

EVALUACIÓN DEL USO DEL POLICLORURO DE ALUMINIO EN CONJUNTO CON SULFATO DE ALUMINIO EN EL PROCESO DE COAGULACIÓN DE UNA PLANTA DE POTABILIZACIÓN DE AGUA EN EL ESTADO CARABOBO.

Alvarado, C.; Pérez H.; Saba, C.

Centro de Investigaciones Químicas. Facultad de Ingeniería. Universidad de Carabobo. Valencia. Estado Carabobo. Venezuela.

e-mail: c_alvarado_almarza@yahoo.es

Resumen: El objetivo del presente estudio fue la implementación del coagulante policloruro de aluminio en conjunto con sulfato de aluminio líquido para mejorar el proceso de potabilización de agua y así cumplir con la normativa vigente. Se diagnosticó el proceso actual, y se determinaron los parámetros físico-químicos (aluminio residual, turbidez, pH, tipo y tiempo de formación de flóculo y resuspensión) del agua cruda, sedimentada y tratada, se estudió el orden de adición de los coagulantes y su comportamiento frente a diferentes gradientes de velocidad y se estimó la relación costo-beneficio. Se comprobó una sobrecarga hidráulica en la planta que disminuye la efectividad de la etapa de sedimentación, y un gradiente de velocidad hidráulico inadecuado que requiere mayor tiempo de contacto con el coagulante para poder lograr mayor dispersión del mismo y atrapar la mayor cantidad de coloides presentes en ella.

Palabras clave: Aluminio residual, coagulación, gradiente de velocidad, potabilización.

EVALUATION OF THE USE OF POLY ALUMINUM IN CONJUNCTION WITH ALUMINUM SULFATE IN THE COAGULATION PROCESS IN A WATER PURIFICATION PLANT IN CARABOBO STATE

Abstract: The objective of this research was the implementation of the aluminum poly-chloride coagulate and liquid sulfate of aluminum for improving the process of potabilization of water and, in that way, fulfilling the current rules. The current process was diagnosed and the physicochemical parameters of crude, decanted and treated water were determined (residual aluminum, turbidity, pH, type and time of formation of flocculate and re-suspension); the sequence of addition of the coagulants was determined, as well as its influence under several velocity gradients, and the cost-benefit ratio was estimated. A hydraulic surcharge was determined in the plant that decreases the effectiveness of the stage of sedimentation, and an atmospheric pressure differential of hydraulic inadequate velocity that requires bigger time of contact with the coagulant to be able to achieve bigger dispersion of the same and an inadequate hydraulic gradient of velocity that requires a longer contact time with the coagulant in order to have bigger dispersion of it and to collect the largest amount of colloids. The aluminum poly-chloride turned out to be the best coagulant

Key words: Residual aluminum, coagulation, differential hydraulic velocity, potabilization

INTRODUCCIÓN

El agua es uno de los tantos recursos naturales renovables que proporciona la naturaleza todos los días en forma individual, en la vida cotidiana y en la sociedad, para consumo, aseo, uso doméstico e industrial. El agua forma parte de la vida misma, pues todos los seres vivos tienen en su composición, un alto contenido de agua. Esta fuente indispensable para la humanidad, es un elemento vital para el desarrollo y sustento de la vida en nuestro planeta. Es uno de los solventes más poderosos y por ende, más susceptible a contaminarse por un sinnúmero de sustancias, llegando a convertirse en uno de los problemas ambientales más graves de la humanidad.

Este recurso es indispensable para la vida y por muchos años el hombre la aprovechó para su consumo tal cual como se encontraba en la naturaleza. Sin embargo en la actualidad, debido a los grandes desarrollos tecnológicos y creación de industrias, el ambiente en general y en especial el agua han sido víctimas de un grado de contaminación alto. Es aquí donde radica la importancia del proceso de potabilización del agua, cuyo fin primario es la obtención de agua apta para consumo humano ya que permite eliminar todas aquellas impurezas presentes en el agua cruda debido a la innumerable contaminación ambiental que se presenta en la actualidad (Arboleda, 2002; Henry y Heinke, 1999; Delgado, 2004).

Por tal motivo, se considera la presente investigación como una contribución a la mejora de dicho proceso, cuyo objetivo general es evaluar la implementación de policloruro de aluminio en conjunto con el sulfato de aluminio líquido en el proceso de coagulación de una planta de potabilización

de agua, y proponer alternativas que permitan incrementar la eficiencia del mismo.

En vista de la importancia que tiene el agua para el desarrollo de la vida en general en el planeta y con el propósito de contribuir a la solución de enormes problemas ambientales en el ámbito del agua para consumo humano, la empresa Hidrológica del Centro Hidrocentro C.A., da inicio a esta investigación en conjunto con el Centro de Investigaciones Químicas de la Universidad de Carabobo para la mejora continua y además dar cumplimiento a las regulaciones ambientales establecidas en la Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela N° 36.395 para garantizar la potabilización del agua destinada al consumo humano.

METODOLOGÍA

Lugar de la investigación

Esta investigación fue realizada en una Planta de Potabilización de Agua de la filial Hidrocentro ubicada en Noguera en el Estado Carabobo, que procesa el agua proveniente del embalse Pao Las Balsas ubicada en el estado Cojedes, cuyo flujo de entrada a la planta es de 7100 L/s aproximadamente, en donde se realizan los procesos de desinfección, y potabilización.

Diagnóstico de la Planta de Potabilización

Para determinar las condiciones iniciales de operación de la planta, se realizó la recopilación de datos en el proceso, como las propiedades físico-químicas del agua, y adicionalmente se determinó la eficiencia del proceso de coagulación. Por medio de la inspección y recorrido realizado al proceso de potabilización de la Planta (Figura 1) se identificó la secuencia del proceso, la importancia de cada una de las etapas que lo conforman, los turnos que se laboran

para la obtención del agua potable, y la identificación de las condiciones de operación, ubicación y funcionamiento de cada uno de los equipos empleados en el tratamiento.

Se recopiló información sobre el proceso de potabilización de agua (proceso de coagulación), mantenimiento, sistema de bombeo y tuberías, así como los requerimientos del coagulante implementado en el proceso (Aristigueta, 2001; Díaz y Sangrona, 2002; Fernández y Moncada, 2003; Colmenares, 2002).

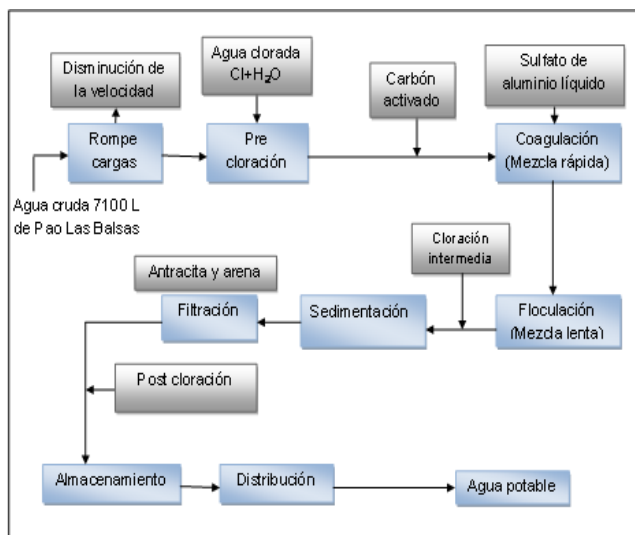


Figura 1. Diagrama de flujo de la Planta de Potabilización

Análisis del comportamiento de policloruro de aluminio y sulfato de aluminio cuando actúan por separado en el proceso de coagulación y orden de adición

El análisis del comportamiento del policloruro de aluminio y sulfato de aluminio cuando actúan por separado se inició con la fase experimental de la investigación, con la finalidad de conocer cuáles eran las condiciones adecuadas para la

implementación de coagulantes en el proceso de coagulación, determinando así el comportamiento de la planta. Para ello se realizaron mediciones del caudal de entrada (agua cruda), pruebas de jarra y toma de muestras al terminar cada ensayo de jarra, determinando sus características físico-químicas y obtener un patrón de comportamiento de dichos coagulantes.

Posteriormente, para la determinación de las dosis de coagulante y orden de adición, se realizó un estudio mediante la implementación de ensayos de jarra, tomando como prioridad la determinación de la dosis de coagulantes (sulfato de aluminio líquido y policloruro de aluminio) variando las dosis de dichos coagulantes, para luego al obtener las dosis con la mejor respuesta en el ensayo de jarra y finalmente el análisis físico-químico se varió el orden de adición de dichos coagulantes (Zhonglian *et al.*, 2010; Aristigueta, 2001).

Ensayo de jarras

Para el ensayo de jarras inicialmente se preparó una solución de sulfato de aluminio, y luego se determinó la cantidad de sulfato de aluminio líquido a ser añadida a cada jarro con variaciones entre 10 y 60 ppm. Posteriormente se prepararon las soluciones de cloro, carbón activado, y policloruro de aluminio, ésta última con variaciones de 5 a 30 ppm; todo esto para un volumen total de 1000 mL de agua cruda por jarra. Se sometió a una mezcla rápida de 50 rpm por un lapso de 1 min, luego se sometió a una mezcla lenta de 16 rpm por un lapso de 8 min, y se dejó sedimentar durante 30 min. Finalmente se tomaron muestras de 250 mL tomando en cuenta que los primeros 5 mL fueron desechados (Eaton *et al.*, 2005: Standard Methods 2120.d, 2130.d, 2510.d, 2310.d, 2320.d, 2340.d, 3500.d, 4500.d).

Determinación de las dosis y el orden de adición de sulfato de aluminio y policloruro de aluminio, al ser combinados en el proceso de coagulación, para su mayor efectividad

Se procedieron a realizar ensayos de jarra con variaciones de las concentraciones de dichos coagulantes. Para esto se fijó la dosis más baja de policloruro de aluminio (5 ppm) y se varió la dosis de sulfato de aluminio líquido partiendo desde 10 hasta 60 ppm. Este mismo procedimiento se realizó con el policloruro de aluminio con concentraciones de 7 y 10 ppm, estableciendo las combinaciones de concentración de coagulantes más efectivas.

Para el análisis se consideraron los factores: tiempo de formación del flóculo, tamaño del flóculo, resuspensión y parámetros físico-químicos. Una vez establecida las dosis de coagulantes más efectivas en el proceso de coagulación, se procedió a determinar el orden de adición de dichos coagulantes que mejorara la efectividad del proceso (Zhonglian *et al.*, 2010; Maguire, 2009).

Establecimiento del gradiente de velocidad adecuado para la optimización del proceso de coagulación

Para la determinación del gradiente óptimo de velocidad, se realizó un estudio exhaustivo del gradiente de velocidad manipulado en la planta, para ello se procedió a estudiar todo el material bibliográfico referente al cálculo del gradiente de velocidad (Arboleda, 2002). Cabe destacar que en la planta actualmente solo se posee una mezcla hidráulica, es por ello que los cálculos fueron referidos a esa condición. Dichos cálculos partieron de las dimensiones de la planta, específicamente del área de coagulación (Arboleda, 2002; Crites y Tchobanoglous, 2000).

Después de realizar los cálculos respectivos al gradiente de velocidad hidráulico manipulado en la planta se procedió a determinar las rpm correspondientes a ese gradiente calculado, una vez obtenido el gradiente real de planta y por ende las rpm que se deben aplicar al ensayo de jarra para simular el proceso en planta como tal, se procedió a realizar un barrido de velocidades (variación de las rpm), dejando en el centro del análisis la velocidad real de la planta es decir, se tomaron velocidades por arriba y por debajo de la velocidad real de la planta. Para esto se realizaron ensayos de jarra, con la diferencia de que ahora la mezcla rápida no se evaluaría a 50 rpm, sino que esta velocidad sería un parámetro variable para la realización del estudio correspondiente a la influencia de esta velocidad en el proceso de coagulación.

El cálculo del gradiente de velocidad con mezclado hidráulico se realizó mediante las ecuaciones 1 a 3.

➤ Cálculo de la potencia disipada en el líquido

$$P = \frac{\gamma \cdot Q \cdot h_f}{V} \quad (1) \quad (\text{Arboleda, 2002})$$

Donde:

P : Potencia disipada ($\text{kg/m}^3 \cdot \text{s}^3$)

γ : Peso específico, ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}^2$)

h_f : Pérdida de carga total, (m)

V : Volumen de la celda de floculación, (m^3)

Q : Caudal de entrada a la celda, (m^3/s)

➤ Cálculo de la pérdida de carga asociada

$$h_f = k \cdot \left(\frac{v^2}{2 \cdot g} \right) \cdot n \quad (2) \quad (\text{Arboleda, 2002})$$

Donde:

h_f : Pérdida de carga total (m)

k : Coeficiente determinado en forma empírica

para cada tipo de punto singular (Adim.)

v : Velocidad media del fluido (m/s)

g : Aceleración de la gravedad (m/s^2)

n : Número de pantallas o deflectores (Adim.)

➤ Cálculo del gradiente de velocidad.

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu}} \quad (3) \quad (\text{Arboleda, 2002})$$

Donde:

μ : Viscosidad absoluta del agua a temperatura de operación de 25 °C ($kg/m*s$).

P : Potencia disipada ($kg/m*s^3$).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Diagnóstico de la Planta de Potabilización

Para el diagnóstico de la planta se determinó de acuerdo a su proceso productivo, que esta fue diseñada para un caudal de agua de 5000L/s y que se ha ido expandiendo hasta manejar en la actualidad 7100 L/s, lo que conlleva a una sobre carga hidráulica. Las etapas del proceso de potabilización son: coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección. Luego en la revisión histórica del proceso actual de la planta se observó que los parámetros físico-químicos determinantes fueron: el aluminio residual y la turbidez.

Las concentraciones de aluminio residual del agua cruda se encuentran por debajo de la unidad deseable establecida por la norma vigente de calidad del agua potable (Gaceta oficial de la República Bolivariana de Venezuela 36.395 del año 1998), lo cual indica que el agua cruda posee una concentración de aluminio residual despreciable la cual no contribuye al incremento de este parámetro después del proceso de coagulación, lo cual se puede observar en la figura 2. Cabe destacar que las concentraciones de este parámetro en el agua tratada son elevadas, esto se debe a la

implementación de sulfato de aluminio como coagulante y al tipo de coagulación utilizado en la planta (coagulación por barrido), la capa esponjosa formada es abundante para atrapar la mayor cantidad de coloides presentes en el agua ocasionando un exceso de aluminio en el agua sedimentada.

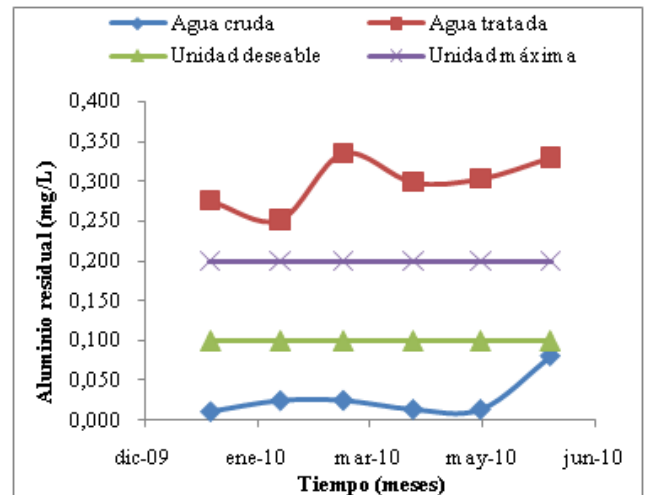


Figura 2. Concentraciones de aluminio residual en el agua cruda y tratada (hasta el proceso de sedimentación)

La turbidez a medida que avanza el tiempo (figura 3), tiende a aumentar debido a las condiciones ambientales, el agua cruda posee valores elevados en algunos de los meses y en otros valores dentro de norma, lo que hace reflejar que este parámetro no presenta valores significativamente elevados. Por otra parte los valores de turbidez del agua tratada se encuentran dentro norma de acuerdo a la norma vigente de calidad del agua potable (Gaceta oficial de la República Bolivariana de Venezuela 36.395 del año 1998), lo que indica que el proceso de potabilización es efectivo logrando una mejoría significativa en este parámetro, maximizando la calidad del agua.

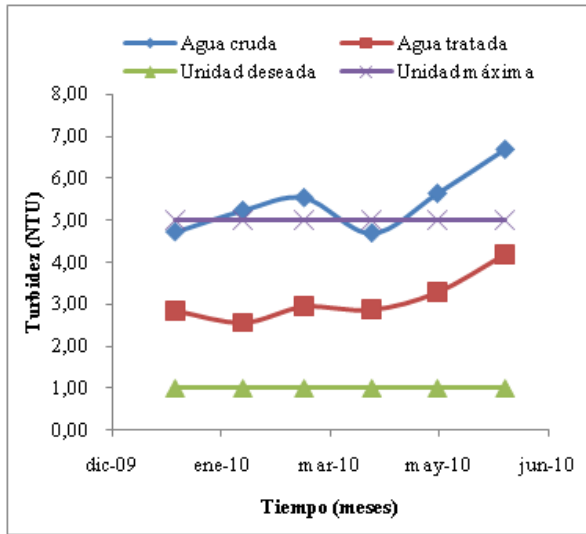


Figura 3. Comportamiento de la turbidez en el agua cruda y tratada

Finalmente, se escogieron aquellos factores que pudieran someterse a modificaciones para mejorar la eficiencia del proceso de coagulación mediante un diagrama de causa efecto, descartándose automáticamente los que no pudieran ser modificados.

Los factores seleccionados fueron: (a) la ausencia de otro coagulante que ayude a mejorar el proceso de coagulación, por ejemplo el policloruro de aluminio, (b) el pH óptimo de coagulación, porque en la planta no se realiza el control de este parámetro justo en este proceso, (c) el efecto de la concentración de coagulantes ya que no se han realizado pruebas a nivel de planta de la variación de estas concentraciones y (d) la técnica de dosificación de coagulante, ya que el coagulante no se dosifica proporcionalmente en toda la masa de agua.

Análisis del comportamiento de policloruro de aluminio y sulfato de aluminio

Para el análisis de comportamiento de dichos coagulantes por separado, se determinó que el parámetro relevante en

este estudio fue el aluminio residual, en donde se muestra la superioridad de policloruro de aluminio (PAC) sobre el sulfato de aluminio líquido (SAL), ya que para todas las dosis PAC, las concentraciones de aluminio residual se encuentran dentro de los parámetros de calidad, como se muestra en las figuras 4 y 5.

Esto se debe a que el policloruro de aluminio es un polímero inorgánico que permite atrapar la mayor cantidad de coloides presentes en el agua sin desprender aluminio residual debido a sus fuertes enlaces de cadena inorgánica, en cambio el SAL carga en su totalidad de aluminio todos flóculos formados, ocasionando que un solo flóculo sin sedimentar eleve las concentraciones de aluminio residual a la salida del proceso (Zhonglian *et al.*, 2010).

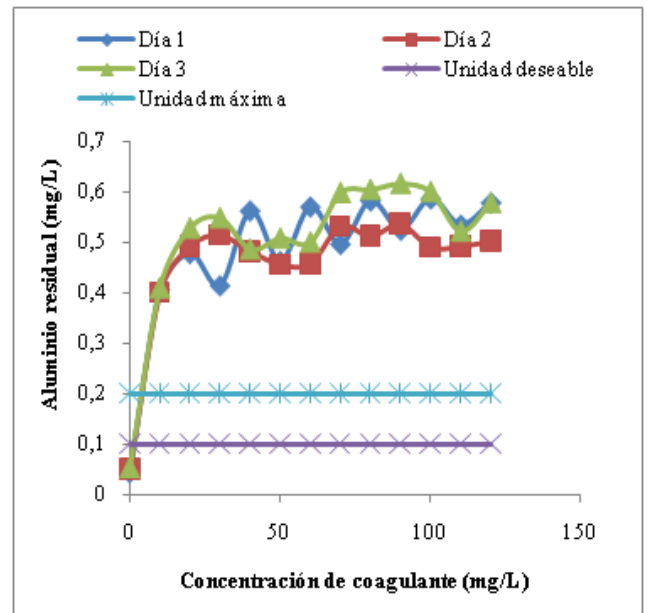


Figura 4. Concentraciones del aluminio residual en el agua cruda y de cada una de las dosis de sulfato de aluminio líquido

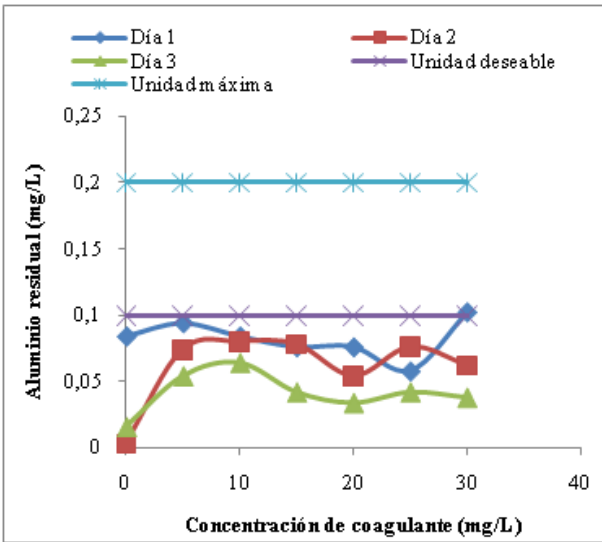


Figura 5. Concentraciones del aluminio residual en el agua cruda y sedimentada, para las distintas dosificaciones de policloruro de aluminio agregada

Para la determinación de la dosis y orden de adición de dichos coagulantes, se obtuvo que el parámetro físico-químico más determinante en este análisis fue la turbidez la cual se muestra en la Figura 6, donde se puede observar que las dosis de mejor comportamiento sin causar resuspensión de flóculos fueron: 10 mg/L de PAC con 20 mg/L de SAL, 7 mg/L de PAC con 30 mg/L de SAL y 5 mg/L de PAC con 40 mg/L de SAL.

Esto se debe a que estas dosis logran dispersarse sobre toda la masa de agua atrapando la mayor cantidad de coloides presentes en ella logrando una remoción de turbidez efectiva maximizando el proceso, gracias a que el SAL se dispersa de manera más rápida gracias a su cantidad añadida, mientras que el PAC les proporciona el peso necesario a los flóculos para su posterior resuspensión.

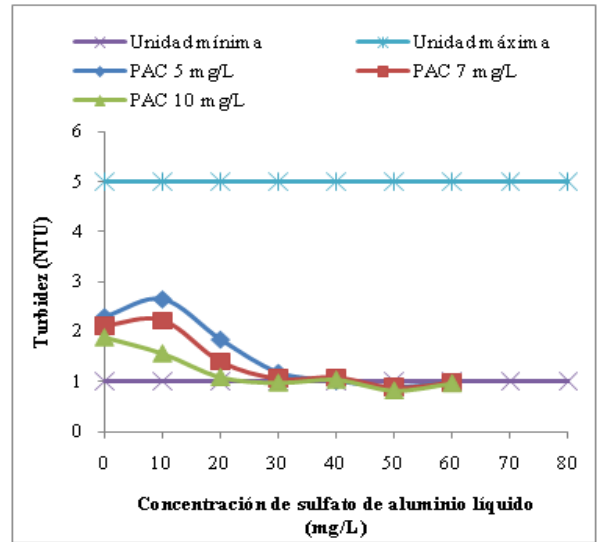


Figura 6. Comportamiento de la turbidez en el agua cruda y sedimentada de acuerdo a las variaciones de cada una de las dosis de policloruro de aluminio y sulfato de aluminio líquido

En cuanto al orden de adición, niveles más bajos de turbidez, esto se debe a que el SAL al adicionarse primero, atrapa la mayor cantidad de coloides presentes en el agua, logrando una remoción eficaz de la turbidez, al momento que entra en contacto el PAC con la mezcla, ésta ya posee pequeñas formaciones de flóculos en la masa de agua, por lo que es más fácil atraparlos y proporcionarles el peso necesario para sedimentar. El orden PAC-SAL no logra esta efectividad ya que el PAC al atrapar los coloides modifica de cierta manera la carga presente en ellos, y al entrar en contacto el SAL, no existe la fuerza de atracción necesaria para la formación de flóculos con el peso preciso para sedimentar.

Establecimiento del gradiente de velocidad adecuado para la optimización del proceso de coagulación

Partiendo de los resultados obtenidos anteriormente, se tomaron en consideración para el estudio del gradiente de velocidad óptimo, delimitando así el rango de

aplicación de coagulantes para determinar con mayor efectividad la influencia del gradiente de velocidad en el proceso, y establecer el más adecuado de acuerdo a los coagulantes utilizados, sus dosis y orden de adición, las cuales se determinaron anteriormente. Es importante hacer notar que para ello primero se determinó el gradiente de velocidad existente en la planta y partiendo de ello se tomaron gradientes de velocidad con la intención de ampliar el rango de aplicación del mismo, determinado su efectividad en el proceso.

En la tabla N°1, se presentan los resultados obtenidos correspondientes al tiempo de formación del flóculo, y se puede observar que a medida que aumenta el gradiente de velocidad aplicado en la mezcla rápida este tiempo aumenta, ya que la agitación logra dispersar todo el coagulante en la masa de agua y la rapidez con la cual estos actúan sobre los coloides disminuye el tiempo de formación de los flóculos, ya que aumenta la cantidad de coloides a absorber. Cabe destacar, que a pesar que el tiempo de formación del flóculo aumenta, a mayor gradiente de velocidad se logra una dispersión de coagulante más efectiva abarcando la mayor cantidad de coloides presentes en el agua, y por ende aumenta el rango de aplicación, ya que todo el coagulante es dispersado en la masa de agua logrando así una mayor eficiencia en el proceso (Maguire, 2009; Wang and Hung, 2007).

Cuando el gradiente de velocidad es pequeño, el coagulante al ser agregado se pone en contacto con los coloides presentes en el agua e inmediatamente las fuerzas de atracción empiezan a actuar formando los flóculos en un menor tiempo, sin embargo, a estos gradientes de velocidad los coagulantes no logran atrapar toda la materia en suspensión, ya que no se logra la dispersión total de los mismos, lo que implica

una disminución en la efectividad del proceso observándose en los parámetros físico-químicos como la turbidez.

Tabla N°1. Resultados obtenidos en los ensayos de jarra durante la determinación del gradiente de velocidad adecuado para el proceso de coagulación

Parámetro	Gradiente de velocidad, (s ⁻¹)	Dosis de SAL mg/L	Dosis de PAC mg/L	Resultado
Tiempo de formación del flóculo (s)	115	60	0	30
		0	20	90
		20	10	90
		30	7	90
		40	5	30
	154	60	0	30
		0	20	90
		20	10	90
		30	7	90
		40	5	30
	420	60	0	60
		0	20	180
		20	10	120
		30	7	120
		40	5	60
	714	60	0	60
		0	20	180
		20	10	120
		30	7	120
		40	5	60

En la continuación de la tabla N°1, se presentan de igual forma los resultados obtenidos en cuanto a la resuspensión y se aprecia que cuando la proporción de sulfato de aluminio líquido sobrepasa a la proporción de policloruro de aluminio, presenta mayor resuspensión, ya que la cantidad de policloruro de aluminio no es suficiente para actuar sobre todos los coloides presentes en el agua, lo que implica que los flóculos no alcanzan el peso necesario para sedimentar disminuyendo la efectividad del proceso. Cuando las proporciones de policloruro de aluminio son mayores o iguales a las del sulfato de aluminio líquido, no se presenta ningún tipo de resuspensión a medida que varía el gradiente de velocidad.

Tabla N°1 (Continuación). Resultados obtenidos en los ensayos de jarra durante la determinación del gradiente de velocidad adecuado para el proceso de coagulación

Parámetro	Gradiente de velocidad, (s ⁻¹)	Dosis de SAL mg/L	Dosis de PAC mg/L	Resultado
Resuspensión	115	60	0	Regular
		0	20	Ninguna
		20	10	Ninguna
		30	7	Ninguna
		40	5	Poca
	154	60	0	Regular
		0	20	Ninguna
		20	10	Ninguna
		30	7	Ninguna
		40	5	Poca
	420	60	0	Regular
		0	20	Ninguna
		20	10	Poca
		30	7	Poca
		40	5	Regular
	714	60	0	Regular
		0	20	Ninguna
		20	10	Poca
		30	7	Poca
		40	5	Poca

Es importante hacer notar que cuando el gradiente de velocidad aumenta, se hace necesario el aumento de policloruro de aluminio en el proceso, para que los flóculos adquieran el peso necesario para sedimentar, evitando de manera considerable una posible resuspensión (Matilanen *et al.*, 2010).

En cuanto al aluminio residual presentado en la tabla N°2, se puede observar que sus valores disminuyen cuando disminuye la proporción de sulfato de aluminio líquido, ya que cuando se obtienen gradientes de velocidad elevados el coagulante se dispersa en su totalidad y predomina el coagulante que se encuentra en mayor proporción, que en este caso es el sulfato de aluminio líquido, debido a esta dispersión, el

policloruro de aluminio no puede ofrecer de manera efectiva el peso necesario para la sedimentación de todos los flóculos (Zhonglian *et al.*, 2010), quedando microfóculos dispersos en la masa de agua que proporcionan concentraciones elevadas de aluminio residual, lo cual implica una disminución en la efectividad del proceso, esto trae como consecuencia que existan diferencias significativas entre los tratamientos a medida que varía el gradiente de velocidad lo cual se pudo constatar estadísticamente mediante un análisis de varianza (siendo $F=31,39211$ mayor al $F_{0,05}=2,137$), implicando que este parámetro si es determinante para la obtención del gradiente de velocidad más efectivo de acuerdo a las dosis de coagulante utilizados.

Tabla N°2. Resultados obtenidos en el parámetro aluminio residual durante la determinación del gradiente de velocidad adecuado para el proceso de coagulación

Gradiente de velocidad, (s ⁻¹)	Tratamiento	Dosis de SAL mg/L	Dosis de PAC mg/L	Resultado
115	T1	60	0	0,572
	T2	0	20	0,06
	T3	20	10	0,491
	T4	30	7	0,486
	T5	40	5	0,461
154	T6	60	0	0,56
	T7	0	20	0,065
	T8	20	10	0,445
	T9	30	7	0,546
	T10	40	5	0,46
420	T11	60	0	0,553
	T12	0	20	0,098
	T13	20	10	0,539
	T14	30	7	0,454
	T15	40	5	0,426
714	T16	60	0	0,508
	T17	0	20	0,101
	T18	20	10	0,398
	T19	30	7	0,405
	T20	40	5	0,365

La turbidez por otro lado presentada en la tabla N°3 sí se ve influenciada por el gradiente de velocidad lo cual se pudo comprobar experimentalmente y estadísticamente mediante un análisis de varianza (siendo $F=3,002$ mayor al $F_{0,05}=2,137$), esto es debido a que a medida que aumenta este gradiente, la dispersión de coagulante aumenta logrando así atrapar la mayor cantidad de coloides presente en el agua, lo cual se pone en manifiesto al observar que los valores de turbidez disminuyen a medida que aumenta el gradiente de velocidad, logrando aumentar la eficiencia del proceso de manera considerable para cada una de las combinaciones de dosis de coagulantes aplicadas en la etapa de coagulación simulado mediante ensayos de jarra, implicando que este parámetro si es de vital importancia y determinante para la selección del gradiente de velocidad óptimo para el proceso de coagulación (Arboleda, 2002; Wang and Hung, 2007; Zhonglian *et al.*, 2010).

Tabla N°3. Resultados obtenidos en el parámetro de turbidez durante la determinación del gradiente de velocidad adecuado para el proceso de coagulación

Gradiente de velocidad, (s ⁻¹)	Tratamiento	Dosis de SAL mg/L	Dosis de PAC mg/L	Resultado
115	T1	60	0	0,931
	T2	0	20	1,040
	T3	20	10	1,170
	T4	30	7	1,150
	T5	40	5	0,978
154	T6	60	0	0,956
	T7	0	20	0,999
	T8	20	10	1,18
	T9	30	7	1,049
	T10	40	5	0,936
420	T11	60	0	0,748
	T12	0	20	0,62
	T13	20	10	0,789
	T14	30	7	0,772
	T15	40	5	0,720
714	T16	60	0	0,854
	T17	0	20	0,62
	T18	20	10	0,83
	T19	30	7	0,835
	T20	40	5	0,839

CONCLUSIONES

El caudal manipulado por la planta es elevado, trayendo como consecuencia una sobrecarga hidráulica que influye en la sedimentación de los flóculos. Se determinó que el punto de adición de los coagulantes está netamente interrelacionado con el gradiente de velocidad utilizado en la sección de mezcla rápida. Se comprobó que la dosis más adecuada cuando se implementa solo sulfato de aluminio líquido como coagulantes fue de 60 mg/L para el tipo de agua tratada en la planta.

Se determinó que la dosis de policloruro de aluminio más adecuada cuando se utiliza solo en el proceso de coagulación fue de 20 mg/L. Se comprobó que el policloruro de aluminio supera en eficiencia al sulfato de aluminio líquido. Las dosis de sulfato de aluminio líquido y policloruro de aluminio más efectivas en el proceso de coagulación cuando trabajan en conjunto, fueron: 40-5 mg/L, 30-7 mg/L, 20-10 mg/L respectivamente. Se observó que a mayor gradiente de velocidad la turbidez disminuye a medida que aumenta la concentración de policloruro de aluminio, al igual que cuando este trabaja solo en proceso de coagulación.

El costo del policloruro de aluminio supera el costo del sulfato de aluminio, pero los beneficios estimados durante la implementación de policloruro de aluminio como coagulante son superiores a las combinaciones realizadas, y a la condición actual.

AGRADECIMIENTOS

La presente investigación ha sido realizada con la participación concedida por la Empresa Hidrocentro.

REFERENCIAS

Arboleda, Jorge. (2002). Teoría y práctica de la purificación del agua. México. Editorial McGraw Hill. 3era edición. Tomo I y II.

Aristigueta, Egleé. (2001). Estudios de Coagulación-Floculación con Sulfato de Aluminio y Polímero en la planta de potabilización Ing. Lucio Baldó Soulés. Trabajo especial de grado no publicado. Valencia-Venezuela.

Colmenares, Gerardo. (2002). Curso básico de control de procesos, calidad y potabilización de agua. Hidrocentro C.A. Caracas-Venezuela.

Crites, R. y Tchobanoglous, G. (2000). Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones. Colombia: Mcgraw-Hill Interamericana, S.A.

Delgado, José. (2004) (En línea). Potabilización del agua. Pontificia Universidad Católica de Chile. Disponible en <http://www.uc.cl/quimica/agua/potabiliz.htm>.

Díaz, Rudy y Sangrona, José. (2002). Evaluación Técnico-Económica para la mejora del sistema de dosificación e inyección de químicos en la planta de potabilización Dr. Alejo Zuloaga de la C.A. Hidrologica del centro. Trabajo especial de grado no publicado. Valencia-Venezuela.

Eaton Andrew, Clesceri Lenore, Rice Eugene and Greenberg Arnold. (2005). Standard Methods” 21st edition, edition centennial.

Fernández, Liliana y Moncada, Ronald. (2003). Evaluación y mejoramiento de la planta de tratamiento de agua potable de tinaco. Trabajo especial de grado no publicado. Valencia-Venezuela.

Henry, J y Heinke, G. (1999). Ingeniería ambiental. Mexico: Pearson Educación.

Maguire, Ian. (2009). El efecto de las condiciones de la coagulación en la distribución del tamaño del flóculo y morfología, implicaciones para el tratamiento de los procesos aguas abajo". Tesis. Disponible en <http://hdl.handle.net/1957/13872>

Matilainen, Anu, Vepsalainen, Mikko, y Sillanpaa, Mika. (2010). Remoción natural de la materia orgánica por la coagulación durante el tratamiento de agua potable. Avances en el coloide y la ciencia de la interfaz, pp. 189-197. Laboratorio de Química Ambiental Aplicada, Departamento de Ciencias Ambientales de la Universidad de Finlandia Oriental.

Wang, L. y Hung, Y. (2007). Physicochemical treatment processes. Estados Unidos: Humana Press.

Yang, Zhonglian, GAO Baoyu, YUE, Qinyan. (2010). El rendimiento de la coagulación y la especiación de aluminio residual de $Al_2(SO_4)_3$ y el policloruro de aluminio (PAC) en el tratamiento del agua del Río Amarillo. Ingeniería Química Diario, p. 122. Universidad de Shandong. República Popular de China.

Fecha de recepción: 11 de octubre de 2014

Fecha de aceptación: 13 de noviembre de 2014