

Revista de Ingeniería

ISSN: 0121-4993

reingeri@uniandes.edu.co

Universidad de Los Andes

Colombia

Perea-Torres, Lina M.; Torres-Lozada, Patricia; Cruz-Vélez, Camilo H.; Escobar-Rivera, Juan C.
Influencia de la configuración del medio filtrante sobre el proceso de filtración a tasa constante del
agua clarificada del río Cauca

Revista de Ingeniería, núm. 38, enero-junio, 2013, pp. 38-44

Universidad de Los Andes

Bogotá, Colombia

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=121028408006>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

Influencia de la configuración del medio filtrante sobre el proceso de filtración a tasa constante del agua clarificada del río Cauca

Influence of Filter Medium Configuration on Constant-Rate Filtration of Clarified Water from the Cauca River

Lina M. Perea-Torres ^{(1)*}, Patricia Torres-Lozada ^{(2)*}, Camilo H. Cruz-Vélez ^{(3)*}, Juan C. Escobar-Rivera ^{(4)**}

⁽¹⁾ MSc en Ingeniería Sanitaria y Ambiental. linapeto@gmail.com

⁽²⁾ Ph.D. en Ingeniería Civil: Hidráulica y Saneamiento. Profesora Titular. patricia.torres@correounivalle.edu.co

⁽³⁾ MSc en Ingeniería Civil: Hidráulica y Saneamiento. Profesor Asociado. camilo.cruz@correounivalle.edu.co

⁽⁴⁾ Ph.D. en Ingeniería Civil: Hidráulica y Saneamiento. jcescobar@emcali.com.co

* Grupo de Investigación Estudio y Control de la Contaminación Ambiental (ECCA), Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente (EIDENAR), Universidad del Valle, Cali, Colombia.

** Jefe de Operación, Planta Puerto Mallarino, Empresas municipales de Cali EMCALI EICE ESP.

Recibido 30 de julio de 2011, aprobado 30 de marzo de 2013.

Palabras claves

Antracita, arena, configuración de medio filtrante, filtración, turbiedad.

Key words

Anthracite, configuration of filter media, filtration, sand, turbidity.

Resumen

Se evaluó a escala piloto el efecto de la configuración del medio filtrante sobre el proceso de filtración del agua clarificada de la planta de potabilización Puerto Mallarino, Cali – Colombia. Se analizaron cuatro configuraciones, una con características similares a los filtros existentes y las restantes con diferente tamaño efectivo y espesor de antracita. Se analizó turbiedad, duración de carrera, producción de agua y pérdida de carga. La filtración fue más eficaz al reducir el tamaño efectivo e incrementar el espesor. La configuración que mostró un mejor desempeño incluso operando con turbiedades de agua clarificada mayores a 10,0 UTN, fue la del filtro con un espesor de 700 mm.

Abstract

It was evaluated in pilot scale the effect of the filter media configuration on the filtration of clarified water in Puerto Mallarino drinking water treatment plant from Cali – Colombia. Four configurations were assessed, the first with similar characteristics of the existing filters and the other three changed effective size and anthracite bed depth. The turbidity, length run, water production and head lost were analyzed. The filtration was more efficient when reduced effective size and increase the anthracite bed. The best configuration, even when turbidities in the clarified water was greater than 10,0 UNT was the filter with anthracite bed depth of 700 mm.

INTRODUCCIÓN

La creciente contaminación de las fuentes hídricas y el requerimiento de entregar agua potable a los usuarios, obligan a definir estrategias que permitan mejorar los procesos de tratamiento y ejercer mejor control sobre la calidad de agua producida. La filtración es la última barrera en los procesos de potabilización de agua que permite la separación de material particulado y coloidal mediante el paso de la masa de agua a través de un medio granular; ésta también contribuye al control del riesgo microbiológico y parasitológico por la remoción de bacterias y protozoarios como *Giardia lamblia*

y *Cryptosporidium* (Spellman, 2009); siendo la filtración en profundidad uno de los medios de separación de partícula utilizados universalmente en el tratamiento del agua y aguas residuales (Gao, Xue, Song & Liu, 2012).

Las características del medio filtrante son uno de los factores que influyen en la filtración. De acuerdo con Soaded y Mohammed (2008), es recomendable tener un medio de tamaño, tipo de lecho y peso de granos con el cual se alcance un efluente con la menor cantidad de sólidos, que use la menor cantidad posible de agua para lavado y con el que también se puedan conseguir carreras más largas de filtración. Adicionalmente, para que un filtro sea sostenible, éste

debe presentar una alta permeabilidad así como resistencia a la erosión y baja susceptibilidad al ataque químico (Bilardi, Calabrò, Caré, Moraci y Noubactep, 2013).

El uso de medios de doble capa (arena y antracita) mejora considerablemente el proceso de filtración en cuanto a calidad del agua filtrada y producción de agua; la antracita realiza la retención de las partículas más grandes que llegan al filtro y la arena se encarga del pulimiento (Yohe y Getting, 2006). En un estudio de selección de un nuevo medio filtrante para mejorar el proceso de filtración en Alberta – Canadá, se encontró que con el uso de cuarzo triturado se alcanzaba la mejor calidad de agua filtrada y con medio de doble capa se lograban las carreras de filtración más largas (Suthaker, Smith y Stanley, 1995).

La planta de potabilización Puerto Mallarino (PM) que abastece a más del 60% de la población caleña, cuenta con filtración rápida como última barrera de remoción de partículas. De acuerdo con Montoya, Loaiza, Torres, Cruz y Escobar (2011), el agua tratada en la planta presenta valores mayores a 1,0 UNT en un 3,5% en operación normal (valor límite máximo establecido por normatividad internacional (Environmental Protection Agency [EPA], 2006) sin superar el valor límite máximo establecido para agua de consumo humano en la normatividad nacional vigente (2 UNT) (Ministerio de la Protección Social, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2007). Comparando esta calidad con lo establecido para garantizar una efectiva desinfección, la mediana de turbiedad del agua filtrada es mayor a 0,1 UNT (Organización Mundial de la Salud [OMS], 2006) y sólo el 0,17% es menor a 0,15 UNT y 13,37% es mayor a 0,3 UNT (EPA, 2006). EPA (2006) recomiendan para control de riesgo microbiológico por *Cryptosporidium* un percentil 95 de 0,15 UNT y un máximo de 0,3 UNT.

Aunque la filtración ha sido estudiada ampliamente, aún no se ha aceptado un modelo analítico que permita la optimización no empírica de parámetros del proceso, siendo necesario realizar estudios a escala piloto, pues es una manera muy aproximada de representar lo que sucede dentro de las unidades de filtración a escala real, permitiendo además extrapolar datos (Boller, & Kavanaugh, 1995; Jegatheesan & Vigneswaran, 2005). Por esta razón, en este estudio se evaluaron posibilidades de mejoramiento del proceso de filtración en escala piloto, analizando la influencia de la configuración del medio filtrante (en términos de tamaño efectivo y espesor de la antracita) sobre el proceso de filtración a tasa constante, tratando agua clarificada de la planta de PM de la ciudad de Cali, Colombia.

MATERIALES Y MÉTODOS

RELACIÓN ENTRE AGUA CRUDA Y CLARIFICADA

Debido a que la planta piloto recibía el agua clarificada de la planta PM y dada la alta variabilidad del agua cruda (Montoya, et al., 2011), se consideró importante analizar durante los

ensayos de filtración, el comportamiento del agua cruda y su efecto sobre la calidad de agua clarificada, lo que se realizó aplicando estadística descriptiva como promedios, medianas, máximos y mínimos.

DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA PILOTO

La Figura 1 muestra la planta piloto; las columnas son en acrílico (espesor 8mm), diámetro interno 0,134m y altura 3,75m. A 0,15m del fondo, las columnas cuentan con una placa con 138 orificios (ϕ 0,005m) como soporte del medio filtrante y que distribuye uniformemente el agua del lavado. La turbiedad se midió con 2 turbidímetros en línea marca ACCU4 de bajo rango (0 a 100 UNT, precisión 0,001 UNT), con uno se midió la turbiedad del agua clarificada y con el otro la del agua filtrada, para lo cual 5 electroválvulas se programan para controlar el paso del agua de cada filtro hacia el turbidímetro. Las señales de 4 a 20 mA que generan los turbidímetros se transportaron a un PLC y posteriormente a un computador. En el proceso también se monitoreó la presión en 6 puntos de cada una de las columnas, lo cual se realizó de manera manual apoyada en piezómetros instalados en cada filtro. Los puntos de medición se ubicaron uno encima del medio filtrante, otro debajo del falso fondo y los 4 restantes distribuidos a lo largo del lecho filtrante.

DEFINICIÓN DE LA CONFIGURACIÓN DE LOS MEDIOS FILTRANTES A EVALUAR

En la actualidad, el medio filtrante de los filtros de la planta de PM está conformado por un medio de doble capa; la de arena tiene un espesor de 300 mm y d10 de 0,61 mm, valores muy cercanos a los recomendados por (Spellman, 2009; Arboleda, 2000; Di Bernardo, & Di Bernardo, 2005) quienes reportan espesores de arena entre 200 mm a 400 mm y d10 entre 0,45 a 0,60 mm. La antracita presenta un espesor de 300 mm; sin embargo, diferentes autores sugieren espesores superiores, hasta de 700 mm en filtros de doble capa, por esta razón, en este estudio solo se modificó el espesor y el d10 de la capa de antracita como se muestra en la Tabla 1; el d10 se seleccionó de acuerdo al rango recomendado en la literatura (0,9 – 1,1 mm) (Di Bernardo & Di Bernardo, 2005).

Tabla 1. Configuración de medios filtrantes para evaluación en la planta piloto de filtración rápida*

Configuración evaluada		C1	C2	C3	C4
Arena	Espesor capa (mm)	300			
	Tamaño efectivo - d10 (mm)	0,61			
Antracita	Espesor capa (mm)	300	300	500	700
	Tamaño efectivo - d10 (mm)	1,29	1,16		

*Cu arena 1,2 y 3; Cu antracita C1 = 1,40; Cu antracita de C2, C3 y C4 = 1,41

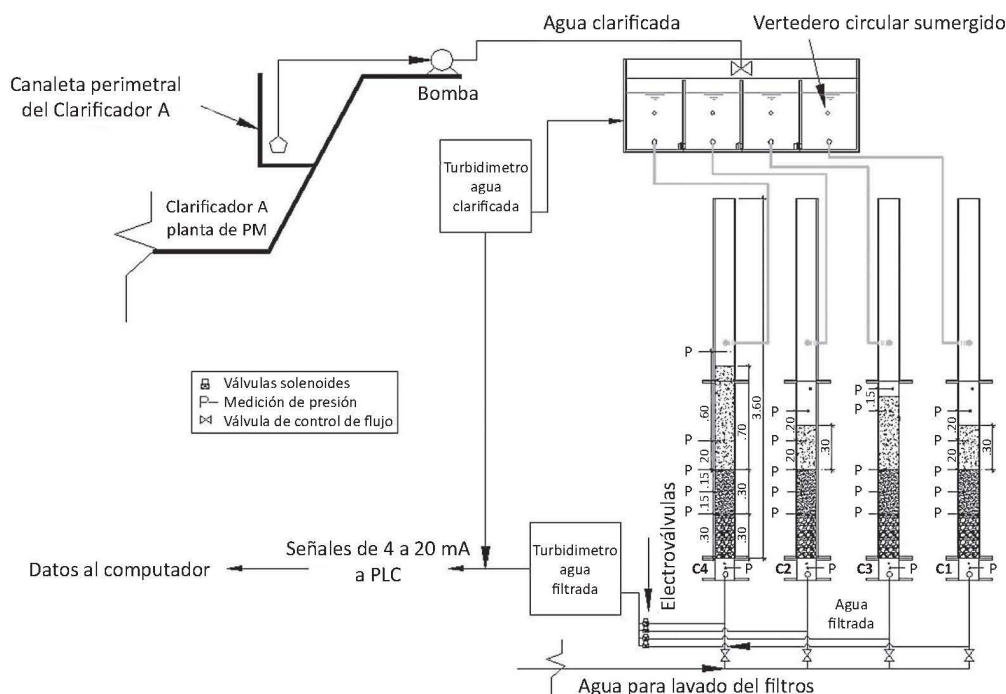


Figura 1. Esquema de la planta piloto de filtración

Con relación al medio de soporte, se conservó la misma configuración que actualmente tienen los filtros de la planta PM, configuración recomendada por Di Bernardo & Di Bernardo (2005) para falsos fondos con perforaciones de 5 mm, tamaño de los orificios instalados en el falso fondo de los filtros piloto. Este medio se conformó por gravas con los siguientes tamaños: 150 mm de 1/8" - #10, 50 mm de 1/4" - 1/8", 50 mm de 1/2" - 1/4" y 50 mm de 3/4" - 1/2".

DEFINICIÓN DE VARIABLES DE RESPUESTA Y DE CONTROL

Se controló la tasa de filtración (variable de control) utilizando una válvula de aguja ubicada sobre la tubería de conducción de agua clarificada y con el vertedero circular de excesos ubicado a 0,16 m encima del piso de la cámara de distribución de caudales (CADICA); con este vertedero se controló el nivel de agua sobre los cuatro orificios sumergidos que reparten el caudal a cada columna de filtración. Se midieron como variables de respuesta turbiedad del agua filtrada, pérdida de carga (PC), duración de carrera de filtración (DC) y producción de agua (PA: volumen de agua filtrada menos el volumen de agua utilizado en el lavado). La turbiedad se midió cada 10 s en el agua clarificada y cada 11,6 min en el agua filtrada.

EVALUACIÓN DE CONFIGURACIONES DE MEDIOS FILTRANTES

Para cada configuración inicialmente se realizó un ensayo de comparación hidráulica de medios limpios, el cual consistió

en la construcción de la curva de pérdida de carga - PC y porcentajes de expansión versus la tasa de fluidificación; con estos resultados, se determinaron condiciones de lavado. Posteriormente, y de manera simultánea en las cuatro configuraciones de filtros, se llevaron a cabo un total de 4 ensayos o carreras de filtración (E1, E2, E3 y E4), con el fin de contar con una cantidad suficiente de datos para realizar la comparación de las configuraciones.

Cada ensayo consistió en operar los filtros a tasa constante (tasa promedio de 336,4 m³/m² día) hasta que la turbiedad del agua filtrada fuese superior a 0,7 UNT o se alcanzara una PC mayor a 1,5 m o una DC mayor a 72 horas, en donde se daba por terminada la carrera de filtración; se debe destacar que durante los ensayos, tal como lo reporta EPA (2004) se presentaron picos de turbiedad en el agua filtrada que no superaron los 0,7 UNT. El lavado de cada filtro se realizó generando una expansión del medio en un 30% durante el tiempo requerido para alcanzar valores de turbiedad en el agua de lavado menor a 5,0 UNT (Cruz, 1993).

El desempeño de la filtración se evaluó en el tiempo de máxima eficiencia del filtro, mediante el análisis de diagramas de cajas y alambres que resumen el comportamiento de la turbiedad del agua filtrada para las diferentes configuraciones; adicionalmente, se desarrolló un modelo de bloques al azar con submuestreo, para el cual se usó una prueba no paramétrica de aleatorización con la que se evaluó la significancia de las fuentes de variabilidad incluidas en el modelo por medio de una prueba no paramétrica de aleatorización. Para realizar la comparación entre las diferentes configuraciones en términos de turbiedad de agua filtrada, se utilizó

la prueba de Mann-Whitney (la prueba más conocida para la comparación de dos poblaciones después de la prueba t de acuerdo con Melo (2007) citado por Perea (2012) y a partir de las medianas de la turbiedad obtenidas para cada configuración, se definió la mejor.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

RELACIÓN ENTRE AGUA CRUDA Y CLARIFICADA

Durante los ensayos realizados se encontró que la turbiedad del agua cruda (Tabla 2) que ingresó a la planta PM fue variable en todos los ensayos, presentándose valores máximos de 1440 UNT y mínimos de 58 UNT, siendo los ensayos E1 y E4 los que reportaron las mayores variaciones.

A pesar de la elevada variabilidad del agua cruda, se observa que el agua clarificada presentó un comportamiento estable con CV similares y del orden del 42% en E1, E3 y E4, en los cuales el 100% de los valores de turbiedad del agua clarificada fueron menores a 10 UNT con predominancia de valores menores a 5 UNT (más de 90% de los datos), lo que

indica que el proceso de clarificación de la planta PM presenta una alta efectividad incluso con valores de agua cruda del orden de 1440 UNT. El comportamiento atípico observado durante el ensayo E2 (CV de 84%) se debió a que se presentó un incremento brusco de turbiedad (valores hasta de 16,4 UNT) en el agua clarificada causado por problemas mecánicos en la turbina que controlaba la mezcla en el floculador.

EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO DE LAS CONFIGURACIONES

En la Figura 2 se presenta el diagrama de cajas y alambres que resume el comportamiento de la turbiedad del agua filtrada para las diferentes configuraciones; en ésta se observa que en los ensayos E1 y E4 se presentaron valores atípicos de turbiedad (entre 0,3 y 0,7 UNT) que corresponden a dos eventos picos de turbiedad en el agua filtrada asociados a problemas en la etapa de coagulación (Ej: en uno de los eventos se identificó un aumento en la dosis del coagulante de 20 a 40 mg/L en 2 horas). Este tipo de fenómenos ha sido reportado por autores como EPA (2004); Tobiasson, Cleasby, Logsdon & O'Medlia (2011).

Tabla 2. Comportamiento de la turbiedad (UNT) del agua cruda y clarificada

Descripción	Agua cruda				Agua clarificada			
	E1	E2	E3	E4	E1	E2	E3	E4
Promedio (UNT)	522,2	171,5	86,9	189,0	3,1	4,4	1,6	2,2
Mínimo (UNT)	129,0	102,0	58,0	70,0	1,3	1,40	0,72	0,81
Máximo (UNT)	1440,0	306,0	135,0	750,0	7,3	16,2	3,9	6,5
Coefficiente de variación - CV	73,6%	32,3%	23,9%	77,4%	42,4%	84,0%	42,2%	41,9%
% datos > 10 (UNT)	-	-	-	-	0,0%	9,4%	0,0%	0,0%
% datos ≤ 10 - > 5 (UNT)	-	-	-	-	10,1%	15,0%	0,0%	1,9%
% datos ≤ 5 - > 2 (UNT)	-	-	-	-	65,3%	53,2%	17,5%	50,2%
% datos ≤ 2 (UNT)	-	-	-	-	24,6%	22,4%	82,5%	47,8%
% datos ≤ 1 (UNT)	-	-	-	-	0,0%	0,0%	13,0%	6,0%
No. Datos	38,0	48,0	74,0	73,0	516,0	1028,0	673,0	832,0

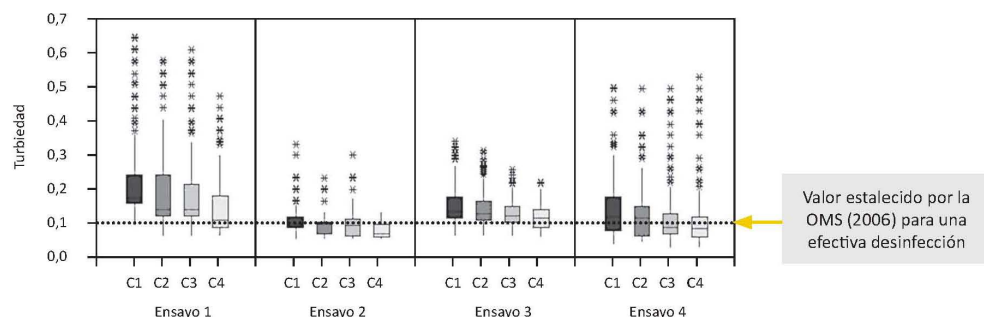


Figura 2. Diagramas de cajas y alambres para turbiedad del agua filtrada en el periodo de máxima eficiencia de las diferentes configuraciones de medios filtrantes

En esta figura también se observa que al comparar la configuración C1 con la C2, cuya única diferencia es el d10 de la antracita, se encontró un mejor comportamiento de C2, en términos tanto de menores valores de turbiedad como de variabilidad de los datos. En las configuraciones en donde sólo se varió el espesor de antracita (C2, C3 y C4), se observa que la turbiedad de agua filtrada fue mejor a medida que aumentó el espesor de la antracita, lo que coincide con autores como Ives, 1975 (citado por Di Bernardo & Di Bernardo, 2005), y Tchio, Koudjonou, Desjardins, Gadbois & Prévost, 2003), quienes afirman que el tamaño efectivo y la profundidad del medio filtrante, así como la tasa de filtración tienen un efecto significativo sobre el desempeño del filtro, generándose un incremento de la retención de sólidos para un mayor espesor de medio filtrante. En general, C4 fue la configuración que presentó el mejor comportamiento, ya que es la que muestra el rango intercuartílico con los menores valores de turbiedad, además es la que tiene la mediana de la turbiedad por debajo de lo establecido por (OMS, 2006) y presenta los menores valores extremos.

La prueba no paramétrica de aleatorización con la que se evaluó la significancia de las fuentes de variabilidad incluidas en el modelo, mostró que existen diferencias sobre la reducción de turbiedad a un nivel de significancia del 5% entre al menos dos de las configuraciones evaluadas y la prueba de Mann Whitney mostró que con un nivel de significancia del 5%, hay diferencias entre las 4 configuraciones sobre la reducción de turbiedad. La prueba de homogeneidad usando el estadístico chi-cuadrado con el mismo nivel de significancia, ratificó que las cuatro configuraciones presentaron distribuciones diferentes. Comparando las medianas se encontró que C2 fue menor que C1 y que entre C2, C3 y C4 fue esta última la que menor mediana presentó, ratificando que la turbiedad se reduce al disminuir el d10 e incrementar el espesor de la antracita.

En la Tabla 3 se presentan los resultados de duración de la carrera de filtración (DC) y producción de agua (PA), observándose que en los eventos donde la turbiedad del agua clarificada se mantuvo menor a 10 UNT (E1, E3 y E4), éstas fueron muy similares para las 4 configuraciones evaluadas, no encontrándose influencia del d10 ni del espesor del lecho filtrante en el desempeño de los filtros. Para el caso de E2, en el cual se presentaron turbiedades extremas en el agua clarificada (16, 24 UNT), se observa una influencia del espesor sobre estas variables, encontrándose que C4 es la única configuración que garantiza una DC equivalente al doble del tiempo de las otras 3, consiguiendo así mismo el doble de PA.

En la Tabla 3 se evidencia que el comportamiento de las diferentes configuraciones de filtros evaluadas en los ensayos E1, E3 y E4 fue similar y que éste fue el comportamiento predominante en el estudio, motivo por el cual, para la evaluación del comportamiento de la PC se analizó el ensayo E4 como representativo del comportamiento de los filtros; de este modo, en la Figura 3 se observa que para los d10 evaluados (C1 y C2), no se observó diferencia en la PC a lo largo de la carrera de filtración, mientras que para los diferentes espesores de la antracita con un mismo d10 (C2, C3 y C4), se observa que, a mayor espesor, la pérdida de carga se incrementó más rápidamente que la de la arena hasta sobrepasarla, momento a partir del cual la pérdida de carga de la arena tiende a mantenerse estable; esta situación se presenta ya que entre mayor espesor del medio filtrante hay mejor distribución de partículas en el medio y por lo tanto se presenta menor presión sobre él (Kau & Lawler, 1995). Esta situación podría generar una reducción del riesgo de traspaso de material particulado a través del filtro, lo que a su vez puede disminuir el riesgo microbiológico (Spellman, 2009). De acuerdo con lo anterior, C4 es la configuración que presenta mejor comportamiento pues la antracita supera más rápidamente la pérdida de carga de la arena, protegiéndola por un mayor tiempo.

Tabla 3. Duración del periodo de máxima eficiencia y producción neta de agua

Ensayo / configuración		Duración periodo máx. eficiencia (horas)	PA (m ³)	Ensayo / configuración		Duración periodo máx. eficiencia (horas)	PA (m ³)
E1	C1	33,6	6,6	E3	C1	72,7	14,2
	C2	33,7	6,6		C2	72,7	14,1
	C3	35,4	6,9		C3	72,5	14,1
	C4	35,6	7,0		C4	72,7	14,1
E2	C1	23,3	4,4	E4	C1	67,0	13,0
	C2	23,7	4,5		C2	68,9	13,4
	C3	23,5	4,4		C3	72,7	14,4
	C4	48,8	9,4		C4	72,7	14,2

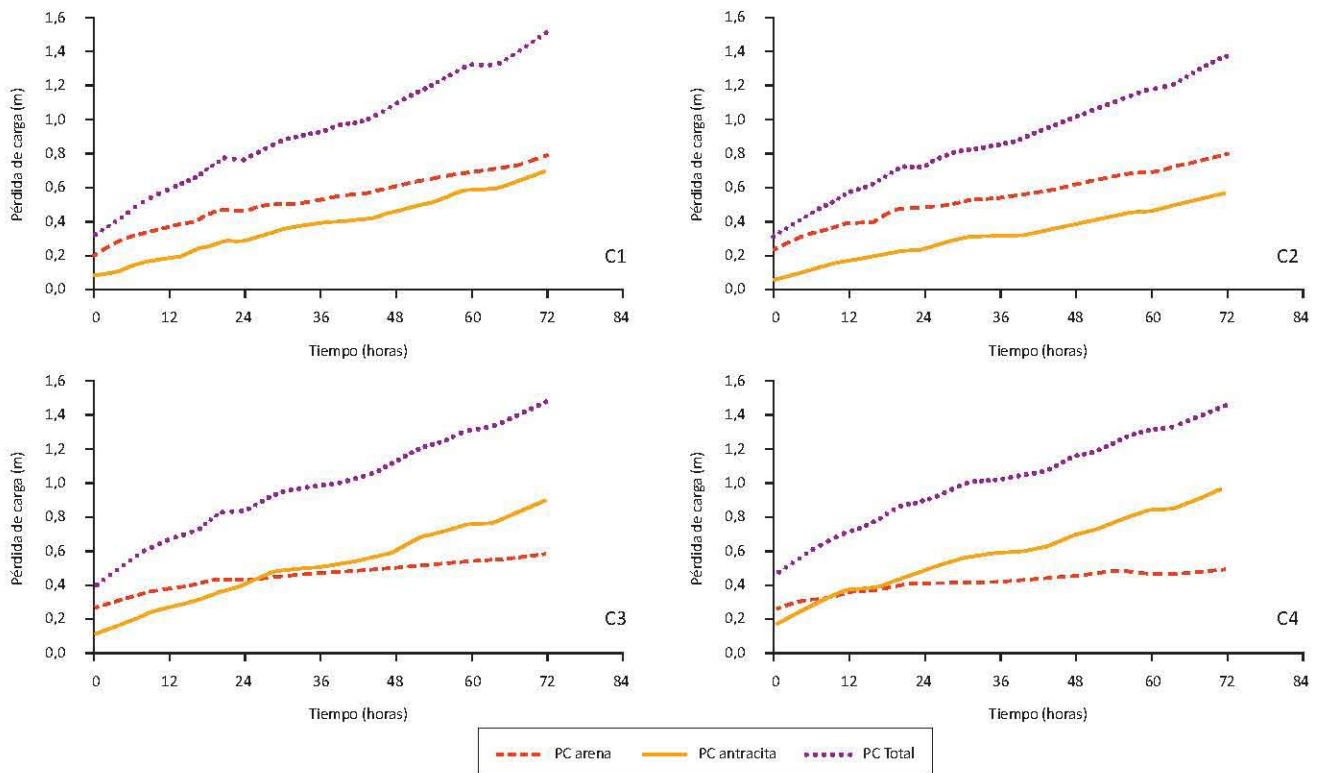


Figura 3. Pérdida de carga de la arena, antracita y total registrada en el ensayo 4

CONCLUSIONES

A pesar de la elevada variabilidad de la turbiedad del agua cruda que ingresó a la planta Puerto Mallarino durante el periodo del estudio (58 – 1440 UNT) se encontró que un porcentaje alto (89 – 98%) de los registros de turbiedad del agua clarificada fue inferior a 5,0 UNT, lo que demuestra robustez en el proceso de clarificación (coagulación, floculación, sedimentación) y que los ajustes de operación que se realizan en la planta ante eventos de cambios extremos de turbiedad, son eficientes.

Entre los dos tamaños efectivos - d10 de antracita evaluados (C1 y C2), la configuración más adecuada en términos de turbiedad de agua filtrada fue la que presentó el menor d10 de los dos evaluados (C2:1,16mm vs C1:1,29 mm). En términos del espesor de la antracita, la eficiencia de retención de los sólidos fue proporcional al espesor, ya que los sólidos se distribuyen de manera más uniforme, protegiéndose con esto la capa de arena, lo que a su vez puede disminuir el riesgo de traspaso de sólidos a través del filtro y el riesgo microbiológico, siendo la configuración de mayor espesor (C4), la de mejor desempeño. La principal diferencia observada entre los tres espesores evaluados fue sobre la turbiedad del agua filtrada.

En términos de duración de la carrera de filtración y la producción de agua, no se observaron diferencias significativas asociadas ni al tamaño efectivo ni al espesor de la antracita. Sin embargo, con valores de turbiedad elevados en el agua clarificada, la configuración con mayor espesor (C4) fue la

que presentó el mejor desempeño, alcanzándose el doble de duración de la carrera y de producción de agua comparada con las otras. No se observó influencia del tamaño efectivo sobre el comportamiento de la pérdida de carga; sin embargo, se encontró que a mayor espesor, la PC en la antracita supera la de la arena, siendo C4 la configuración más eficiente entre las evaluadas.

Teniendo en cuenta que factores como el tamaño efectivo y espesor del medio pueden influir en la pérdida de carga y la duración de la carrera de filtración y producción de agua, se recomienda realizar evaluaciones a escala piloto, teniendo en cuenta las características del medio filtrante disponible en la zona de estudio.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue realizada con el apoyo técnico y financiero de COLCIENCIAS, EMCALI EICE ESP y la Universidad del Valle en el marco del Proyecto “Identificación, evaluación y manejo del riesgo en el sistema de abastecimiento de agua de la red baja de la ciudad de Cali, enmarcados en un Plan de Seguridad del Agua (PSA)”.

REFERENCIAS

Arboleda, J. (2000). *Teoría y práctica de la purificación del agua – Tomo II*. Tercera Edición. Bogotá: McGraw-Hill, pp. 443–444.

- Bilardi, S., Calabrò, P., Caré, S., Moraci, N., y Noubactep, C. (2013). Improving the sustainability of granular iron/pumice systems for water treatment. *Journal of Environmental Management*, 121, 133–141.
- Boller, M. y M. Kavanaugh. (1995). Particle Characteristic and Head Loss Increase in Granular Media Filtration. *Water Research*, 29 (4), 1139–1149.
- Cruz, C. (1993). *Filtração Direta Ascendente com Alta Taxa* (Tesis Maestría). Universidad de Sao Paulo: Escola de Engenharia de São Carlos, Brasil.
- Di Bernardo, L., y Di Bernardo, A. (2005). *Métodos e Técnicas de Tratamento de Água*. Segunda Edición. Vol. 1. Sao Carlos - Brasil: Rima, pp. 513–686.
- Environmental Protection Agency (EPA). (2004). *Long Term 1 Enhanced Surface Water Treatment Rule Turbidity Provisions - Technical Guidance Manual*. Recuperado de http://water.epa.gov/lawsregs/rulesregs/sdwa/mbdp/upload/2004_11_22_mdbp_lt1eswtr_guidancelt1_turb.pdf
- Environmental Protection Agency (EPA). (2006). National Primary Drinking Water Regulations: Long Term 2 Enhanced Surface Water Treatment Rule – Part II. *Estados Unidos: Federal Register Environmental Documents, USEPA*, 71 (3), 654–786.
- Gao, P. G., Xue, X. Song y Z. Liu. (2012). Depth Filtration Using Novel Fiber-Ball Filter Media for the Treatment of High-Turbidity Surface Water. *Journal Separation and Purification Technology*, 95, 32–38.
- Jegatheesan, V., y Vigneswaran, S. (2005). Deep Bed Filtration: Mathematical Models an observations. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 35(3), 515–569.
- Kau, S., y D. Lawler. (1995). Dynamics of Deep - Bed Filtration: Velocity, Depth, and Media. *Journal of Environmental Engineering*, 121 (12) 850–859.
- Ministerio de la Protección Social, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. *Resolución, 2115 - Características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano*. Bogotá – Colombia, Julio de 2007, pp. 3.
- Montoya, C., Loaiza D., Torres P., Cruz, C. H. y Escobar, J. C. (2011). Efecto del Incremento en la Turbiedad del Agua Cruda sobre la Eficiencia de Procesos Convencionales de Potabilización. *Revista EIA*, (16) 137–148.
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2006). *Guidelines for Drinking – Water Quality*. Estados Unidos: WHO Library Cataloguing-in-Publication Data,
- Perea, L. M. (2012). *Evaluación a Escala Piloto del Efecto de las Características del Medio Filtrante sobre el Proceso de Filtración Rápida Descendente Tratando Agua Clarificada de la Planta de Potabilización de Puerto Mallarino*. (Tesis de Maestría). Universidad del Valle, Colombia.
- Soaded, A. y Mohammed, A. (2008). Backwash Water and Net Water Production in Dual Filters: A Case Study In AL-Wathba Water Treatment Plant. *Journal of Pure & Applied Sciences University of Sharjah*, 5(2)35–39.
- Spellman, F.R. (2009). *Handbook of water and wastewater treatment plant operations*. Estados Unidos: Taylor & Francis Group.
- Suthaker, S., D. Smith y S. Stanley. (1995). Evaluation of Filter Media for Upgrading Existing filter Performance. *Environmental Technology*, 16, (7), 625–543.
- Tchio, M., B. Koudjonou, R. Desjardins, A. Gadbois y M. Prévost. ((2003). Evaluation of the Impact of Design and Operation Parameters on Direct Filtration. *Journal Environmental Engineer Scientist*, 2 (5), 343–353.
- Tobiason, J. E., J. L. Cleasby, G. S. Logsdon y Ch. R. O'Medlia.(2011) “Granular Media Filtration”, *Water Quality and Treatment* (Sexta Ed.). Estados Unidos: McGraw-Hill.
- Yohe, T. L. y T. M. Getting. (2006). *White Paper: The Effect of Low Uniformity Coefficient Anthracite on Dual Media Filtration*. Estados Unidos: ITT Water & Wastewater - Leopold Products.