los 3.3 mg/L. Las fuertes lluvias de la primera carrera de filtración que elevaron la turbiedad y color, también afectaron los SST, originando el dato más alto durante todo el estudio, tal y como se muestra en la Tabla 6 y Figura 8.

Sin embargo, a pesar de los picos presentados, la cantidad de SST promedio según la Tabla 6 a la salida no superó los 2.0 mg/L, lo que establece una gran tolerancia del filtro para cambios de calidad de agua del afluente para efectos de sólidos suspendidos totales, teniendo en cuenta que como carga máxima de entrada a los Filtros Lentos en Arena, se recomiendan concentraciones por debajo de los 5mg/L (Wegelin, 1986. Citado por Galvis et al., 1999) con el fin de evitar el lavado frecuente de los FLA producto de las colmataciones.

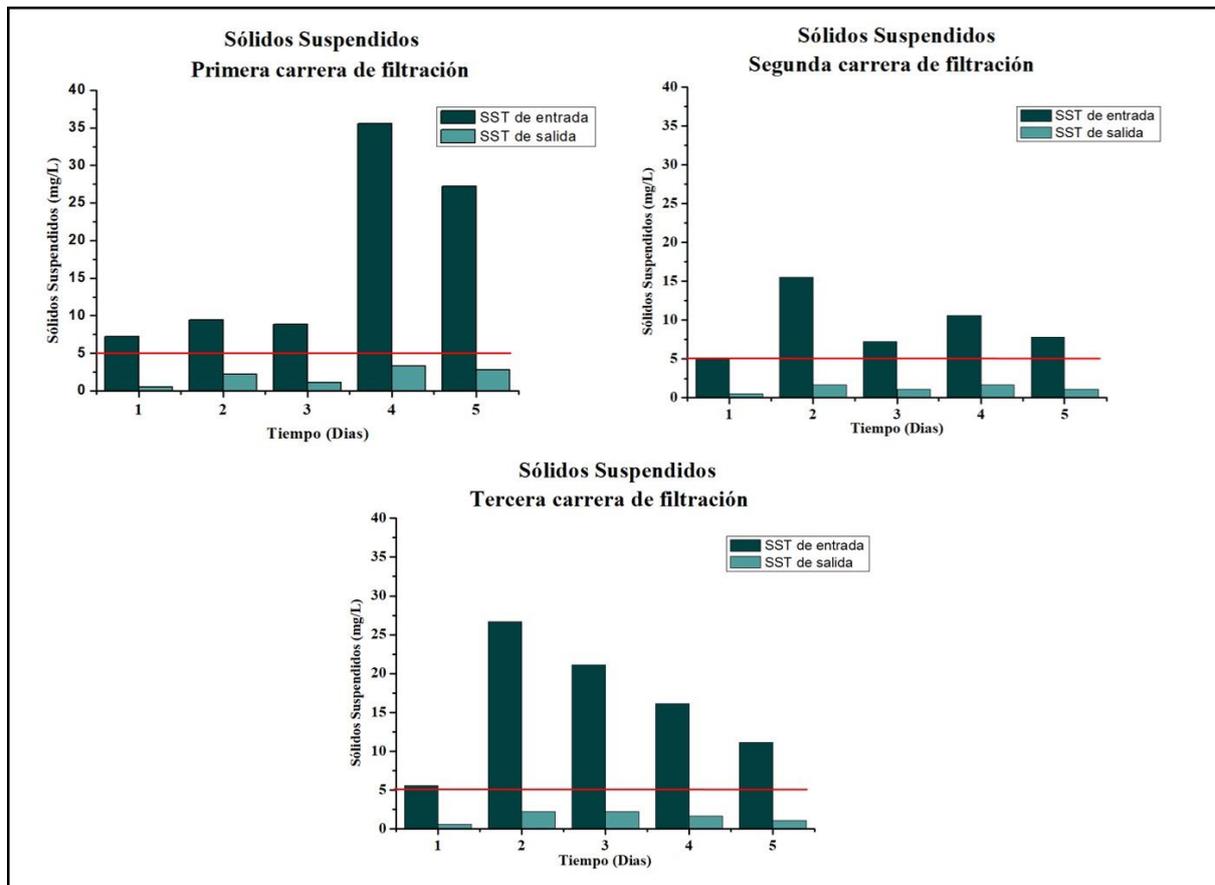


Figura 8. Sólidos suspendidos totales de entrada y salida para cada carrera filtración.

Tabla 6. Parámetros de calidad de agua, SST (mg/L)

Réplica	Parámetro estadístico	Agua cruda	Agua filtrada
1	Promedio	17.7	2.0
	Desviación estándar	12.9	1.2
	Valor máximo	35.6	3.3
	Valor mínimo	7.2	0.6
	Número de datos	5	5
2	Promedio	9.2	1.2
	Desviación estándar	4.1	0.5
	Valor máximo	15.6	1.7
	Valor mínimo	5.0	0.6
	Número de datos	5	5
3	Promedio	16.1	1.6
	Desviación estándar	8.3	0.7
	Valor máximo	26.7	2.2
	Valor mínimo	5.6	0.6
	Número de datos	5	5

6.2.4. COLIFORMES TOTALES

Durante el periodo de investigación, el afluente presentó una concentración promedio de 40 UFC/100mL, parámetro que osciló entre 18 y 72 UFC/100mL, mientras que el efluente reportó una media de 35 UFC/100mL, entre el rango de 8 a 71 UFC/100mL. Como se puede apreciar en la Figura 9 y Tabla 7, los valores tanto de entrada como de salida de coliformes totales fueron incrementándose con el transcurso de los cinco días de cada carrera de filtración.

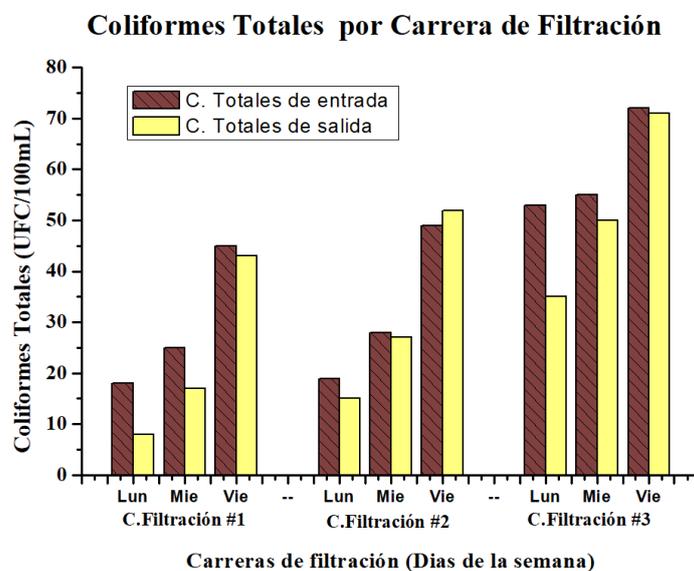


Figura 9. Coliformes totales de entrada y salida para cada carrera filtración.

Tabla 7. Parámetros de calidad de agua, coliformes totales (UFC/100mL)

Réplica	Parámetro estadístico	Agua cruda	Agua filtrada
1	Promedio	29	23
	Desviación estándar	14.0	18.2
	Valor máximo	45	43
	Valor mínimo	18	8
	Numero de datos	3	3
2	Promedio	32	31
	Desviación estándar	15.4	18.9
	Valor máximo	49	52
	Valor mínimo	19	15
	Número de datos	3	3
3	Promedio	60	52
	Desviación estándar	10.4	18.1
	Valor máximo	72	71
	Valor mínimo	53	35
	Número de datos	3	3

El aumento progresivo en las concentraciones de entrada y salida desde el punto de vista teórico pudo ser causado por la formación de una biopelícula en los aditamentos que hacían parte de todo el sistema de filtración. Es importante destacar que dicho proceso se compone de tres etapas (Figura 10): 1) adherencia del microorganismo a la superficie; 2) producción de la matriz extracelular de las bacterias o maduración, y 3) desprendimiento de parte de la biopelícula al medio (Vila et al., 2008)

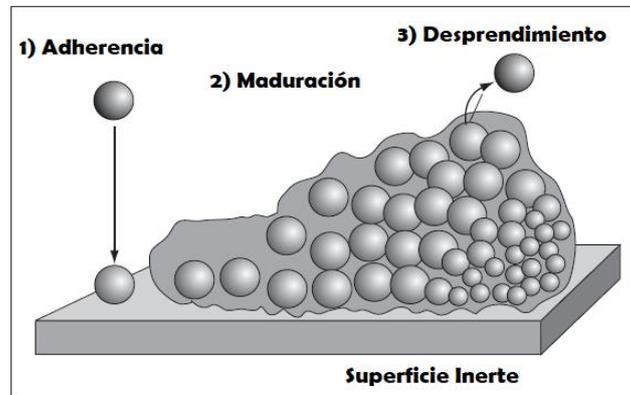


Figura 10. Pasos implicados en la formación de una biopelícula
Fuente: (Vila et al., 2008)

El incremento de las concentraciones de coliformes totales reportadas a la entrada del sistema durante los tres días de muestreo en cada carrera, puede atribuirse a que la manguera que alimentaba el tanque de almacenamiento del filtro con agua del receptor de la Planta de Tratamiento de Agua Potable Tulcán, pudo verse afectada por la generación de la biocapa bacteriana; incluso era observable una tonalidad oscura producto de alrededor de seis meses de funcionamiento, desde que se instaló el montaje de la investigación en un estudio preliminar hasta la fecha de toma de muestras definitivas. La posible acumulación de materia orgánica (Proveniente del afluente) en el interior de la manguera, pudo generar el ambiente propicio para que los microorganismos presentes en la masa de agua circulante se adhirieran a este sustrato, y aumentarían su número de colonias gracias a los macro y micronutrientes que están presentes en el flujo de agua cruda natural, haciendo que la biopelícula creciera en tamaño con el pasar del tiempo tanto por el incremento de la población bacteriana, como por la excreción de sustancias de desecho poliméricas (SPE) (Characklís, 1988. Citado por Knobelsdorf & Mujerieg, 1997)

Se presume que el aumento en las concentraciones a la salida del filtro pudo ser ocasionado por el mismo proceso de formación de biopelícula, solo que ahora en el interior del cartucho, de modo que los microorganismos se adhieren tanto al geotextil como al PVC, debido a su afinidad con esos materiales (Knobelsdorf & Mujerieg, 1997); sin embargo, con el pasar de las horas, puede existir desprendimiento de una fracción de la biocapa al finalizar la carrera de filtración, haciendo que las colonias resultaran en el efluente, llegando a valores muy cercanos a las concentraciones de entrada, incluso en uno de los días de muestreo, las unidades formadoras de colonia de salida superaron a las de entrada (Ver Anexo 1, Tabla 21).

Cabe resaltar que el presente estudio no fue diseñado para comprobar el argumento teórico planteado, se necesitarían más pruebas microbiológicas que evalúen otros microorganismos por ejemplo los protozoarios, y las relaciones de competencia con las bacterias.

Teniendo en cuenta que la concentración máxima de unidades formadoras de colonias a la salida del filtro es de 71 UFC/100mL (Ver Anexo 1), y que el cartucho estudiado se plantea como pretratamiento al agua, se recomienda instalar un sistema de cloración posterior con el fin de garantizar un agua de mejor calidad.

6.2.5. COLIFORMES FECALES

La concentración promedio de coliformes fecales de entrada fue de 5 UFC/100mL, y a la salida de 4 UFC/100mL. Tal como se ve en la Tabla 8 y Figura 11, la cantidad de bacterias es muy similar en el afluente y el efluente, incluso para la tercera muestra de la carrera de filtración dos el conteo de colonias es superior a final del filtro, que antes del proceso. Aunque no se reporta un límite máximo por parte de la normatividad colombiana para aguas naturales que van a ser objeto de tratamiento, el ideal es que la concentración sea cercana a cero, puesto que la existencia de coliformes fecales indica contaminación con aguas negras u otro tipo de desechos en descomposición, relacionado en su mayoría a la bacteria patógena *Escherichia coli*, la cual si no es removida, representa un riesgo para la salud.

Tabla 8. Parámetros de calidad de agua, coliformes fecales (UFC/100mL)

Réplica	Parámetro estadístico	Agua cruda	Agua filtrada
1	Promedio	6	5
	Desviación estándar	3.8	3.6
	Valor máximo	9	8
	Valor mínimo	2	1
	Número de datos	3	3
2	Promedio	4	4
	Desviación estándar	0.0	1.0
	Valor máximo	4	5
	Valor mínimo	4	3
	Número de datos	3	3
3	Promedio	4	3
	Desviación estándar	0.6	1.0
	Valor máximo	4	4
	Valor mínimo	3	2
	Número de datos	3	3

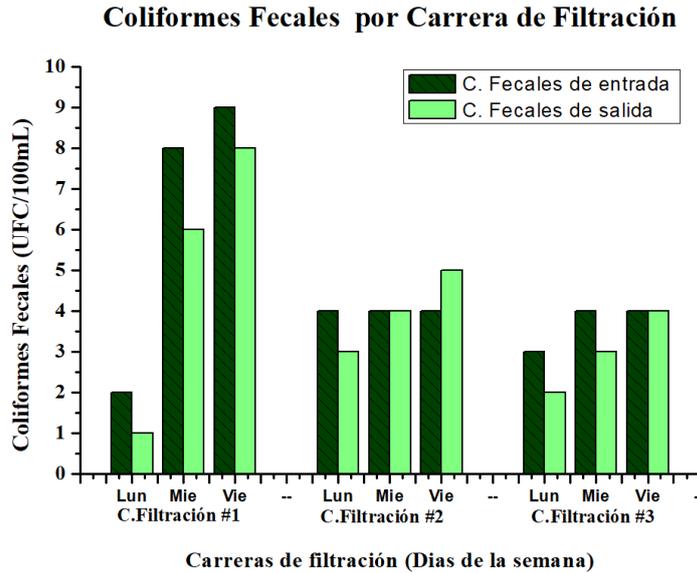


Figura 11. Coliformes fecales de entrada y salida para cada carrera filtración.

La totalidad de los datos experimentales detallados de los anteriores parámetros para cada réplica se presentan en el Anexo 1.

6.3. EFICIENCIAS DE REMOCIÓN

Para datos de entrada y salida del sistema de filtración evaluado, primero se verificó la existencia de diferencias significativas por medio de un tratamiento estadístico en el software IBM SPSS Statistics dos pasos: primero, se determinó el tipo de distribución mediante la prueba Shapiro-Wilk, que permite verificar si las puntuaciones de la muestra siguen o no una distribución normal, para grupos de datos menores a 50. Luego, conociendo el tipo de distribución no normal de estos, se procedió a seleccionar una prueba de hipótesis adecuada para el grupo de datos evaluados, la escogida fue la prueba Mann-Whitney, la cual es conocida como la versión no paramétrica de la habitual prueba "t" de Student.

Los resultados arrojaron que en términos de turbiedad, color, y sólidos suspendidos, se pudo comprobar que existen diferencias significativas entre el agua del afluente y la del efluente del filtro con un 95% de confianza; sin embargo, para coliformes totales y fecales la hipótesis nula planteada no se podía rechazar, es decir que no hay suficiente evidencia para asegurar que existen diferencias significativas entre los datos del afluente y efluente del cartucho.

Los resultados a detalle para las pruebas Shapiro-Wilk y Mann-Whitney se encuentran en el Anexo 2.

Finalmente comprobadas las diferencias significativas entre la entrada y la salida del filtro, se determinó las eficiencias de remoción para turbiedad, color aparente, y sólidos suspendidos totales (SST), en cada una de las réplicas.

Tabla 9. Eficiencia de remoción para turbiedad, color, y SST para cada réplica.

Réplica		Turbiedad	Sólidos suspendidos	Color
1	Eficiencia promedio (%)	73.49	87.34	46.86
	Desviación estándar	10.80	6.32	15.38
2	Eficiencia promedio (%)	82.46	86.54	42.29
	Desviación estándar	14.67	2.39	9.27
3	Eficiencia promedio (%)	82.94	90.16	50.36
	Desviación estándar	10.65	0.87	12.74
Eficiencia promedio total (%)		79.63	88.01	46.50

6.3.1. EFICIENCIA PARA TURBIEDAD

Las remociones promedio de turbiedad para las réplicas 1, 2 y 3, se encuentran consignadas en la Tabla 9, con valores de 73.49%, 82.46% y 82.94% respectivamente, alcanzando una eficiencia promedio total de 79.63%. Estas eficiencias de remoción fueron superiores a las reportadas por Bravo & Caicedo (2019) para el mismo cartucho de 8.1cm de espesor empleado, quienes obtuvieron valores entre 49.87% y 72.45% de remoción. Las mayores eficiencias de remoción promedio se alcanzaron en la réplica 3, en donde se tuvo un promedio bajo de turbiedad de salida de 1.379 UNT, mientras que las menores fueron obtenidas en la réplica 1, en donde se presentó el valor de turbiedad promedio del efluente más alto, correspondiente a 3.944 UNT; lo anterior debido a que los índices medios de turbiedad de entrada en la réplica 3 son considerablemente más bajos que para la réplica 1.

En la Tabla 10 se encuentran los valores de turbiedad de entrada y las eficiencias de remoción en el filtro para diferentes intervalos de unidades nefelométricas de turbiedad en el agua cruda.

Tabla 10. Influencia de la turbiedad de entrada en la eficiencia de remoción.

Rango turbiedad (UNT)	Número de datos	Porcentaje de datos	Promedio entrada	Promedio salida	Eficiencia (%)
0-2	2	4.44	1.93	1.01	47.53
2-5	6	10.91	2.96	0.97	67.21
5-10	20	44.44	7.34	1.11	84.86
10-20	15	33.33	13.90	2.03	85.36
20-70	2	4.44	55.30	18.35	66.82

A medida que las turbiedades del afluente aumentan, se puede apreciar también el incremento en las eficiencias de remoción para este parámetro, comportamiento válido hasta concentraciones de entrada de 20 UNT. Para turbiedades por encima de este valor, las eficiencias disminuyen en casi un 20%, aunque se siguen presentando remociones de más del 50%. Lo anterior también se puede apreciar en la Tabla 9, en donde la eficiencia promedio para la réplica 1 es la más baja, siendo esta carrera en donde se presentaron los picos de turbiedad ocasionados por las lluvias presentadas en el tercer día de funcionamiento del filtro.

De 0 a 20 UNT el comportamiento general de la eficiencia de remoción para la turbiedad del sistema fue concordante al presentado por Fernández et al. (2010), en donde aseguraba que entre mayor sea la turbiedad del agua cruda, habría una mayor eficiencia de remoción, puesto que la acumulación de lodo en los filtros aumentaría la superficie específica. No obstante, los datos referentes al día con fuertes precipitaciones, no cumplieron dicho patrón, posiblemente porque el lodo que ingresó al sistema en vez de aumentar el área superficial específica, obstruyó los poros del geotextil, causando una disminución en la eficiencia de remoción, hasta que el sistema fue capaz de regularse de nuevo.

6.3.2. EFICIENCIA PARA COLOR

Como se observa en la Tabla 9, las remociones promedio de color aparente fueron de 46.86%, 42.29% y 50.36% para la réplica 1, 2 y 3 respectivamente; en promedio la remoción para este parámetro fue de 46.50%. Es de notar que la capacidad de remoción del color, en comparación con los otros parámetros físico químicos es la menor, lo que va en concordancia con el estudio realizado por Bravo & Caicedo (2019), que reportó una media de remoción de color aparente para agua sintética de laboratorio de 53,43% con el mismo diseño de cartucho empleado en la presente investigación. La remoción poco significativa de color aparente, es un patrón que caracteriza los geotextiles sintéticos NT, como lo muestran varios estudios que empleando este material como medio filtrante principal o auxiliar, reportan remociones aún más bajas (Hoyos & Méndez, 2016. Palechor & Pérez, 2017. y Capote & Leyton, 2018).

La Tabla 11, muestra la tendencia de la remoción presentada, en donde se aprecia que si el color aparente aumenta, mayor porcentaje de eficiencia se presenta.

Tabla 11. Influencia del color aparente de entrada en la eficiencia de remoción.

Rango color (UPC)	Número de datos	Porcentaje de datos	Promedio entrada	Promedio salida	Eficiencia (%)
0-8	2	4.44	7.0	6.0	14.29
8-12	15	33.33	9.6	5.7	40.28
12-20	17	37.78	15.6	7.6	51.13
20-110	11	24.44	36.5	17.5	52.12

La eficiencia máxima se alcanza en el intervalo de valores mayores a 20UPC, aunque se puede notar que el incremento en la eficiencia entre los últimos dos rangos es de alrededor del 1%,

por lo que es probable que con valores de entrada mayores a 20UPC, las eficiencias no aumenten de forma considerable como en los intervalos anteriores.

6.3.3. EFICIENCIA PARA SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (SST)

Las remociones para sólidos suspendidos totales que presenta la Tabla 9 fueron 87.34%, 86.54% y 90.16% en el orden de carreras de filtración; con un valor medio de 88.01%. Este parámetro es el que arroja mayor eficiencia, incluso está por encima de las reportadas por el estudio previo de Bravo & Caicedo (2019). Cabe resaltar que en la investigación mencionada se simularon las condiciones del agua en el laboratorio, mientras que en la presente se sometió el dispositivo a las características reales del agua cruda de un río, lo cual está relacionado para el caso de los SST, en que estos son originados por la erosión en la rivera de los ríos y el plancton existente en el mismo (Grupo de Estudio Técnico Ambiental - GESTA AGUA, n.d.), de modo que habrá mayor regularidad en la presencia de SST en el afluente de un agua cruda.

Como la relación entre la concentración de sólidos en el afluente y la superficie específica del geotextil sintético NT es directamente proporcional debido al proceso de acumulación de sólidos (Fernández, et al., 2010), las eficiencias de remoción también aumentan como se puede apreciar en la Tabla 12, en donde en el intervalo de concentraciones mayores a 20 mg/L, presenta el porcentaje de eficiencia de remoción más elevado, correspondiente al 90.45%. Aunque independientemente de los rangos establecidos, se observa que la eficiencia porcentual no varía mucho en el tiempo, y por lo contrario es bastante estable, lo cual es una característica que le otorga resiliencia al dispositivo pues en los promedios de salida lo valores reportados no alcanzan los 3 mg/L, aun cuando entran cantidades de SST por encima de los 20 mg/L.

Tabla 12. Influencia de los SST de entrada en la eficiencia de remoción.

Rango SST (mg/L)	Número de datos	Porcentaje de datos	Promedio entrada	Promedio salida	Eficiencia (%)
0-8	5	33.33	6.56	0.78	88.14
8-20	6	40.00	11.94	1.57	86.82
20-35	4	26.67	27.64	2.64	90.45

6.4. COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO

Para la evaluación del cartucho, se monitoreó dos aspectos de importancia hidráulica, como lo es el caudal, el cual tuvo un comportamiento constante, y la pérdida de carga que creció en el tiempo.

6.4.1. CAUDAL

A lo largo de la investigación se monitoreó el caudal a la salida del sistema de filtración mediante el método volumétrico, el cual permaneció relativamente constante al largo de las tres carreras de filtración, como lo muestra la tabla 13. Se tuvieron variaciones entre el -8 y el

4%. La poca variabilidad del caudal se debe al trabajo realizado por el dosificador de cabeza constante que, mediante su orificio, aseguró el aporte de un mismo flujo de agua durante el funcionamiento del cartucho.

Tabla 13. Comportamiento del caudal (mL/min)

Réplica	Parámetro estadístico	Q (mL/min)
1	Promedio	1365.56
	Desviación estándar	10.92
	Valor máximo	1388.89
	Valor mínimo	1352.38
	Numero de datos	15
2	Promedio	1307.93
	Desviación estándar	35.19
	Valor máximo	1372.55
	Valor mínimo	1243.37
	Número de datos	15
3	Promedio	1336.71
	Desviación estándar	16.48
	Valor máximo	1371.43
	Valor mínimo	1309.64
	Numero de datos	15

En la Figura 12, el descenso pronunciado en la segunda carrera de filtración fue atribuido a una obstrucción en el dosificador generada por un insecto que quedó atrapado al interior del mismo, anomalía detectada en el proceso de lavado al finalizar dicha carrera.

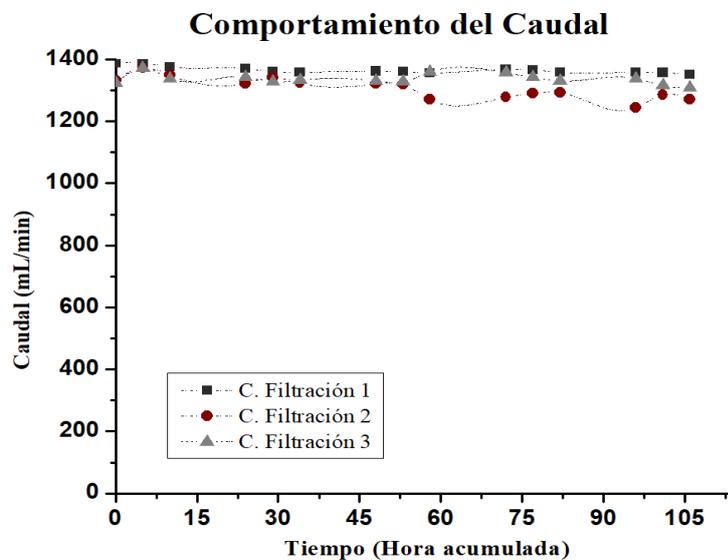


Figura 12. Caudal vs tiempo para cada carrera de filtración.

6.4.2. PÉRDIDA DE CARGA

La pérdida de carga se determinó con la diferencia de los niveles piezométricos para las tres carreras de filtración evaluadas, ilustradas en la figura 13. El comportamiento de la pérdida de carga fue proporcional al tiempo transcurrido, es decir que, a mayor número de horas de funcionamiento, existió un incremento equivalente en la pérdida de carga.

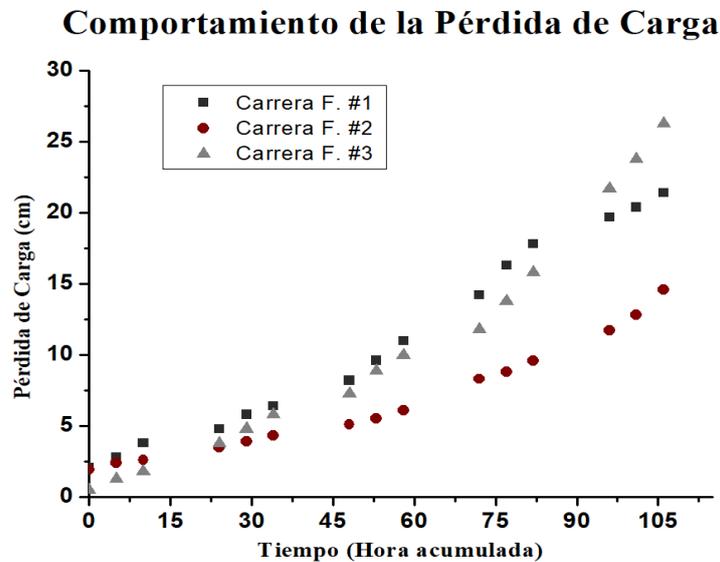


Figura 13. Pérdida de carga vs tiempo para cada carrera de filtración.

Para el final de la primera réplica el valor máximo de pérdida reportado fue de 21.4 cm, para la segunda fue de 14.6 cm y para la tercera de 26.3 cm, las discrepancias de valores se pueden atribuir por una parte a que en la semana dos no se presentaron lluvias, como sí sucedió en las otras semanas de funcionamiento, ya sea en mayor o menor medida, debido a que la lluvia genera en el agua cruda un incremento del material en suspensión, lo que se traduce en una eventual saturación del geotextil producto de las partículas retenidas como se puede apreciar en la Figura 13, y por ende una reducción de su porosidad, que se deriva en la elevación de la pérdida de carga, y a su vez disminuye la duración de carrera. La pérdida de carga también se puede ver influenciada por el lavado del geotextil sintético NT previo a cada carrera, de modo que, si se realiza un mejor lavado, se presentará menores valores de pérdida inicial.

Los datos de pérdida de carga no se asemejan a los obtenidos por la investigación de Bravo & Caicedo (2019). Aunque su duración de carrera fue menor por un día, los valores siguen siendo muy bajos en comparación a los anteriormente expuestos para el mismo diseño de cartucho. En su estudio ellos reportan pérdidas de carga finales por carrera de 7, 17, 4.2 y 4.1cm, razón por la cual se sugería un aumento de la carrera de filtración; mientras en la presente evaluación con agua cruda de río y las condiciones ambientales reales a las que estuvo expuesto el sistema, es poco el aumento de carrera que se pudo definir (1 día adicional) en la evaluación preliminar, porque la pérdida de carga aumentó considerablemente con el agua cruda natural.

Para establecer una tendencia de los datos de pérdida de carga en el tiempo, se optó por determinar el incremento porcentual de todos los valores obtenidos en las tres carreras de filtración, tal y como se muestra en la figura 14. Para la nube de puntos resultante se aplicaron distintos ajustes, el lineal tuvo mayor coeficiente de correlación R^2 (0.9295), a pesar que se esperaba por los resultados de otros estudios que emplearon geotextiles que el comportamiento fuera exponencial, como lo indicó Hoyos & Méndez (2016) y Capote & Leyton (2018), en la utilización de geotextiles sintéticos NT sobre FLA, o también lo concluido por Bravo & Caicedo (2019), que utilizando únicamente el geotextil como pretratamiento, en condiciones similares a las aquí evaluadas, presentó una tendencia exponencial como la más apropiada.

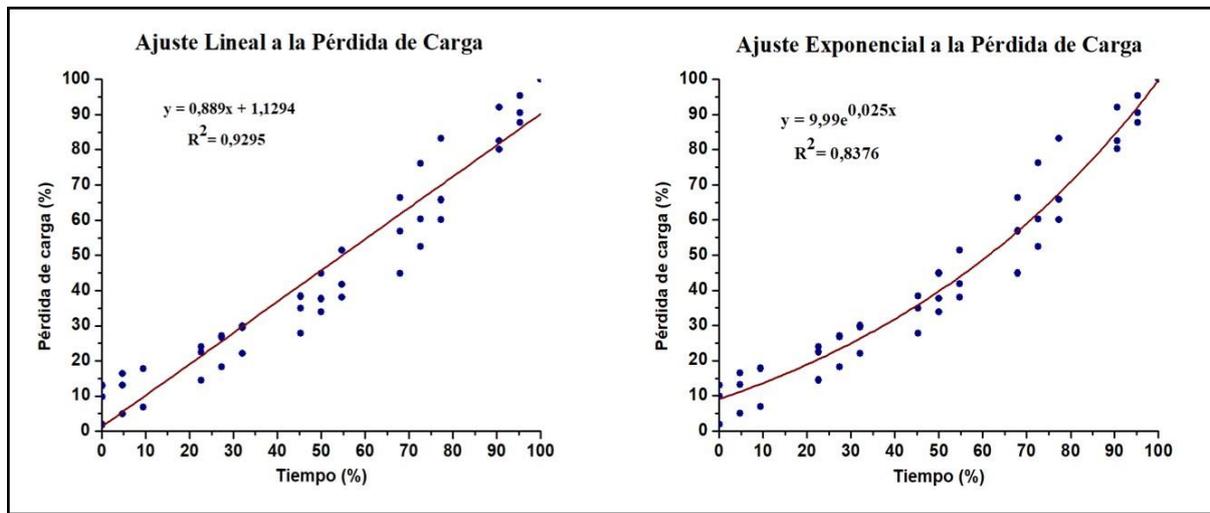


Figura 14. Ajuste de la nube de puntos de pérdida de carga

7. CONCLUSIONES

- El cartucho con geotextil sintético NT 1600, responde a las necesidades de un pretratamiento, particularmente para los filtros lentos en arena, el cual logra entregar una calidad, en términos de turbiedad, sólidos suspendidos y color aparente que optimizarían su funcionamiento. Puede verse también como parte de una solución individual para zonas rurales dispersas.
- El sistema de pretratamiento evaluado puede alcanzar remociones máximas de turbiedad hasta 85.36%, en el rango de 0 a 20 UNT.
- El dispositivo, no presentó remociones considerables para color aparente (46.5%), aunque el valor promedio del efluente cumple a cabalidad los límites permisibles, es importante aclarar que el afluente promedio evaluado en este estudio no estaba lejos de cumplir la norma de calidad, que admite hasta 15 UPC.
- El cartucho presentó remociones máximas de hasta 90.45% en SST en el rango de 20-35 mg/L, lo que se traduce en un efluente altamente clarificado, para lo esperado por una unidad de pretratamiento que está sometida a agua de un río, que usualmente tienen gran cantidad de sólidos.
- El filtro no genera en aguas crudas naturales remociones de coliformes totales y fecales entre la salida y entrada, debido a que no se encontró evidencia suficiente para establecer diferencias significativas.
- El caudal monitoreado no tuvo variaciones considerables, a excepción de un descenso en la segunda carrera de filtración, producto de las condiciones ambientales a la que el dispositivo se vio expuesto. En términos generales, el caudal se mantuvo constante durante la operación, debido al trabajo realizado por el dosificador de cabeza constante.
- El comportamiento de la pérdida de carga se ajustó mejor a una regresión lineal para aguas crudas naturales, comportamiento diferente al concluido por estudios previos que utilizaron agua sintética.

RECOMENDACIONES

- Evaluar el sistema de filtración durante la época de invierno, con el fin de estudiar el comportamiento de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, así como la pérdida de carga en condiciones de lluvias intensas y prolongadas.
- Incluir en futuros trabajos el estudio de otro tipo de microorganismos como los protozoarios, que se encuentran frecuentemente en el agua con contaminación fecal, y por ende con gran incidencia en la salud humana; de modo que se determine la relación entre bacterias y protozoos, para conocer su incidencia en las poblaciones de coliformes.
- Evaluar en un estudio similar otra fuente de abastecimiento de agua, con índices de calidad inferiores a los manejados, y así determinar el comportamiento del filtro bajo condiciones distintas de la calidad del afluente, que se asemejen más a la realidad de las fuentes hídricas.
- Estandarizar el lavado del cartucho, de manera que se pueda garantizar que el dispositivo siempre este limpio previo cada carrera de filtración. Se sugiere estudiar una automatización del lavado.
- Con el fin de no presentar disminuciones en la calidad del agua del efluente, el tiempo máximo recomendado de duración para cada carrera de filtración es de 5 días, teniendo en cuenta que la pérdida de carga máxima no deberá superar los 30cm.

REFERENCIAS

- Bravo, C., & Caicedo, C. (2019). Evaluación comparativa de un cartucho en geotextil sintético no tejido (NT) a diferentes espesores como alternativa de pre-tratamiento de agua para consumo humano.
- Biblioteca virtual de desarrollo sostenible y salud ambiental -BVSDE (n.d.). FILTRACIÓN LENTA. <http://www.bvsde.paho.org/bvsacg/fulltext/desinfeccion/capitulo5.pdf>
- Capote, A., & Leyton, J. (2018). Evaluación del impacto de la velocidad de filtración en filtros lentos en arena con el uso de geotextil NT.
- Cleasby, J. L., Hilmo, D. J., & Dimitracopoulos, C. J. (1984). Slow Sand and Direct In-line Filtration of a Surface Water.
- De Souza, F. F. (2015). Comparação entre os meios filtrantes areia e não-tecido sintético na eficiência da filtração lenta para tratamento de água.
- Departamento de Transportes y Tecnología de Proyectos y Proceso. (n.d.). Definición, función y clasificación de los geotextiles (pp. 122–130).
- Departamento Nacional De Planeación (DNP). (2014). Bases del Plan Nacional de Desarrollo 2014-2018. *Departamento Nacional De Planeación*.
- 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.
- Fernandez, J., Escobar, I., & Andres, W. (2010). Determinación de la viabilidad en uso de geotextil no tejido como medio filtrante, en flujo horizontal, para la remoción de sólidos suspendidos, materia orgánica y nutrientes en efluentes de piscifactorias de trucha., 02(02), 33–41.
- Fernández M., J., Latorre M., J., Berón C., F., Muñoz, N., & Vargas, V. (2001). Uso de mantas sintéticas y naturales en filtración lenta en arena. Una experiencia en ambientes tropicales. Cinara. Universidad del Valle
- Fernandez, J., Sánchez, A., Latorre, J., Muñoz, N., Berón, F., & Restrepo, M. (2001). *Uso de Fibras Naturales y Sintéticas en Filtración*. Cinara.
- Fundación Reto Colombia. (2016). Programa de formación en Agua y Construcción de Paz del Proyecto Agua y Saneamiento Rural Integral Rural (ASIR – SABA Colombia).
- Grupo de Estudio Técnico Ambiental - GESTA AGUA. (n.d.). Parámetros organolépticos.
- Heibaum, M. (2016). Geotextiles used in filtration. In *Geotextiles: From Design to Applications* (pp. 257–275). <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100221-6.00012-7>

- Hoyos, N., & Méndez, J. (2016). OPTIMIZACIÓN DE FILTROS LENTOS EN ARENA MEDIANTE EL USO DE GEOTEXILES NT E INCREMENTO DE LAS VELOCIDADES DE FILTRACIÓN.
- IDEAM (2018). Reporte de avance del Estudio Nacional del Agua ENA 2018. Bogotá, D.C.
- Instituto Nacional de Salud. (2017). ESTADO DE LA VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AGUA PARA CONSUMO HUMANO EN COLOMBIA 2017.
- Knobelsdorf, J., & Mujerieg, R. (1997). CRECIMIENTO BACTERIANO EN LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE :, 4(junio), 17–27.
- Luetlich, S. M., Giroud, J. P., & Bachu, R. C. (1992). Geotextile Filter Design Guide. <https://doi.org/10.1016/B978-1-85166-796-3.50007-4>
- Maldonado, V. (2004). Filtración. In *Tratamiento de agua para consumo humano*.
- Ministerio de Desarrollo Económico. (2000). *Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS-200*. Bogotá.
- Pádua, V. L. de, & Di Bernardo, L. (1998). EMPREGO DE MANTA NÃO-TECIDA VISANDO MELHORIA NA QUALIDADE DA ÁGUA DECANTADA DE ETA.
- Palechor, J., & Pérez, L. (2017). Evaluación de un cartucho en geotextiles sintéticos no tejidos (NT) para el pre-tratamiento de agua cruda Trabajo.
- PAVCO. (2009). Manual de Diseño con Geosintéticos.
- PAVCO. (2012). Especificaciones Técnicas de los Geotextiles.
- Rodríguez, J. A. (2010). LA POROSIDAD COMO PROPIEDAD FÍSICA : PROPIEDADES DENSIDAD Y POROSIDAD.
- Sánchez, L. D. (2017). Attachment factor determination in upflow gravel filter in layers Determinación del factor de adherencia en filtros de grava de flujo ascendente en capas, 130(2), 121–130.
- Vila, J., Soriano, A., & Mensa, J. (2008). Bases moleculares de la adherencia microbiana sobre los materiales protésicos . Papel de las biocapas en las infecciones asociadas a los materiales protésicos, 26(1), 48–55.
- WHO/UNICEF. (2017). UNICEF. (2017). ANNUAL REPORT WHO/UNICEF Joint Monitoring Programme for Water Supply, Sanitation and Hygiene (JMP).ANNUAL REPORT WHO/UNICEF Joint Monitoring Programme for Water Supply, Sanitation and Hygiene (JMP).

ANEXOS

ANEXO 1. Datos obtenidos para los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos

→ Turbiedad

Tabla 14. Turbiedad para la primera carrera de filtración (UNT)

Fecha	Día	Hora acumulada	Agua cruda	Agua filtrada
16/09/2019	1	0	2.80	0.98
16/09/2019	1	5	2.23	0.89
16/09/2019	1	10	1.85	0.83
17/09/2019	2	24	5.93	0.87
17/09/2019	2	29	5.90	1.16
17/09/2019	2	34	8.73	1.16
18/09/2019	3	48	5.90	1.04
18/09/2019	3	53	2.91	0.87
18/09/2019	3	58	4.85	0.81
19/09/2019	4	72	69.10	22.60
19/09/2019	4	77	41.50	14.10
19/09/2019	4	82	14.80	5.96
20/09/2019	5	96	12.50	3.16
20/09/2019	5	101	15.20	3.10
20/09/2019	5	106	12.20	1.63

Tabla 15. Turbiedad para la segunda carrera de filtración, (UNT)

Fecha	Día	Hora acumulada	Agua cruda	Agua filtrada
23/09/2019	1	0	2.00	1.19
23/09/2019	1	5	2.70	1.17
23/09/2019	1	10	9.72	2.00
24/09/2019	2	24	7.30	1.21
24/09/2019	2	29	12.74	1.86
24/09/2019	2	34	16.80	0.92
25/09/2019	3	48	5.90	0.88
25/09/2019	3	53	14.7	1.27
25/09/2019	3	58	12.2	0.89
26/09/2019	4	72	5.97	0.87
26/09/2019	4	77	7.00	1.20
26/09/2019	4	82	13.06	1.54
27/09/2019	5	96	8.16	0.74
27/09/2019	5	101	8.29	0.80
27/09/2019	5	106	9.12	0.91

Tabla 16. Turbiedad para la tercera carrera de filtración, (UNT)

Fecha	Día	Hora acumulada	Agua cruda	Agua filtrada
30/09/2019	1	0	2.26	1.10
30/09/2019	1	5	6.68	1.58
30/09/2019	1	10	13.30	1.25
01/10/2019	2	24	10.20	2.00
01/10/2019	2	29	18.14	2.68
01/10/2019	2	34	14.40	2.53
02/10/2019	3	48	9.36	1.74
02/10/2019	3	53	5.43	1.52
02/10/2019	3	58	7.80	0.88
03/10/2019	4	72	18.10	0.97
03/10/2019	4	77	6.94	0.99
03/10/2019	4	82	10.20	0.76
04/10/2019	5	96	7.80	0.88
04/10/2019	5	101	9.77	0.99
04/10/2019	5	106	5.09	0.81

→ **Color aparente**

Tabla 17. Color aparente para la primera carrera de filtración, (UPC)

Fecha	Día	Hora acumulada	Agua cruda	Agua filtrada
16/09/2019	1	0	7.0	6.00
16/09/2019	1	5	9.0	6.00
16/09/2019	1	10	7.0	6.00
17/09/2019	2	24	8.0	4.00
17/09/2019	2	29	14.0	6.00
17/09/2019	2	34	16.0	5.00
18/09/2019	3	48	11.0	6.00
18/09/2019	3	53	9.0	4.00
18/09/2019	3	58	9.0	4.00
19/09/2019	4	72	110.0	62.00
19/09/2019	4	77	49.0	24.00
19/09/2019	4	82	42.0	19.00
20/09/2019	5	96	22.0	11.00
20/09/2019	5	101	22.0	9.00
20/09/2019	5	106	24.0	12.00

Tabla 18. Color aparente para la segunda carrera de filtración, (UPC)

Fecha	Día	Hora acumulada	Agua cruda	Agua filtrada
23/09/2019	1	0	10.0	8.00
23/09/2019	1	5	8.0	5.00
23/09/2019	1	10	14.0	8.00
24/09/2019	2	24	12.0	8.00
24/09/2019	2	29	19.0	10.00
24/09/2019	2	34	27.0	10.00
25/09/2019	3	48	10.0	6.00
25/09/2019	3	53	11.0	6.00
25/09/2019	3	58	16.0	8.00
26/09/2019	4	72	13.0	7.00
26/09/2019	4	77	14.0	8.00
26/09/2019	4	82	15.0	8.00
27/09/2019	5	96	11.0	7.00
27/09/2019	5	101	10.0	6.00
27/09/2019	5	106	14.0	8.00

Tabla 19. Color aparente para la tercera carrera de filtración, (UPC)

Fecha	Día	Hora acumulada	Agua cruda	Agua filtrada
30/09/2019	1	0	11.0	8.00
30/09/2019	1	5	9.0	5.00
30/09/2019	1	10	16.0	6.00
01/10/2019	2	24	8.0	5.00
01/10/2019	2	29	26.0	12.00
01/10/2019	2	34	26.0	12.00
02/10/2019	3	48	23.0	12.00
02/10/2019	3	53	19.0	12.00
02/10/2019	3	58	19.0	5.00
03/10/2019	4	72	30.0	9.00
03/10/2019	4	77	17.0	7.00
03/10/2019	4	82	15.0	7.00
04/10/2019	5	96	19.0	9.00
04/10/2019	5	101	14.0	8.00
04/10/2019	5	106	10.0	6.00

→ **Sólidos Suspendidos**

Tabla 20. Sólidos suspendidos totales para cada réplica, (mg/ L)

Réplica	Fecha	Día	Agua Cruda	Agua Filtrada
1	16/09/2019	1	7.22	0.56
	17/09/2019	2	9.44	2.22
	18/09/2019	3	8.89	1.11
	19/09/2019	4	35.56	3.33
	20/09/2019	5	27.22	2.78
2	23/09/2019	1	5.00	0.56
	24/09/2019	2	15.56	1.67
	25/09/2019	3	7.22	1.11
	26/09/2019	4	10.56	1.67
	27/09/2019	5	7.78	1.11
3	30/09/2019	1	5.56	0.56
	01/10/2019	2	26.67	2.22
	02/10/2019	3	21.11	2.22
	03/10/2019	4	16.11	1.67
	04/10/2019	5	11.11	1.11

→ **Coliformes Totales y Fecales**

Tabla 21. Coliformes totales y fecales para cada carrera de filtración, (UFC/100 mL)

Réplica	Fecha	Día	Coliformes Totales			Coliformes Fecales		
			Dilución	Agua Cruda	Agua Filtrada	Dilución	Agua Cruda	Agua Filtrada
1	16/09/2019	1	10 ⁻¹	18	8	10 ⁻¹	2	1
	18/09/2019	3	10 ⁻²	25	17	10 ⁻¹	8	6
	20/09/2019	5	10 ⁻²	45	43	10 ⁻¹	9	8
2	23/09/2019	1	10 ⁻¹	19	15	10 ⁻¹	4	3
	25/09/2019	3	10 ⁻²	28	27	10 ⁻¹	4	4
	27/09/2019	5	10 ⁻²	49	52	10 ⁻¹	4	5
3	30/09/2019	1	10 ⁻²	53	35	10 ⁻¹	3	2
	02/10/2019	3	10 ⁻²	55	50	10 ⁻¹	4	3
	04/10/2019	5	10 ⁻²	72	71	10 ⁻¹	4	4

ANEXO 2. Resultados estadísticos para determinación de distribución de datos y diferencias significativas

→ **Prueba de Shapiro-Wilk**

Tabla 22. Resumen de procesamiento de casos para todas las carreras de filtración

	Casos					
	Válidos		Perdidos		Total	
Parámetro	N	Porcentaje	N	Porcentaje	N	Porcentaje
Turbiedad	90	100.0%	0	0.0%	90	100.0%
Color	90	100.0%	0	0.0%	90	100.0%
Sólidos suspendidos totales	30	100.0%	0	0.0%	30	100.0%
Coliformes totales	18	100.0%	0	0.0%	18	100.0%
Coliformes fecales	18	100.0%	0	0.0%	18	100.0%

Tabla 23. Prueba de normalidad para la primera carrera de filtración

Parámetro	Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.
Turbiedad	0.586	30	0.000
Color	0.622	30	0.000
Sólidos suspendidos totales	0.754	10	0.004
Coliformes totales	0.897	6	0.359
Coliformes fecales	0.816	6	0.081

Tabla 24. Prueba de normalidad para la segunda carrera de filtración

Parámetro	Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.
Turbiedad	0.817	30	0.000
Color	0.840	30	0.000
Sólidos suspendidos totales	0.859	10	0.075
Coliformes totales	0.878	6	0.260
Coliformes fecales	0.954	6	0.772

Tabla 25. Prueba de normalidad para la tercera carrera de filtración

Parámetro	Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.
Turbiedad	0.831	30	0.000
Color	0.899	30	0.008
Sólidos suspendidos totales	0.832	10	0.036
Coliformes totales	0.921	6	0.514
Coliformes fecales	0.885	6	0.293

→ Prueba de Mann-Whitney

Tabla 26. Prueba Mann-Whitney para la primera carrera de filtración

	Experimento	N	Rango promedio	Suma de rangos	Significancia
Turbiedad	Entrada	15	20.33	305.00	0.003
	Salida	15	10.67	160.00	
	Total	30			
Color	Entrada	15	19.50	292.50	0.012
	Salida	15	11.50	172.50	
	Total	30			
Sólidos suspendidos totales	Entrada	5	8.00	40.00	0.009
	Salida	5	3.00	15.00	
	Total	10			
Coliformes totales	Entrada	3	4.33	13.00	0.275
	Salida	3	2.67	8.00	
	Total	6			
Coliformes fecales	Entrada	3	4.00	12.00	0.513
	Salida	3	3.00	9.00	
	Total	6			

Tabla 27. Prueba Mann-Whitney para la segunda carrera de filtración

	Experimento	N	Rango promedio	Suma de rangos	Significancia
Turbiedad	Entrada	15	22.97	344.50	0.000
	Salida	15	8.03	120.50	
	Total	30			
Color	Entrada	15	22.43	336.50	0.000
	Salida	15	8.57	128.50	
	Total	30			
Sólidos suspendidos totales	Entrada	5	8.00	40.00	0.009
	Salida	5	3.00	15.00	
	Total	10			
Coliformes totales	Entrada	3	3.67	11.00	0.827
	Salida	3	3.33	10.00	
	Total	6			
Coliformes fecales	Entrada	3	3.67	11.00	0.827
	Salida	3	3.33	10.00	
	Total	6			

Tabla 28. Prueba Mann-Whitney para la tercera carrera de filtración

Experimento		N	Rango promedio	Suma de rangos	Significancia
Turbiedad	Entrada	15	22.87	343.00	0.000
	Salida	15	8.13	122.00	
	Total	30			
Color	Entrada	15	21.67	325.00	0.000
	Salida	15	9.33	140.00	
	Total	30			
Sólidos suspendidos totales	Entrada	5	8.00	40.00	0.009
	Salida	5	3.00	15.00	
	Total	10			
Coliformes totales	Entrada	3	4.33	13.00	0.275
	Salida	3	2.67	8.00	
	Total	6			
Coliformes fecales	Entrada	3	3.83	11.50	0.658
	Salida	3	3.17	9.50	
	Total	6			

ANEXO 3. Datos obtenidos del comportamiento hidráulico**Tabla 29.** Datos de caudal y pérdida de carga para la primera carrera de filtración

Fecha	Día	Hora acumulada	Caudal (mL/min)	Pérdida de carga (cm)
16/09/2019	1	0	1388.89	2.1
16/09/2019	1	5	1387.62	2.8
16/09/2019	1	10	1375.42	3.8
17/09/2019	2	24	1370.24	4.8
17/09/2019	2	29	1361.02	5.8
17/09/2019	2	34	1358.82	6.4
18/09/2019	3	48	1362.32	8.2
18/09/2019	3	53	1360.82	9.6
18/09/2019	3	58	1356.78	11.0
19/09/2019	4	72	1368.42	14.2
19/09/2019	4	77	1365.85	16.3
19/09/2019	4	82	1358.89	17.8
20/09/2019	5	96	1358.49	19.7
20/09/2019	5	101	1357.47	20.4
20/09/2019	5	106	1352.38	21.4

Tabla 30. Datos de caudal y pérdida de carga para la segunda carrera de filtración

Fecha	Día	Hora acumulada	Caudal (mL/min)	Pérdida de carga (cm)
23/09/2019	1	0	1333.33	1.9
23/09/2019	1	5	1372.55	2.4
23/09/2019	1	10	1350.38	2.6
24/09/2019	2	24	1323.08	3.5
24/09/2019	2	29	1341.77	3.9
24/09/2019	2	34	1323.74	4.3
25/09/2019	3	48	1321.35	5.1
25/09/2019	3	53	1319.15	5.5
25/09/2019	3	58	1270.41	6.1
26/09/2019	4	72	1278.11	8.3
26/09/2019	4	77	1290.84	8.8
26/09/2019	4	82	1292.68	9.6
27/09/2019	5	96	1243.37	11.7
27/09/2019	5	101	1286.96	12.8
27/09/2019	5	106	1271.19	14.6

Tabla 31. Datos de caudal y pérdida de carga para la tercera carrera de filtración

Fecha	Día	Hora acumulada	Caudal (mL/min)	Pérdida de carga (cm)
30/09/2019	1	0	1323.94	0.5
30/09/2019	1	5	1371.43	1.3
30/09/2019	1	10	1339.45	1.8
01/10/2019	2	24	1343.75	3.8
01/10/2019	2	29	1327.59	4.8
01/10/2019	2	34	1333.33	5.8
02/10/2019	3	48	1330.65	7.3
02/10/2019	3	53	1327.59	8.9
02/10/2019	3	58	1359.38	10.0
03/10/2019	4	72	1356.78	11.8
03/10/2019	4	77	1342.47	13.8
03/10/2019	4	82	1330.54	15.8
04/10/2019	5	96	1338.46	21.7
04/10/2019	5	101	1315.79	23.8
04/10/2019	5	106	1309.64	26.3