

EFECTO DEL INCREMENTO EN LA TURBIEDAD DEL AGUA CRUDA SOBRE LA EFICIENCIA DE PROCESOS CONVENCIONALES DE POTABILIZACIÓN

CAROLINA MONTOYA¹
DIANA LOAIZA²
PATRICIA TORRES³
CAMILO HERNÁN CRUZ⁴
JUAN CARLOS ESCOBAR⁵

RESUMEN

Los fenómenos ambientales provocan fuerte impacto sobre la variación de la calidad del agua de fuentes de abastecimiento, exigiendo que los procesos de potabilización respondan a tales variaciones y mantengan los estándares de calidad en la producción de agua segura. El análisis histórico del comportamiento de la turbiedad del río Cauca y del agua clarificada y tratada permitió evaluar el efecto del incremento en la turbiedad del agua cruda sobre la eficiencia de los procesos convencionales de potabilización que se realizan en la planta Puerto Mallarino en Cali (Colombia). Se encontró que dicho fenómeno afectó la eficiencia del tratamiento y la calidad del agua tratada, siendo la filtración la etapa más vulnerable. Se identificó alta correlación lineal entre la turbiedad máxima del agua cruda y la dosificación de productos químicos utilizados en el tratamiento del agua (coagulante y desinfectante).

-
- 1 Ingeniera Sanitaria y Magíster (c) en Ingeniería, Énfasis en Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Universidad del Valle. Asistente de investigación, Grupo de Investigación Estudio y Control de la Contaminación Ambiental, Universidad del Valle. Cali, Colombia. caromoto@gmail.com
 - 2 Ingeniera Sanitaria, Universidad del Valle; Magíster en Hidráulica y Saneamiento, Universidade de São Paulo. Coordinadora de Proyectos, Grupo de Investigación Estudio y Control de la Contaminación Ambiental, Universidad del Valle. Cali, Colombia. dloaiza2@gmail.com
 - 3 Ingeniera Sanitaria. Doctora en Ingeniería Civil, énfasis Hidráulica y Saneamiento. Profesora Titular, integrante del Grupo de Investigación Estudio y Control de la Contaminación Ambiental, Universidad del Valle. Cali-Colombia. patricia.torres@correounivalle.edu.co
 - 4 Ingeniero Sanitario, Universidad del Valle; Magíster en Hidráulica y Saneamiento, Universidade de São Paulo. Profesor Asociado, integrante del Grupo de Investigación Estudio y Control de la Contaminación Ambiental, Universidad del Valle. Cali, Colombia. camcruz@univalle.edu.co
 - 5 Ingeniero Sanitario, Universidad del Valle. Magíster y Doctor en Hidráulica y Saneamiento, Universidade de São Paulo. Jefe de Operación Planta Puerto Mallarino, EMCALI. Cali, Colombia. jcescobar@emcali.com.co

PALABRAS CLAVE: agua cruda; agua clarificada; agua tratada; eventos de alta turbiedad; procesos convencionales de potabilización; turbiedad.

EFFECT OF INCREASE OF RAW WATER TURBIDITY ON EFFICIENCY OF CONVENTIONAL DRINKING WATER TREATMENT PROCESSES

ABSTRACT

Environmental phenomena cause a strong impact in the variation of the quality of sources for drinking water, demanding that potable water treatment processes respond to these changes and maintain quality standards in the production of safe drinking water. The historical analysis of river Cauca turbidity and behavior of clarified and filtrated water allowed evaluating the effect of increase in raw water turbidity over water treatment conventional processes of Puerto Mallarino plant at Cali (Colombia). It was determined that the high turbidity of the water of river affected the treatment efficiency and also the quality of treated water; filtration was the most vulnerable stage to these high turbidity events. A high linear correlation between maximum turbidity and chemical products dose (coagulant and disinfectant) was identified.

KEY WORDS: raw water; clarified water; treated water; high turbidity events; conventional processes of drinking water treatment; turbidity.

EFEITO DO INCREMENTO NA TURBIEDADE DA ÁGUA CRUA SOBRE A EFICIÊNCIA DE PROCESSOS CONVENCIONAIS DE POTABILIZAÇÃO

RESUMO

Os fenômenos ambientais provocam forte impacto sobre a variação da qualidade da água de fontes de abastecimento, exigindo que os processos de potabilização respondam a tais variações e mantenham os standards de qualidade na produção de água segura. A análise histórica do comportamento da turbidez do rio Cauca e da água clarificada e tratada permitiu avaliar o efeito do incremento na turbidez da água crua sobre a eficiência dos processos convencionais de potabilização que se realizam na planta Porto Mallarino em Cali (Colômbia). Encontrou-se que dito fenômeno afetou a eficiência do tratamento e a qualidade da água tratada, sendo a filtração a etapa mais vulnerável. Identificou-se alta correlação linear entre a turbidez máxima da água crua e a dosagem de produtos químicos utilizados no tratamento da água (coagulante e desinfetante).

PALAVRAS-CHAVE: água crua; água clarificada; água tratada; eventos de alta turbidez; processos convencionais de potabilização; turbidez.



1. INTRODUCCIÓN

Los cambios de difícil predicción en el clima, sumados al marcado deterioro de las cuencas por causa de la contaminación y deforestación, aumentan la posibilidad de alteraciones repentinas en la calidad del agua de las fuentes utilizadas para abastecimiento de la población, exigiendo métodos complementarios para su tratamiento y, en casos extremos, la suspensión del suministro de agua. Además de fuentes específicas de contaminación de los ríos, como vertimientos de aguas residuales domésticas e industriales, también se presenta la polución generada por las lluvias que ocasionan el lavado de los suelos y la resuspensión de los lechos de los ríos, lo que genera incrementos sustanciales de sólidos suspendidos, turbiedad, color aparente, de carbono orgánico disuelto (COD) y amoníaco y el descenso en la conductividad, temperatura y alcalinidad del agua (Tseng, Segal y Edwards, 2000; Lawler *et al.*, 2006; Lee *et al.*, 2007). La eficacia de una planta de potabilización está asociada con el cumplimiento de los estándares de calidad de agua establecidos, independiente de las variaciones en la calidad de la fuente (Li y Huck, 2008), para lo cual se deben optimizar los procesos de tratamiento y ajustar los procedimientos operativos.

La turbiedad ha sido una característica ampliamente aplicada como criterio de calidad de agua, tanto en las fuentes de abastecimiento como en los procesos de potabilización y sistemas de distribución (Burlingame, Pickel y Roman, 1998; Lusardi y Consonery, 1999; Letterman, Johnson y Viswanathan, 2004), ya que es una medición rápida, económica y de fácil interpretación para los operadores (Burlingame, Pickel y Roman, 1998). Kawamura (2000) recomienda presedimentación para turbiedades del agua cruda superiores a 1000 UNT y establece 3000 UNT como valor máximo de turbiedad para tratamiento convencional. MWH (2005) refiere el uso de clarificadores de manto de lodos cuando las características del agua cruda y los caudales son relativamente uniformes y menciona el uso de un

mecanismo de barrido de lodos para valores mayores de 500 UNT.

Con relación a la influencia de incrementos de la turbiedad en las fuentes de abastecimiento sobre los procesos de potabilización, Norton *et al.* (1998) diseñaron y aplicaron durante 13 semanas un programa de capacitación en una planta piloto, dirigido al personal operativo de una planta de tratamiento que capta agua del río Truckee, del cual se abastece el 75 % de la población del norte del Estado de Nevada (Estados Unidos). El objetivo fue entrenar a los operadores en la planta piloto para afrontar incrementos de la turbiedad en el río, la cual puede aumentar de 5 UNT a más de 4000 UNT en tan sólo 5 horas; el éxito del programa se demostró cuando los operadores afrontaron un pico de turbiedad de 6600 UNT, con el cual la planta a escala real operó con las modificaciones necesarias en el proceso de coagulación (dosis de sulfato de aluminio mayor de 200 mg/L y ajuste de pH con Na_2CO_3) y se obtuvo agua filtrada con turbiedad menor de 0,1 UNT durante todo el evento.

La USEPA (1998) recomienda que la turbiedad del agua a la salida de cada una de las unidades de clarificación debe ser menor de 2 UNT, para minimizar la carga de partículas que llegan a los filtros y optimizar su operación, y la AWWA (2001) presenta para el agua clarificada 1 UNT como valor objetivo promedio y máximo 5 UNT. En Colombia, el valor máximo establecido para el agua tratada en la Resolución 2115 (Ministerio de la Protección Social y Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2007) es 2 UNT y la Unión Europea (1998) establece 1 UNT. Aunque la Organización Mundial de la Salud no determina un valor admisible de turbiedad basado en criterios de salud, sugiere que la mediana de la turbiedad del agua tratada sea idealmente menor de 0,1 UNT para una desinfección efectiva (WHO, 2006).

La turbiedad también ha sido asociada con el riesgo microbiológico potencial en el agua para consumo humano. Nieminski y Ongerth (1995),

citados por Betancourt y Rose (2004), encontraron remociones de 3,4 log para *Giardia* y 2,9 log para *Cryptosporidium* en una planta a escala piloto cuando la turbiedad del agua tratada se redujo hasta 0,1-0,2 UNT. Para asegurar adecuadas eficiencias de reducción de enterovirus, quistes de *Giardia spp.* y ooquistes de *Cryptosporidium sp.*, Di Bernardo y Di Bernardo (2005) recomiendan que el efluente de un filtro rápido tenga una turbiedad inferior a 0,5 UNT en el 95 % de los datos diarios del mes y que nunca sea superior a 5 UNT. Así mismo, la USEPA (2006) establece, en función de la reducción en log de *Cryptosporidium*, que la turbiedad efluente de cada filtro debe ser menor de 0,15 UNT en al menos el 95 % de las medidas realizadas mensualmente y no puede ser mayor de 0,3 UNT en dos medidas consecutivas tomadas con 15 minutos de intervalo.

En la ciudad de Cali, la principal fuente de abastecimiento para consumo humano es el río Cauca, cuya agua es sometida a tratamiento convencional más tratamientos complementarios (aplicación de carbón activado en polvo –CAP– y polímero) en las plantas Río Cauca y Puerto Mallarino (planta PM), que están preparadas para tratar agua cruda con una turbiedad hasta de 3000 UNT (EMCALI, 2005); sin embargo, en los últimos años se ha originado un preocupante incremento del número y duración de suspensiones del servicio asociadas a casos de alta turbiedad generados por el deterioro de la calidad del agua del río y de sus tributarios, ya que los afluentes en esta zona (La Vieja, Palo, Ovejas, Timba y Jamundí) se pueden clasificar como torrentes de pendiente fuerte, que presentan crecientes considerables de corta duración y aportan al río Cauca volúmenes significativos de sedimentos y materiales de arrastre, en especial durante los períodos de invierno (DNP/MAVDT/MHCP, 2009).

En el año 2000 se presentaron dos suspensiones temporales de la planta PM por alta turbiedad

en el agua cruda con duraciones de 1,33 y 1,25 horas, pero en los años 2007 y 2008 se generaron seis y ocho suspensiones respectivamente; en el año 2009 se presentaron 15 casos en los que esta planta tuvo que suspender su operación por alta turbiedad en el agua cruda por periodos entre 3 y 10 horas, y en abril de 2011 ocurrió un evento en el que la turbiedad del río Cauca fue mayor de 10.000 UNT y se suspendió el suministro de agua potable durante unas 17 horas.

En el año 2009 entró en funcionamiento un reservorio de agua clarificada con el objetivo de mitigar las frecuentes paradas de la planta en situaciones en que la turbiedad del agua cruda supera las 3000 UNT o presenta un nivel de oxígeno disuelto inferior a 2,5 mg/L; el agua almacenada en el reservorio puede ser tratada sola o mezclada con el agua cruda, permitiendo en el primer caso que la planta opere hasta por cuatro horas más.

Este artículo presenta la evaluación del efecto de eventos de alta turbiedad en el río Cauca sobre los procesos convencionales de potabilización en la principal planta de la ciudad, Puerto Mallarino (PM), a partir de los registros horarios de turbiedad de los años 1996, 2005 y 2007, teniendo en cuenta que durante ellos el agua cruda presentó alta turbiedad.

2. METODOLOGÍA

2.1 Descripción de la planta Puerto Mallarino –PM–

La planta PM capta agua del río Cauca para abastecer a más del 60 % de la población de la ciudad de Cali. La figura 1 presenta su diagrama desde la bocatoma hasta el bombeo de agua tratada; en las dos cámaras de distribución de caudales (CADICA) se realiza la mezcla rápida de productos químicos (coagulante, polímero para altas turbiedades y cloro).

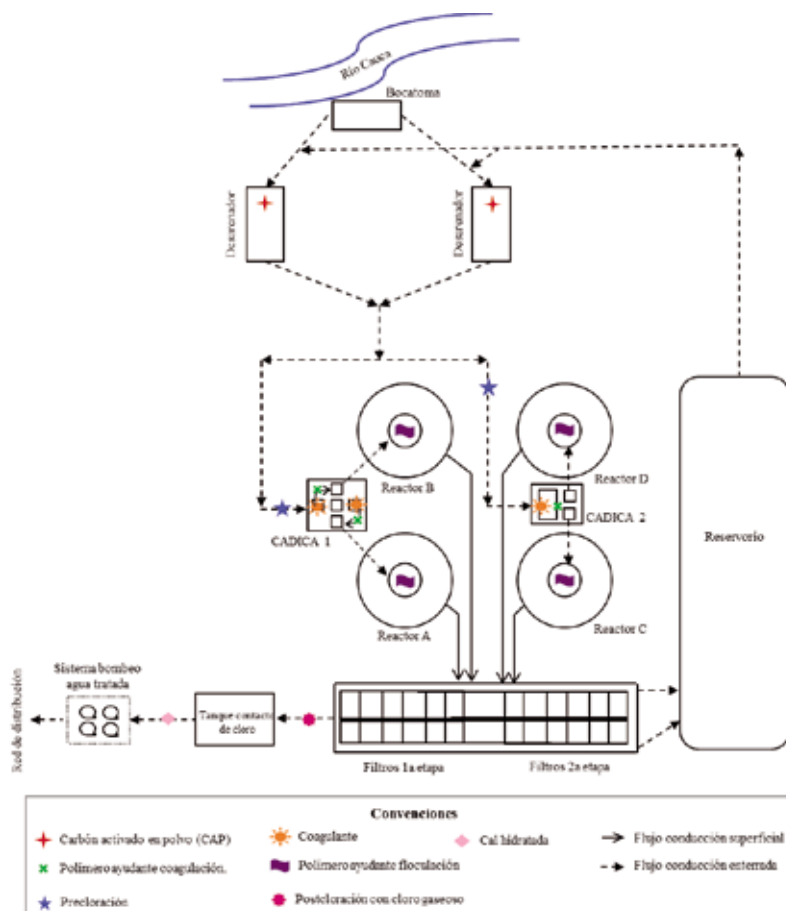


Figura 1. Esquema general y dosificación de productos químicos en la planta PM

2.2 Evento de alta turbiedad y criterios para su identificación

Se definió como evento de alta turbiedad todo incremento de turbiedad en el agua del río que conllevara ajustes de los procesos operativos en la planta, desde aumento de dosis de coagulante o adición de polímero hasta la suspensión de su operación. La identificación de estos eventos se realizó con registros horarios de turbiedad de los años 1996, 2005 y 2007. La turbiedad es una variable operativa de la planta PM que se mide con un turbidímetro HACH 2100N, el cual tiene una incertidumbre de 0,1 UNT.

A partir del análisis del efecto de los cambios en la turbiedad del agua cruda sobre la operación de la planta y con base en la literatura y análisis estadístico, se definieron dos criterios para identificar y clasificar los eventos: i) incrementos de la turbiedad del agua cruda iguales o superiores a 100 UNT en 1 hora y ii) turbiedad horaria del agua cruda igual o superior a 400 UNT; el primer criterio está asociado a cambios repentinos en la turbiedad del agua cruda, y el segundo, a la magnitud de esta característica. Así, los dos criterios no son excluyentes, pero cada uno se contabilizó una sola vez. Los eventos identificados se caracterizaron con las variables descritas en la figura 2. Posteriormente se aplicó estadística descriptiva: promedio, desviación estándar, coeficiente de variación, mínimo, mediana, máximo y total de datos.

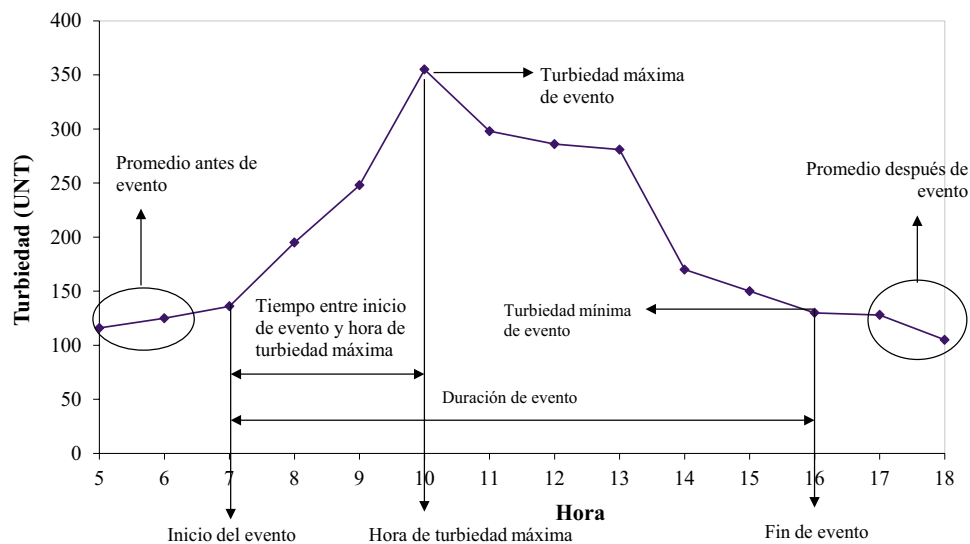


Figura 2. Variables para caracterización de eventos de alta turbiedad en el río Cauca

2.3 Efecto de eventos de alta turbiedad sobre los procesos de potabilización de la planta PM

A partir de la construcción de matrices de correlación entre las variables turbiedad del agua (cruda, clarificada y tratada), dosis de coagulante y dosis de desinfectante en precloración y postcloración, se identificaron asociaciones durante los eventos en el año 2007; las matrices muestran los coeficientes de correlación de Spearman y la significación asociada a ellos (valor-P). Los valores-P menores de 0,05 indicaron una correlación estadísticamente significativa, y la correlación de Spearman permitió identificar relaciones lineales (directa o inversamente proporcionales) entre un par de variables, a partir del coeficiente que varía entre -1 y 1 (Conover, 1999).

Para aplicar la correlación de Spearman se usaron los valores máximos de turbiedad durante el evento y se consideró el TRH teórico transcurrido desde la captación hasta el punto de interés, de tal manera que pudieran parearse los datos a partir de la hora en que se presentó la turbiedad máxima del evento. Adicionalmente se analizaron los datos de

agua clarificada y tratada de la planta que superaran diversos límites admisibles y que estuvieran asociados con casos de alta turbiedad para evaluar su influencia sobre los procesos de potabilización correspondientes.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Identificación y caracterización de eventos de alta turbiedad en el río Cauca

Se identificaron 130, 49 y 58 eventos de alta turbiedad en la fuente para los años 1996, 2005 y 2007, respectivamente. Considerando que la turbiedad horaria no se registra cuando se suspende la operación de la planta, el número de eventos identificados, su turbiedad máxima y duración están limitados por la información disponible; en consecuencia, estas variables podrían ser de mayor magnitud, pues se conoce que esta fuente ha alcanzado turbiedades incluso superiores a 10.000 UNT.

Se han reportado eventos similares por autores como Lin *et al.* (2004), quienes mencionaron que en el afluente a una planta de potabilización



de Taiwán la turbiedad del agua cruda se mantiene inferior a 10 UNT en condiciones atmosféricas normales, mientras que en verano, a causa de tormentas tropicales y lluvias fuertes, la turbiedad del agua puede aumentar en centenas o miles en un día y aun continuar excediendo 100 UNT durante las 2 a 3 semanas siguientes.

En general, las variables como el tiempo transcurrido entre el comienzo del evento y el momento en que se presentó su turbiedad máxima, la turbiedad promedio antes y después del suceso y la turbiedad máxima presentan alta dispersión (coeficientes de variación entre 0,3 y 1,4), lo cual está altamente relacionado con la inestabilidad de la turbiedad en el río Cauca y las condiciones climáticas de la cuenca, las cuales a su vez dependen de fenómenos

más complejos de mayor variabilidad. El año 1996 fue más crítico que los otros dos años analizados, teniendo en cuenta que la duración del evento fue hasta de 231 horas en 1996, mientras que en el 2005 fue hasta de 51 horas y, en el 2007, 55 horas.

El comportamiento promedio de los eventos de alta turbiedad observado en la figura 3 muestra una tendencia similar entre los años evaluados; sin embargo, las magnitudes varían, lo que puede estar asociado con las limitaciones de información de cada año, las condiciones hidrológicas y la calidad de agua. El año 1996, con una precipitación acumulada de 1691 mm, se caracterizó por presentar los mayores valores de las variables analizadas, en contraste con el año 2005, que presentó los menores valores y una precipitación acumulada de 1247 mm

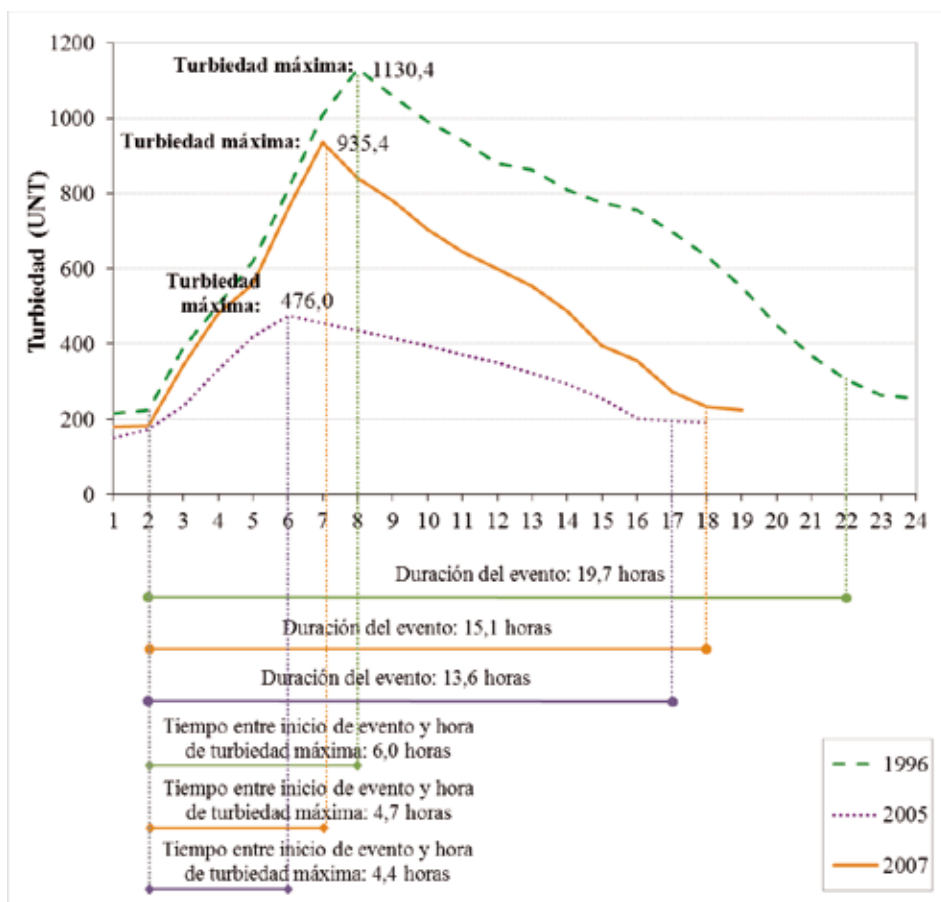


Figura 3. Comportamiento promedio de los eventos de alta turbiedad, planta PM

[estación pluviométrica Hacienda El Espejo, 40 km aguas arriba de la bocatoma de la planta PM (CVC, 2008)].

Los eventos de alta turbiedad identificados presentaron una turbiedad máxima entre 476,0 y 1130,4 UNT, una duración entre 13,6 y 19,7 horas y un tiempo transcurrido entre el comienzo del evento y la hora en que se presentó la turbiedad máxima entre 4,4 y 6,0 horas. En general, el ascenso en las curvas se da más rápidamente que la etapa de descenso hasta alcanzar las condiciones de estabilidad, evidenciando que la etapa crítica se presenta cuando la turbiedad se incrementa hasta llegar al máximo y, por lo tanto, se requiere una rápida respuesta operativa en la planta para mantener los estándares de calidad en el agua tratada (figura 3).

Debido a que en la planta PM se suspende el registro de turbiedad del agua cruda cuando se interrumpe su captación, se identificaron turbiedades máximas en los años 2005 y 2007 menores que las de 1996 (1680, 5630 y 7000 UNT, respectivamente), pues en este último año dicha planta operó con turbiedades superiores a 3000 UNT, valor máximo permisible de acuerdo con el manual de operación

de esta planta (EMCALI, 2005). Lo anterior es una instrucción que debe ajustarse para mantener una base de datos continua de la calidad del agua del río Cauca.

3.2 Efecto de eventos de alta turbiedad sobre los procesos de potabilización de la planta PM

La tabla 1 presenta la matriz de correlación para turbiedad máxima del agua (cruda, clarificada y tratada) y dosis de coagulante y cloro (precloración y postcloración) aplicadas durante casos de alta turbiedad en el río Cauca a la altura de la bocatoma de la planta PM en el año 2007, la cual contiene los coeficientes de correlación de Spearman e indica cuáles asociaciones fueron significativas estadísticamente (con valor-P < 0,05 se rechaza la hipótesis nula y la correlación encontrada es considerada significativa).

Con relación a la turbiedad máxima del agua cruda, se observa en la tabla 1 que la mayor correlación directa y significativa se presenta con la dosis de coagulante ($\rho = 0,87$ y valor-P = 0), lo cual demuestra que la primera fue un factor determinante sobre la

Tabla 1. Coeficientes de correlación de Spearman para turbiedad máxima y dosis de coagulante y cloro (precloración y postcloración) en eventos de alta turbiedad

		Turbiedad máxima del agua			Dosis		
		Cruda	Clarificada	Tratada	Coagulante	Cloro precloración	Cloro postcloración
Turbiedad máxima del agua	Cruda	1,00	0,23**	0,55*	0,87*	0,34*	0,30*
	Clarificada	0,23**	1,00	0,38*	0,18**	⊥	⊥
	Tratada	0,55*	0,38*	1,00	0,57*	⊥	⊥
Dosis	Coagulante	0,87*	0,18**	0,57*	1,00	⊥	⊥
	Cloro precloración	0,34*	^	⊥	⊥	1,00	⊥
	Cloro postcloración	0,30*	^	⊥	⊥	⊥	1,00

* Correlación significativa al 5 %; ** Correlación no significativa al 5 %; ⊥ correlación no evaluada



aplicación de sulfato de aluminio; sin embargo, con el fin de minimizar los residuos de sulfato y aluminio disueltos, es necesario mantener un control efectivo sobre la dosificación de coagulante, particularmente en el momento de afrontar eventos de alta turbiedad del agua cruda. También se observa una relación directa y significativa entre la turbiedad del agua cruda y tratada ($\rho = 0,55$ y valor-P = 0), revelando que los incrementos de turbiedad en la fuente incidieron en la del agua tratada.

La dosis de cloro en la precloración y postcloración en la planta PM se define a partir de la demanda de cloro, buscando garantizar una concentración de cloro residual libre en el agua clarificada entre 0,3 y 0,5 mg/L y de 1,5 mg/L en el agua tratada. Las correlaciones directas y significativas encontradas entre la turbiedad del agua cruda y las dosis de cloro en la precloración y postcloración indican que los casos de alta turbiedad afectaron linealmente la demanda de cloro en el agua cruda y tratada. Lo anterior también evidencia la necesidad de realizar un seguimiento a estos eventos, también en función del proceso de desinfección, con el objetivo de optimizar la dosificación de cloro y reducir la formación potencial de subproductos de desinfección, sin comprometer la calidad microbológica del agua tratada.

En cuanto al agua cruda, se resalta que no se encontró asociación lineal fuerte y significativa entre su turbiedad máxima y la de agua clarificada ($\rho = 0,23$ y valor-P = 0,1), indicando que el proceso de clarificación presentó poca variación de la turbiedad efluente durante los casos analizados, mientras que sí existió una correlación lineal significativa entre la turbiedad máxima del agua cruda y de la tratada ($\rho = 0,55$ y valor-P = 0). Teniendo en cuenta que la filtración constituye la última barrera en la remoción de partículas suspendidas de la planta, se debe garantizar su mayor eficiencia para mantener los estándares de calidad de agua potable, considerando que la reducción eficiente de turbiedad en los filtros se asocia con la remoción de *Giardia* y *Cryptosporidium* en el control del riesgo agudo en el agua

para consumo humano. En cuanto a la turbiedad máxima del agua tratada, se observa una relación lineal y significativa estadísticamente con la dosis de coagulante ($\rho = 0,57$ y valor-P = 0), asociada tal vez a la influencia de la turbiedad del agua cruda sobre la turbiedad del agua tratada.

Cabe mencionar que mientras la turbiedad promedio del agua clarificada durante eventos de alta turbiedad fue 3,6 UNT, bajo operación normal se mantuvo en un promedio de 2,4 UNT, evidenciando así que estos eventos afectaron la calidad del agua efluente de los clarificadores. La turbiedad promedio del agua tratada durante los casos estudiados fue de 0,8 UNT, mientras que en operación normal fue de 0,6 UNT.

Con el fin de identificar el efecto del incremento de la turbiedad en el agua cruda sobre la calidad del agua clarificada y tratada en la planta PM en el año 2007 y analizarlo frente al cumplimiento de estándares recomendados en guías o establecidos en la normativa nacional e internacional sobre calidad del agua para consumo humano, se identificaron los casos, tanto en condiciones normales como asociados a incrementos de turbiedad en el agua cruda, que superaron los valores máximos admisibles de turbiedad. La figura 4 ilustra los resultados obtenidos.

La figura 4 refleja que los eventos de alta turbiedad identificados afectaron la calidad del agua clarificada en la planta PM y, aun en condiciones normales, se presentan dificultades para mantener la turbiedad menor de 2 UNT, ya que el 79,7 % de todos los datos horarios de turbiedad del agua clarificada superaron este límite y sólo el 16,9 % estuvieron asociados a dichos eventos. Con relación a la turbiedad de diseño de los clarificadores de la planta PM (EMCALI, 2005), se observa que sólo el 3,9 % de los datos fue superior a 5 UNT en el agua clarificada, pero de éstos el 39,8 % estuvo relacionado con situaciones de alta turbiedad, reflejando la efectividad de los clarificadores de manto de lodos con sistema de barrido para fuentes con turbiedades como las del río Cauca (MWH, 2005).

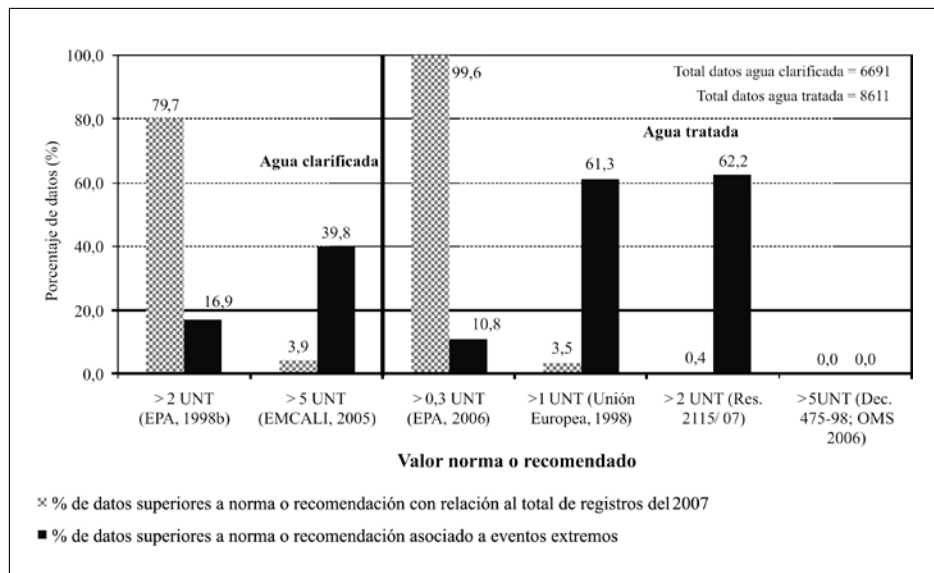


Figura 4. Porcentaje de datos de turbiedad mayores de varios límites en agua clarificada y tratada

En cuanto al agua tratada, se observa que la operación de la planta PM permite obtener turbiedades que cumplen con los estándares de la norma nacional y de la Unión Europea, aunque se nota que el 99,6 % de los datos es mayor de 0,3 UNT, límite máximo establecido por la USEPA (2006) para agua filtrada. De los pocos datos que superan los límites de 1 y 2 UNT, alrededor del 60 % corresponden a eventos de alta turbiedad, ratificando que éstos afectan la calidad del agua potable y, por lo tanto, podrían ocasionar un incremento del riesgo microbiológico, considerando la relación directa entre la turbiedad y la concentración de microorganismos, como lo indican Atherholt *et al.* (1998).

A pesar de lo anterior, se destaca que, en general, la turbiedad del agua tratada es menor que el límite permisible establecido en la normativa colombiana vigente; situaciones particulares durante la operación de la planta podrían ser la causa de valores altos de turbiedad en el agua clarificada y tratada, no asociados necesariamente a eventos de alta turbiedad; la adición de cal para estabilizar el pH luego de la desinfección es una práctica que

incrementa la turbiedad del agua tratada en la planta PM.

4. CONCLUSIONES

El comportamiento de los eventos extremos de turbiedad mostró que la etapa de incremento de la turbiedad hasta su valor máximo es más rápida que la de estabilización, indicando que la primera es la fase más crítica en estos casos y exige una rápida y acertada respuesta operativa en la planta, con el fin de mantener los estándares de calidad en el agua tratada. La implementación de programas de capacitación y entrenamiento, dirigidos al personal que opera la planta PM, para atender eventos de alta turbiedad en la fuente puede ser una buena estrategia para garantizar los estándares de calidad.

La alta correlación lineal encontrada entre la turbiedad máxima del agua cruda en los eventos estudiados y la dosis de coagulante ratifica que el objetivo fundamental de la coagulación tradicional en una planta de tratamiento convencional es la reducción del material suspendido. La relación directa



entre el incremento de la turbiedad del agua cruda y la dosificación de desinfectante en la precloración y postcloración muestra que estos eventos aumentan la demanda de cloro en el agua cruda y filtrada de la planta, por lo que es recomendable observar y caracterizar los subproductos de la desinfección y, de ser necesario, establecer controles para minimizar su producción, en especial durante la ocurrencia de tales eventos.

La turbiedad de la fuente de abastecimiento incide sobre la eficiencia de los procesos convencionales de potabilización en la planta PM, siendo la filtración la etapa más vulnerable del proceso, ya que problemas en la operación, como una coagulación inadecuada, pueden comprometer el desempeño de las unidades de clarificación y éstas a su vez alterar la eficiencia de la filtración, siendo recomendable mantener la aplicación de medidas operativas, como el uso de polímero, para optimizar la coagulación durante los eventos de alta turbiedad como estrategia de optimización de la coagulación.

REFERENCIAS

- Atherholt, Thomas B.; LeChevallier, Mark W.; Norton, William D. and Rosen, Jeffrey S. (1998). "Effect of rainfall on *Giardia* and *Cryptosporidium*". *Journal of the American Water Works Association*, vol. 90, No. 9 (September), pp. 66-80.
- AWWA –American Water Works Association–. *Self-assessment for treatment plant optimization (International Edition)*. Denver: AWWA, 2001. 11 p.
- Betancourt, Walter Q. and Rose, Joan B. (2004). "Drinking water treatment processes for removal of *Cryptosporidium* and *Giardia*". *Veterinary Parasitology*, vol. 126, No. 1-2 (December), pp. 219-234.
- Burlingame, Gary A.; Pickel, Michael J. and Roman, Joseph T. (1998). "Practical application of turbidity monitoring". *Journal AWWA*, vol. 90, No. 8 (August), pp. 57-69.
- Colombia. DNP/MAVDT/MHCP –Departamento Nacional de Planeación/Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial/Ministerio de Hacienda y Crédito Público–. Documento Conpes 3624. *Programa para el saneamiento, manejo y recuperación ambiental de la cuenca alta del río Cauca*. Consejo Nacional de Política Económica y Social. Bogotá: 2009.
- Colombia. Ministerio de la Protección Social, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. *Resolución 2115 de 2007*.
- Conover William J. *Practical non parametric statistics*. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, 1999.
- CVC –Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca–. *Registros de precipitación mensual multianual en la cuenca del río Cauca*. Cali, 2008.
- Di Bernardo, Luiz e Di Bernardo, Angela. *Métodos e técnicas de tratamento de água*. 2^a ed. São Carlos: Rima, 2005. 26 p.
- EMCALI EICE ESP. *Manual de operación planta Puerto Mallarino*. Código MO-PM-01. Cali, 2005.
- Kawamura, Susumu. *Integrated design and operation of water treatment facilities*. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 2000. 40 p.
- Lawler, Damian M.; Petts, Geoffrey. E.; Foster, Ian D. L. and Harper, S. (2006). "Turbidity dynamics during spring storm events in an urban headwater river system: the Upper Tame, West Midlands, UK". *Science of the Total Environment*, vol. 360, No. 1-3 (May), pp. 109-126.
- Lee, Haejin; Swamikannu, Xavier; Radulescu, Dan; Kim, Seung-jai and Stenstrom, Michael K. (2007). "Design of stormwater monitoring programs". *Water Research*, vol. 41, No. 18 (October), pp. 4186-4196.
- Letterman, Raymond D.; Johnson, Chris E. and Viswanathan, Sudhakar. (2004). "Low-level turbidity measurements: A comparison of instruments". *Journal AWWA*, vol. 96, No. 8 (August), pp. 125-137.
- Li, Tong and Huck, Peter M. (2008). "Improving the evaluation of filtration robustness". *Journal of Environmental Engineering and Science*, vol. 7, No. 1 (January), pp. 29-37.
- Lin, W. W.; Sung, S. S.; Chen, L. C.; Chung, H. Y.; Wang, C. C.; Wu, R. M.; Lee, D. J.; Huang, Chihpin; Juang, R. S.; Peng, X. F. and Chang, Hsi-Lih (2004). "Treating high-turbidity water using full-scale floc blanket clarifiers". *Journal of Environmental Engineering*, vol. 130, No. 12 (December), pp. 1481-1487.
- Lusardi, Peter J. and Consonery, Phil J. (1999) "Factors affecting filtered water turbidity". *Journal AWWA*, vol. 91, No. 12 (December), pp. 28-40.
- MWH –Montgomery Watson Harza–. *Water treatment: Principles and design*. 2nd ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005. 836 p.
- Norton, Russell; Auckly, Chet; Raymond, Will; Benedict, Scott and Goodwill, John (1998). "Pilot-plant training

- for high turbidity". *Journal AWWA*, vol. 90, No. 10 (October), pp. 67-75.
- Tseng, Tai; Segal, Brad D. and Edwards, Marc (2000). "Increasing alkalinity to reduce turbidity". *Journal AWWA*, vol. 92, No. 6 (June), pp. 44-54.
- Unión Europea. Directiva 98/83/CE del Consejo, de 3 de noviembre de 1998, relativa a la calidad de las aguas destinadas al consumo humano (DOCE núm. L 330/32, de 5 de diciembre de 1998). [consultado 8 de mayo de 2008]. Disponible en: <<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:1998:330:0032:0032:ES:PDF>>
- United States Environmental Protection Agency (USEPA). *Optimizing water treatment plant performance using the composite correction program*. EPA/625/6-91/027. Washington, D.C., 1998.
- United States Environmental Protection Agency (USEPA). *National primary drinking water regulations*. 2006. [consultado el 22 de junio de 2008]. Disponible en: <<http://www.epa.gov/EPA-WATER/2006/January/Day-05/w04c.htm>>
- World Health Organization (WHO). *Guidelines for drinking-water quality*. First addendum to third edition. Volume 1. Recommendations. Geneva: WHO Press, 2006. 219 p.