

## EVALUACIÓN DE UN CLARIFICADOR DE MANTO DE LODOS A ESCALA DE LABORATORIO

BEATRIZ AMPARO WILLS\*  
CAMILO CÉSAR CASTRO\*\*  
MAURICIO ANDRÉS CORREA\*\*\*

### RESUMEN

En este artículo se reportan los resultados de la operación y evaluación de un clarificador de manto de lodos de suspensión hidráulica a escala de laboratorio a partir de un diseño de experimentos factorial  $2^3$ , en el cual se utilizaron la turbiedad del agua cruda, la carga hidráulica o tasa superficial y el tipo de coagulante como factores que podían afectar la formación del manto y, por consiguiente, la eficiencia del sistema en la remoción de la turbiedad del agua. Se emplearon dos tipos de coagulante: sulfato de aluminio y C-235 (polímero catiónico) y se estudiaron dos diferentes tipos de agua cruda (sintética) preparadas en el laboratorio con la adición de caolín, la primera con alta turbiedad (Tipo I con 100 UNT) y la segunda con baja turbiedad (Tipo II con 15 UNT). El sistema fue operado con tasas superficiales de 35 y 70  $m^3/m^2.día$ . Los resultados obtenidos permiten establecer que cuando el sistema se operó con agua Tipo I y una carga hidráulica de 70  $m^3/m^2.día$  se generó el manto de mejores características y la turbiedad en el efluente alcanzó valores por debajo de 2 UNT.

**PALABRAS CLAVE:** clarificador de manto de lodos; potabilización; turbiedad; diseño de experimentos; tratamiento de aguas.

---

\* Ingeniera Sanitaria y Magíster en Ingeniería Ambiental, Universidad de Antioquia. Jefe Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Facultad de Ingeniería, y miembro del Grupo de Ingeniería y Gestión Ambiental –GIGA–, Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia. bwills@udea.edu.co

\*\* Ingeniero Sanitario y Magíster en Ingeniería, Universidad de Antioquia. Docente, Escuela Ambiental, Facultad de Ingeniería y miembro del Grupo de Ingeniería y Gestión Ambiental –GIGA–. Universidad de Antioquia Medellín, Colombia; ccastro@udea.edu.co

\*\*\* Ingeniero Sanitario y Magíster en Ingeniería Ambiental, Universidad de Antioquia. Docente de la Escuela Ambiental, Facultad de Ingeniería, miembro del Grupo de Ingeniería y Gestión Ambiental –GIGA–, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia. mcorrea@udea.edu.co

## ASSESSMENT OF A CLARIFIER SLUDGE BLANKET AT LABORATORY SCALE

### ABSTRACT

In this paper, we report the results for the operation and performance of a laboratory-scale clarifier sludge blanket suspension hydraulic, through a series of experiments that used a  $2^3$  factorial design. Factors in the design included: turbidity of raw water, hydraulic load rate and type of coagulant. These factors could affect the formation of a blanket, and therefore, the system's efficiency on the removing turbidity. Two types of coagulants –aluminum sulfate and C-325 (a cationic polymer)– were tested in two types of synthetic raw water prepared in the laboratory through the addition of kaolin with high (Type I with 100 NTU) and low (Type II with 15 NTU) turbidity. The system was operated with surface load rates of 30 and 70  $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{day}$ . Results show that the best blanket was generated when the system was operated with Type I water and a hydraulic load rate of 70  $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{day}$ , with turbidity values in the effluent below 2 NTU.

KEY WORDS: sludge blanket clarifier; water purification; turbidity; experimental design; water treatment.

## AVALIAÇÃO DE UM CLARIFICADOR DE MANTA DE LODOS EM ESCALA DE LABORATÓRIO

### RESUMO

Este artigo relata os resultados da operação e avaliação de um clarificador de manta de lodos de suspensão hidráulica em escala de laboratório a partir de um desenho de experimentos fatorial  $2^3$ , no qual foram utilizados a turbidez da água bruta, a carga hidráulica ou taxa de superfície e o tipo de coagulante como fatores que podiam afetar a formação da manta e, portanto, a eficiência do sistema na remoção da turbidez da água. Dois tipos de coagulante foram utilizados: sulfato de alumínio e C-235 (polímero catiônico) e estudaram-se dois diferentes tipos de água bruta (sintética), preparadas no laboratório com a adição de caulim, a primeira com alta turbidez (Tipo I com 100 UNT) e a segunda com baixa turbidez (Tipo II, com 15 NTU). O sistema foi operado com taxas superficiais de 35 e 70  $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{dia}$ . Os resultados obtidos permitem estabelecer que, quando o sistema foi operado com água Tipo I e uma carga hidráulica de 70  $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{dia}$  gerou-se a manta de melhores características e a turbidez no efluente atingiu valores por baixo de 2 NTU.

PALAVRAS-CÓDIGO: clarificador de manta de lodos; purificação das águas; turbidez; desenho de experimentos; tratamento de água.

### 1. INTRODUCCIÓN

En Colombia la política de agua potable y saneamiento básico pretende garantizar a la población objetivo un nivel de servicio correspondiente a agua segura y promover el desarrollo y aplicación de tecnologías de bajo costo efectivas y sostenibles, pues un gran número de colombianos padecen los rigores de consumir agua no apta, especialmente en la zona rural.

El caso del departamento de Antioquia puede servir como referente de lo que pasa en el país; el 89,4 % de las viviendas de la zona urbana tiene acceso a agua y potable, y en la zona rural tan sólo el 18,9 %. En la zona urbana del Valle de Aburrá el 98 % de población accede a agua potable, pero en las demás zonas estos porcentajes son muy bajos. En gran parte de los municipios de Antioquia no se cuenta con sistemas de tratamiento, y donde se cuenta con ellos, sólo un pequeño porcentaje suministra



agua apta para el consumo humano. (Gobernación de Antioquia-Departamento Administrativo de Planeación, 2005).

Los clarificadores de manto de lodos (CML) son sistemas de potabilización no convencionales en los cuales se integran la coagulación, floculación y sedimentación en una unidad compacta. Son ventajosos por aspectos económicos, alto desempeño, incluso con agua de alta turbiedad, y poco espacio requerido. Su principal desventaja radica en que su operación precisa de mayor control que un sistema convencional. Aunque las ventajas tienen mayor peso, los clarificadores de manto de lodos han sido poco estudiados en nuestro país y, por consiguiente, es muy bajo su uso.

En el exterior, los estudios de CML se han enfocado a la modelación. Head, Hart y Graham (1997) presentan un modelo matemático del proceso de CML calibrado a partir de trabajos en clarificadores a escala real y utilizado para simular en esos mismos clarificadores los efectos que tienen los cambios de las condiciones de funcionamiento en la concentración del manto de lodos y la calidad del agua tratada.

Su, Wu y Lee (2004) proponen un modelo basado en una ecuación de onda unidimensional para simular las características dinámicas del manto de lodos en un lecho suspendido con flujo ascendente. Las predicciones del modelo fueron confirmadas, mediante experimentos a escala de laboratorio, con agua cruda sintética coagulada con policloruro de aluminio en un lecho suspendido. Yang *et al.* (2008) simularon el comportamiento hidrodinámico del flujo en tres CML diferentes, aplicando un modelo de flujo multifase en tres dimensiones.

Sung, Lee y Huang (2005) investigaron los efectos de la turbiedad y la concentración de ácidos húmicos en el comportamiento del estado estacionario del manto de lodos, utilizando policloruro de aluminio (PACl) como coagulante. Pavón, Chávez y Garrido (1998) realizaron en México un estudio para determinar el buen funcionamiento y las posibles mo-

dificaciones al diseño de un sistema piloto compacto, aplicable a pequeñas comunidades, compuesto por unidades de coagulación, floculación, decantación por manto de lodos, filtración y desinfección.

A escala real, Chen *et al.* (2003), Lin *et al.* (2004) y Chen, Lee y Chou (2006) han realizado diversos estudios en los CML de Water Supply Company de Taiwán. En estas investigaciones han seguido la respuesta de los clarificadores a los diversos cambios de las condiciones del agua cruda y con diferentes escenarios de operación.

Ocampo y Salazar (1999) estudiaron la eficiencia de remoción de turbiedad, sólidos suspendidos, color real y absorbancia ultravioleta, en clarificadores de filtración gruesa ascendente en capas (CFGAC) a escala piloto y en CML a escala real en la planta de tratamiento de agua potable de Puerto Mallarino, en Cali, Colombia. Ambos sistemas trataban el agua del río Cauca y antes del ingreso se adicionaba sulfato de aluminio como coagulante.

De acuerdo con esta realidad, se ve necesario profundizar en este tema y realizar más estudios en Colombia que aporten al conocimiento y entendimiento de los CML, con el fin de determinar algunas variables importantes en su diseño y operación, para mejorar su funcionamiento y eficiencia, de tal forma que se puedan convertir en una excelente alternativa para contribuir a la solución de los problemas de cobertura y calidad del agua potable en nuestro país.

Buscando aportar al conocimiento de los CML, se desarrolló esta investigación que tiene como objetivo evaluar la eficiencia en remoción de turbiedad de un CML a escala de laboratorio. A pesar de que existen modelos y simulaciones de CML, requieren mucha información que no era posible determinar de conformidad con los recursos del proyecto; adicionalmente algunos de estos modelos evalúan aspectos constructivos o son desarrollados para clarificadores a escala real, lo cual no corresponde con los objetivos de esta investigación y, por tanto, se decidió aplicar un diseño factorial.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Unidad experimental

Para la fase experimental se utilizó como CML un sistema de suspensión hidráulica a escala de laboratorio, construido de acrílico con un volumen total de  $5.084 \text{ cm}^3$ , una altura de 115 cm incluyendo la sección cónica del fondo y un área superficial de  $47,8 \text{ cm}^2$ . En la figura 1 se presenta un esquema de todo el montaje de laboratorio.

### 2.2 Agua problema

Para el desarrollo de esta investigación se utilizó agua del acueducto del municipio de Medellín, a la cual se le añadió caolín. Se denominó agua Tipo I a la que se añadió caolín para producir una turbiedad inicial del orden de 100 UNT, la cual simulaba una fuente superficial con alta turbiedad; se denominó agua Tipo II a la que se le agregó caolín para producir una turbiedad de 15 UNT más o menos, la cual representaba una fuente superficial de baja turbiedad. Las características de las aguas sintéticas que se estudiaron se condensan en la tabla 1.

Todos los parámetros fueron determinados aplicando los métodos estándar para el análisis de aguas y aguas residuales, 20<sup>a</sup> edición (1998) de la American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA) y Water Environment Federation (WEF).

Con el fin de mantener las mismas condiciones durante todos los ensayos y debido a que el agua del acueducto presentaba variaciones significativas en la alcalinidad, este parámetro fue ajustado hasta valores cercanos a  $80 \text{ mg CaCO}_3/\text{L}$  con bicarbonato de sodio ( $\text{NaHCO}_3$ ), garantizando de esta forma la alcalinidad requerida en el agua cruda, según la dosis de coagulante seleccionada, lo cual es fundamental en el proceso de coagulación.

Los valores de 100 UNT y 15 UNT, que fueron seleccionados para la preparación de las muestras y

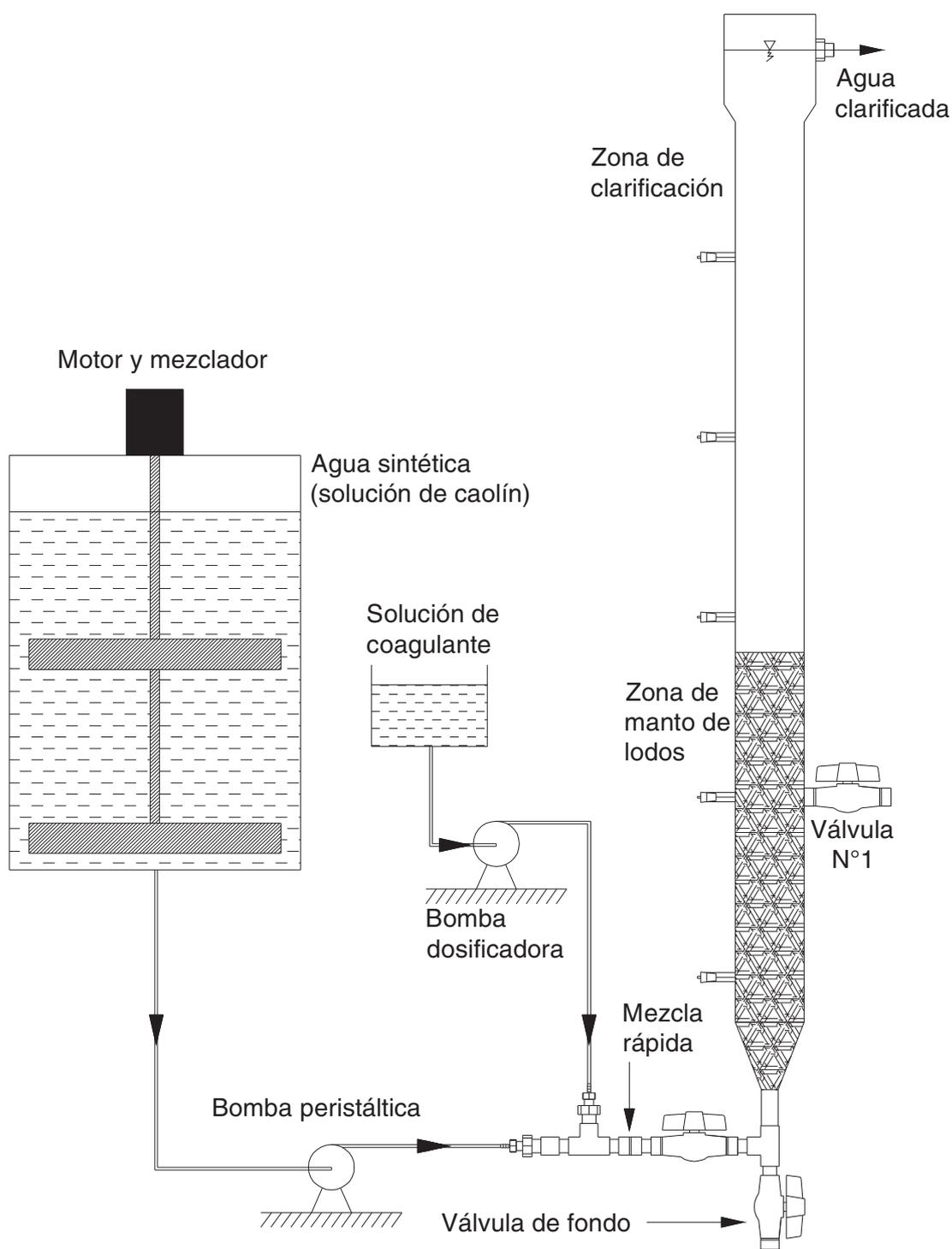
que dan origen a su clasificación como de “alta” o “baja” turbiedad, se obtuvieron a partir de los datos recolectados durante todo el año 2006 por Naranjo (2009), para el agua cruda de 31 sistemas de tratamiento ubicados en el departamento de Antioquia que tratan agua proveniente de fuentes superficiales como ríos y quebradas, además de fuentes de agua subterránea para algunos sistemas. El valor de 100 UNT corresponde al percentil 90, el cual indica que en el 90 % de las veces en estos sistemas durante el año 2006 se obtuvieron, en las fuentes de abastecimiento, turbiedades menores que este valor, mientras que el 70 % de las veces se presentaron turbiedades menores de 15 UNT (percentil 70).

### 2.3 Determinación de la dosis de coagulante

Se realizaron ensayos de jarras con un equipo de marca Phipps & Bird, con una capacidad de operación de 0 a 300 rpm. Se usaron como coagulantes sulfato de aluminio líquido tipo B producido por la empresa Sulfoquímica S.A. y el polímero catiónico C-235 de la empresa Novaquímica.

Para los ensayos de dosis óptimas de ambos coagulantes, se utilizaron soluciones al 1 % (peso/volumen) preparadas a partir de las densidades reportadas por los fabricantes. Se emplearon jarras de 2 L y se evaluaron dosis de coagulantes entre 20 y 130 mg/L de cada coagulante para el agua Tipo I y entre 5 y 70 mg/L para el agua Tipo II. La mezcla rápida se realizó a 250 rpm ( $G: 233 \text{ s}^{-1}$ ) durante un minuto y la mezcla lenta a 40 rpm ( $G: 21 \text{ s}^{-1}$ ) durante 15 min; se empleó un tiempo de sedimentación de 15 min.

De acuerdo con este método, para ambos coagulantes y para los dos tipos de agua evaluados, se seleccionó una dosis óptima de 60 mg/L, con la cual se obtenían turbiedades menores de 2,0 UNT, que es el límite establecido por la norma que regula la calidad del agua para consumo humano en Colombia. (Resolución 2115 de 2007 expedida por el Ministerio de Protección Social y el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial).



**Figura 1.** Esquema del sistema de clarificación de manto de lodos utilizado

**Tabla 1.** Características de las aguas sintéticas estudiadas

Parámetro	Tipo de agua	
	Tipo I	Tipo II
Turbiedad (UNT)	102	15,3
Color verdadero (UC)	3,5	1,7
Color aparente (UC)	17,7	3,7
Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	84	78
Acidez (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	20	14
pH (unidades de pH)	7,50	7,40
Calcio (mg Ca/L)	6,8	6,2
Magnesio (mg Mg/L)	0,17	0,087
Hierro total (mg Fe/L)	< L.D.M	< L.D.M
Conductividad eléctrica (mS/cm)	102,7	123,0

L.D.M.: Límite de detección del método (0,015 mg Fe/L)

## 2.4 Diseño experimental

En la parte experimental se aplicó un diseño factorial 2<sup>3</sup>, se evaluaron tres factores con dos niveles cada uno y se realizó una réplica de cada ensayo, lo que arroja un total de 16 ensayos. Los factores analizados fueron la tasa superficial (35 y 70 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.día), el tipo de agua por tratar (Tipo I y Tipo II) y el tipo de coagulante (sulfato de aluminio y polímero C-235). Este diseño se hizo con el fin de determinar el efecto de cada factor, es decir, el cambio en la respuesta (que para este caso fue el porcentaje de remoción de turbiedad), producido por un cambio en el nivel del factor. También se analizó la interacción entre los factores y su efecto sobre la respuesta del sistema.

De acuerdo con el volumen y el área superficial del clarificador evaluado, la carga superficial de 35 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.día corresponde a un caudal de 167,5 L/día y a un tiempo de retención hidráulica (TRH) teórico de 42,7 min, mientras que para la carga superficial de 70 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.día el caudal fue de 335 L/día y el TRH teórico de 21,9 min. Para ambas condiciones de operación,

el clarificador presentó predominancia de flujo tipo pistón, según el ensayo de trazadores efectuado.

Los ensayos se realizaron en forma aleatoria para minimizar el efecto que otros factores no incluidos en el análisis pudieran tener sobre los resultados. En la tabla 2 se presentan los niveles de cada factor evaluados en cada ensayo y las fechas en las cuales se ejecutaron. El diseño experimental y su análisis se realizaron con el software estadístico Minitab versión 15.1.20.0.

Cada ensayo tuvo una duración de 36 horas, definida a partir de una prueba preliminar con el agua Tipo I (alta turbiedad) y el coagulante sulfato de aluminio, donde se observó que a partir de las 24 horas el manto alcanzaba una altura aproximada de 20 cm (medida desde la parte superior de la zona cónica) y la remoción de turbiedad era alta.

Cada dos horas se tomó muestra del efluente (exceptuando el periodo comprendido entre las 6:00 p. m. y las 6:00 a. m. del siguiente día) para determinar la turbiedad, el pH y la temperatura del agua. Además se hacía seguimiento a la altura del manto de lodos y se anotaban las observaciones pertinentes.

En cuanto a los resultados, se calculó el promedio de remoción de turbiedad de las tres últimas horas en cada ensayo, datos que se tuvieron en cuenta para el análisis del diseño factorial.

También se “corrieron” cuatro ensayos sin la adición de coagulante, que se denominaron “blancos”, con el fin de evaluar el porcentaje de remoción de turbiedad que se producía como consecuencia de la sedimentación propia de las partículas presentes en los tipos de aguas estudiadas, sin la etapa de desestabilización. Para estos blancos también se determinaron la turbiedad y el porcentaje de remoción de turbiedad de las tres últimas horas para poder comparar con los resultados de los 16 ensayos mencionados. En la tabla 3 se describen los ensayos correspondientes a los cuatro blancos realizados.



**Tabla 2.** Descripción de los ensayos

Ensayo	Fecha del ensayo	Tipo de agua	Coagulante	Carga superficial (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .día)
1	15-16/10/09	II (15 UNT)	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	35
2	19-20/10/09	II (15 UNT)	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	70
3	21-22/10/09	II (15 UNT)	Polímero	70
4	23-24/10/09	I (100 UNT)	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	35
5	26-27/10/09	I (100 UNT)	Polímero	70
6	28-29/10/09	I (100 UNT)	Polímero	35
7	30-31/10/09	I (100 UNT)	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	70
8	3-4/11/09	II (15 UNT)	Polímero	70
9	5-6/11/09	I (100 UNT)	Polímero	70
10	9-10/11/09	II (15 UNT)	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	35
11	11-12/11/09	II (15 UNT)	Polímero	35
12	13-14/11/09	I (100 UNT)	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	70
13	17-18/11/09	II (15 UNT)	Polímero	35
14	19-20/11/09	I (100 UNT)	Polímero	35
15	23-24/11/09	I (100 UNT)	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	35
16	25-26/11/09	II (15 UNT)	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	70

**Tabla 3.** Descripción de los blancos

Ensayo	Fecha del ensayo	Tipo de agua	Carga superficial (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .día)
Blanco 1	27/11/09-28/11/09	II (15 UNT)	35
Blanco 2	30/11/09-01/12/09	I (100 UNT)	35
Blanco 3	02/12/09-03/12/09	I (100 UNT)	70
Blanco 4	04/12/09-05/12/09	II (15 UNT)	70

## 2.5 Análisis estadístico

Con el software Minitab se analizó el comportamiento normal de los resultados por medio del cálculo y las gráficas de residuos y la prueba de igualdad de varianzas. Luego de verificar estas

pruebas, se analizó el diseño factorial con el mismo paquete estadístico. Se determinaron los efectos estandarizados de los factores, su interacción en la remoción de turbiedad y se generó un diagrama de cubos para determinar condiciones óptimas de operación.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Corridos experimentales

Los promedios de turbiedad efluente y de remoción de turbiedad, calculados para las tres últimas horas de medición de cada ensayo, se reportan en la tabla 4.

Los remociones de turbiedad obtenidas en algunos ensayos con agua Tipo II y con ambos coagulantes fueron menores que las obtenidas con los blancos. Esto pudo ser causado por la reacción del coagulante con la alcalinidad y otros compuestos del agua que

generaba productos insolubles, como hidróxidos de aluminio que aportaban sólidos suspendidos y, por lo tanto, aumentaban la turbiedad del agua.

#### 3.2 Análisis del diseño factorial

Para el diseño experimental, se trabajó con el promedio de las remociones de turbiedad de las tres últimas horas de cada ensayo. Con esta información se generaron las gráficas de la figura 2 y la figura 3, que permiten determinar si los datos de remoción de turbiedad de los 16 ensayos siguen una distribución normal y si se cumple la hipótesis de igualdad de varianzas.

**Tabla 4.** Resultados de turbiedad en el efluente y remoción de turbiedad

Ensayo	Tipo de agua	Coagulante	Carga superficial (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .día)	Turbiedad promedio del efluente (UNT)	Remoción promedio de turbiedad (%)
1	II (15 UNT)	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	35	9,99	33,4
2	II (15 UNT)	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	70	13,1	12,2
3	II (15 UNT)	Polímero	70	12,7	15,1
4	I (100 UNT)	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	35	31,0	69,0
5	I (100 UNT)	Polímero	70	0,68	99,3
6	I (100 UNT)	Polímero	35	20,3	79,7
7	I (100 UNT)	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	70	1,37	98,6
8	II (15 UNT)	Polímero	70	12,6	15,8
9	I (100 UNT)	Polímero	70	1,40	98,6
10	II (15 UNT)	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	35	11,6	22,7
11	II (15 UNT)	Polímero	35	6,74	55,0
12	I (100 UNT)	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	70	0,77	99,2
13	II (15 UNT)	Polímero	35	7,96	47,0
14	I (100 UNT)	Polímero	35	19,5	80,5
15	I (100 UNT)	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	35	22,6	77,4
16	II (15 UNT)	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	70	13,4	10,7
Blanco 1	II (15 UNT)	-	35	9,19	38,7
Blanco 2	II (15 UNT)	-	70	12,5	16,4
Blanco 3	I (100 UNT)	-	70	98,8	1,2
Blanco 4	I (100 UNT)	-	35	45,6	54,4

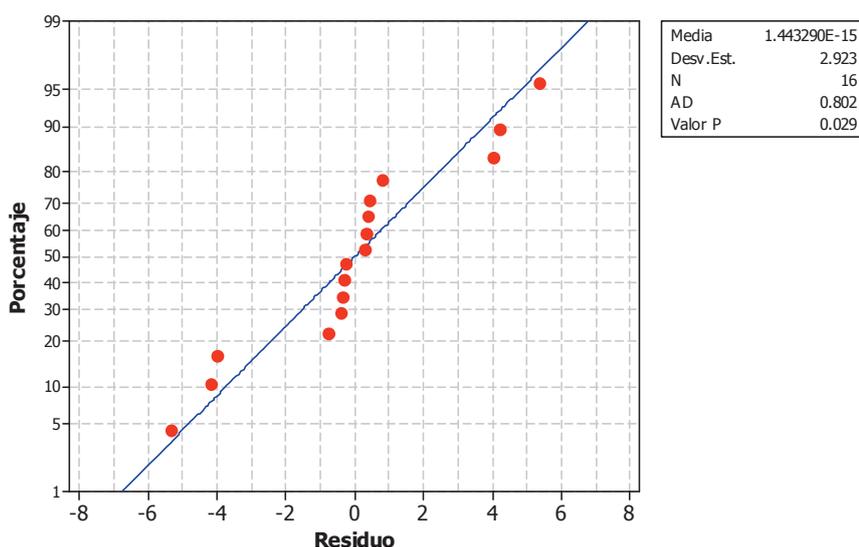


Figura 2. Probabilidad de residuos

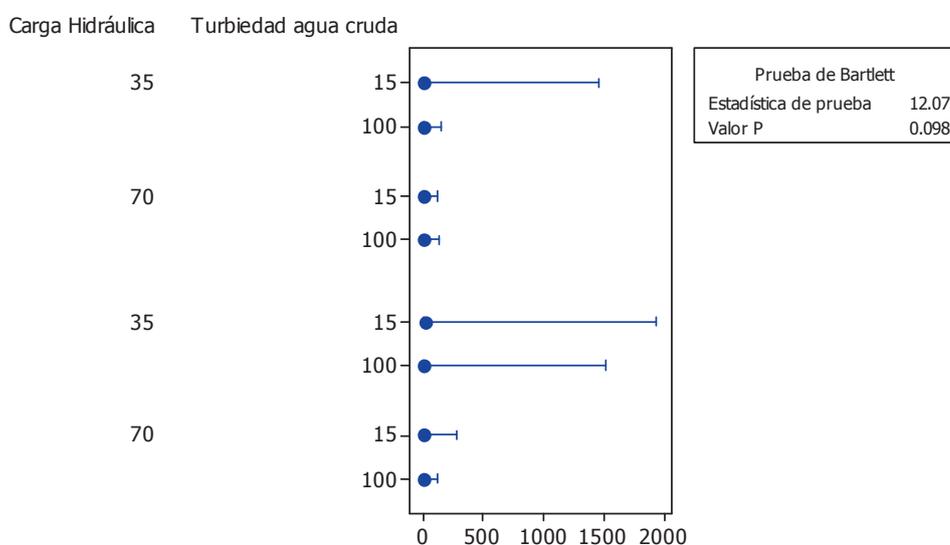


Figura 3. Prueba de igualdad de varianzas para residuos

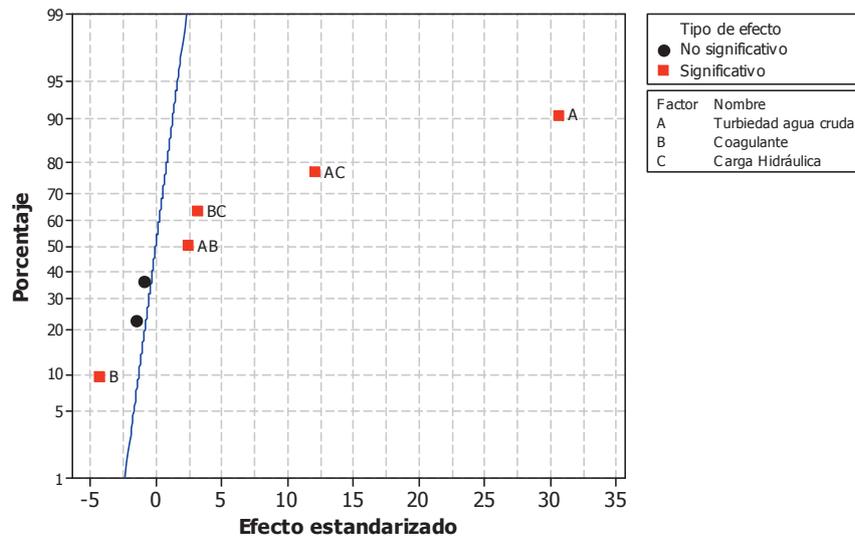
El valor p obtenido de la figura 3 ( $0,029 < 0,05$ ) indica que los datos de remoción de turbiedad de los 16 ensayos se alejan un poco de la distribución normal, sin embargo, el valor p de  $0,098 (> 0,05)$  obtenido en la prueba de igualdad de varianzas de Bartlett (figura 3) indica que no hay diferencia entre

las varianzas, es decir que se presenta igualdad u homogeneidad de varianzas, que es un requisito para poder analizar el diseño factorial.

*Efectos de interacción.* El modelo factorial implementado ( $2^3$ ) tiene tres efectos de interacción de

dos factores. La gráfica normal de efectos estandarizados (figura 4) y la tabla de efectos y coeficientes estimados para remoción de turbiedad (tabla 5) muestran que existe interacción significativa, dado

que todos los términos de las interacciones de dos factores tienen valores p menores de 0,05, lo que condiciona la interpretación de los efectos principales.



**Figura 4.** Gráfica normal de efectos estandarizados. Respuesta: Remoción de turbiedad (%),  $\alpha = 0,05$

*Efectos principales.* El modelo implementado contiene también tres efectos principales, y se obtuvieron valores p menores de 0,05 para los factores turbiedad del agua cruda y tipo de coagulante, indicando que estos factores tienen efectos significativos

que incluyen la interacción entre los factores restantes. A pesar de que el factor de carga hidráulica presentó un valor p mayor de 0,05, también tiene un efecto significativo en la remoción de turbiedad debido a la interacción con los demás factores.

**Tabla 5.** Efectos y coeficientes estimados para remoción de turbiedad (%)

Término	Efecto	Coefficiente	Coefficiente de EE	T	P
Constante		57,142	1,001	57,11	0,000
T.A.C.	61,317	30,659	1,001	30,64	0,000
Coagulante	-8,468	-4,234	1,001	-4,23	0,003
C.H.	-1,895	-0,948	1,001	-0,95	0,371
T.A.C. * Coagulante	5,010	2,505	1,001	2,50	0,037
T.A.C. * C.H.	24,182	12,091	1,001	12,08	0,000
Coagulante * C.H.	6,452	3,226	1,001	3,22	0,012
T.A.C. * Coagulante * C.H.	-3,025	-1,512	1,001	-1,51	0,169
S = 4,00222		PRESS = 512,567			
R <sup>2</sup> = 99,29 %		R <sup>2</sup> (predictivo) = 97,17 %		R <sup>2</sup> (ajustado) = 98,67 %	

T.A.C.: Turbiedad agua cruda. C.H.: Carga hidráulica



Los efectos sugieren que la turbiedad del agua cruda ejerce el efecto más significativo (61,317) sobre la remoción. Además, cuando se operó el clarificador con la turbiedad más alta del agua cruda (100 UNT) se produjo una remoción mayor que cuando se trabajó con la turbiedad baja del agua cruda (15 UNT). La interacción entre la turbiedad del agua cruda y carga hidráulica ejerce el segundo efecto más significativo (24,182) sobre la remoción de turbiedad, y su signo positivo indica que las mayores remociones de turbiedad se produjeron con la turbiedad del agua cruda de 100 UNT (agua Tipo I) y con la carga hidráulica de 70 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.día.

Para los resultados sobre remoción de turbiedad (ver tabla 6), se hace el siguiente análisis:

*Efectos de interacción.* El valor p de 0,000 para el conjunto de interacciones de dos factores es menor de 0,05. Por lo tanto, existe evidencia de que el efecto de algún factor depende del nivel de otro factor, como es el caso de la interacción entre la turbiedad del agua cruda y carga hidráulica.

*Efectos principales.* El valor p de 0,000 para el conjunto de efectos principales es menor de 0,05. Por ello, existe evidencia de un efecto significativo, es decir, al menos un factor tiene un efecto significativo sobre la remoción de turbiedad, como ocurre con la turbiedad del agua cruda.

**Tabla 6.** Análisis de varianza para remoción de turbiedad (%)

Fuente	GL	SC sec.	SC ajust.	MC ajust.	F	P
Efectos principales	3	15340,5	15340,5	5113,50	319,24	0,000
2-Interacciones de (No.) factores	3	2606,1	2606,1	868,70	54,23	0,000
3-Interacciones de (No.) factores	1	36,6	36,6	36,60	2,29	0,169
Error residual	8	128,1	128,1	16,02		
Error puro	8	128,1	128,1	16,02		
Total	15	18111,4				

Con el fin de complementar lo anterior, en la figura 5 se puede observar que las mayores remociones se obtuvieron cuando la turbiedad del agua cruda y la carga hidráulica (tasa superficial) presentaron los niveles más altos, es decir, para el agua Tipo I (100 UNT) y operando el clarificador con 70 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.día, que corresponde a los ensayos 5, 7, 9 y 12.

#### 4. CONCLUSIONES

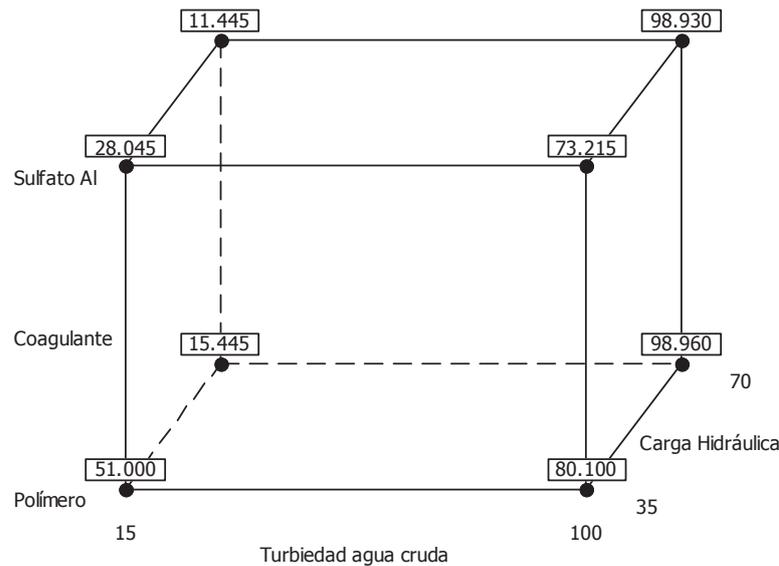
Según el análisis del diseño experimental implementado, los factores que más afectan la re-

moción de turbiedad en el CML son la turbiedad del agua cruda (tipo de agua) y la carga hidráulica o tasa superficial, y cuando estos factores presentan los niveles más altos (100 UNT y 70 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.día) se obtienen las mayores remociones (superiores al 98 %), que están relacionadas también con la formación de un manto de buenas características.

En los ensayos realizados con el agua Tipo I (100 UNT) se consiguieron remociones de turbiedad que superaron el 99 % y, por tanto, se obtuvo agua con turbiedades menores de 2 UNT (valor máximo establecido para aguas de consumo humano, según la Resolución 2115 de 2007). La diferencia entre

los resultados obtenidos con el agua Tipo I y Tipo II confirma que en la práctica siempre es más difícil flocular aguas de baja turbiedad, debido a que cuan-

do aumenta la turbiedad del agua, el coeficiente de aglomeración también aumenta, mejorando así la floculación (Canepa, 2008).



**Figura 5.** Cubos (media de los datos) para remoción de turbiedad (%)

Dado que los clarificadores de manto de lodos integran en una sola unidad varias operaciones o procesos de tratamiento, estos sistemas tienen una gran posibilidad de aplicación en el sector industrial, donde en muchas ocasiones la disponibilidad de área superficial para la ubicación de las plantas de tratamiento es un factor crítico.

Se recomienda para futuras investigaciones realizar estudios donde se tengan en cuenta otros factores no incluidos en este trabajo, como son la variación de la dosis de coagulante aplicada, la purga del manto de lodos, el empleo de ayudantes de floculación; también es importante que se evalúen otras respuestas, como pueden ser las características químicas y físicas del manto de lodos formado, además de la distribución de tamaño de partícula, tanto del agua cruda como del manto de lodos.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores reconocen el apoyo brindado por el Grupo de Ingeniería y Gestión Ambiental –GIGA– y el Laboratorio de Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Antioquia al abrir espacios que permiten el fortalecimiento de la investigación. De igual modo agradecen especialmente a los estudiantes de Ingeniería Sanitaria Guillermo Lora, Katherine Álvarez y Sebastián López por su valiosa ayuda en la fase experimental.

## REFERENCIAS

American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA) y Water Environment Federation (WEF). *Métodos estándar para el análisis de aguas y aguas residuales*, 20ª ed. Washington D.C., 1998.



- Canepa de Vargas, Lidia. *Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida. Manual I: Teoría. Tomo I. Capítulo 6*. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente –CEPIS–, Organización Panamericana de la Salud –OPS–, Lima, Perú, 2008.
- Chen, L. C.; Lee, D. J. and Chou, S. S. (2006). "Charge reversal effect on blanket in full-scale floc blanket clarifier". *Journal of Environmental Engineering*, vol. 132, No. 11 (November), pp. 1523-1526.
- Chen, L. C.; Sung, S. S.; Lin, W. W.; Lee, D. J.; Huang, C.; Juang, R. S. and Chang, Hsi-Lih. (2003). "Observations of blanket characteristics in full-scale floc blanket clarifiers". *Water Science and Technology*, vol. 47, No. 1, pp. 197-204.
- Colombia. Ministerio de Protección Social y Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. *Resolución 2115 de 2007: Características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano*. Colombia, 2007.
- Gobernación de Antioquia. Departamento Administrativo de Planeación. *Antioquia en cifras. Información subregional y municipal*. Medellín, 2005.
- Head, R.; Hart, J. and Graham, N. (1997). "Simulating the effect of blanket characteristics on the floc blanket clarification process". *Water Science and Technology*, vol. 36, No. 4, pp. 77-84.
- Lin, W. W.; Sung, S. S.; Chen, L. C.; Chung, H. Y.; Wang, C. C.; Wu, R. M.; Lee, D. J.; Huang, C.; 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, pp. 1481-1487.
- Naranjo F., Darío. 2009. *Desarrollo de un sistema compacto de potabilización*. Trabajo de grado. (Maestría en Ingeniería), Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Medellín, 2009.
- Ocampo E. Jesús A. y Salazar H. Martha C. *Comparación de la clarificación de agua en filtración gruesa ascendente en capas y en clarificadores de manto de lodos*. Trabajo de grado, (Ingeniería Sanitaria), Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Cali, 1999.
- Pavón, T. B.; Chávez, C. y Garrido, S. E. *Planta potabilizadora para pequeñas comunidades*. Memorias XXVI Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Lima, Perú, (noviembre 1-5 de 1998).
- Su, S. T.; Wu, R. M. and Lee, D. J. (2004). "Blanket dynamics in upflow suspended bed". *Water Research*, vol. 38, No. 1 (January), pp. 89-96.
- Sung, S. S.; Lee, D. J. and Huang, C. (2005). "Steady-state humic-acid-containing blanket in upflow suspended bed". *Water Research*, vol. 39, No. 51 (March), pp. 831-838.
- Yang, W. J.; Wang, C. C.; Hsu, R. Y. and Wu, R. M. (2008). "Two-phase flow simulation of reactor clarifiers". *Journal of the Chinese Institute of Chemical Engineers*, vol. 39, No. 3 (May), pp. 275-280.