

CLARIFICACIÓN DE AGUAS USANDO COAGULANTES POLIMERIZADOS: CASO DEL HIDROXICLORURO DE ALUMINIO

WATER CLARIFICATION USING POLYMERIZED COAGULANTS: ALUMINUM HYDROXYCHLORIDE CASE

JUAN MIGUEL COGOLLO FLÓREZ

Ingeniero de Alimentos, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, jmcogollof@unal.edu.co

Recibido para revisar agosto 11 de 2009, aceptado septiembre 16 de 2010, versión final octubre 5 de 2010

RESUMEN: En este artículo se realiza un estudio del proceso de clarificación en sistemas de tratamiento de aguas industriales usando un coagulante inorgánico polimerizado (hidroxiclорuro de aluminio). Inicialmente, se establecen los elementos conceptuales más importantes de las etapas del proceso de clarificación (coagulación, floculación y sedimentación). Luego, se señalan los principales coagulantes convencionales utilizados en el tratamiento de aguas y se abordan los policloruros de aluminio (PAC's) como integrantes de una nueva generación de coagulantes alternativos cuyo uso se ha incrementado en las últimas décadas dado su mejor desempeño respecto a los coagulantes convencionales; se especifican los aspectos técnicos y operativos que se deben considerar al momento de implementar un proceso de clarificación de aguas usando un PAC como coagulante. Finalmente, se presentan datos comparativos de condiciones operacionales reales de un proceso de clarificación de aguas, producto de un trabajo previo, donde se reemplazó un coagulante convencional (sulfato de aluminio) por hidroxiclорuro de aluminio, donde se corrobora el mejor desempeño del proceso luego del reemplazo.

PALABRAS CLAVE: Tratamiento de agua, clarificación, coagulante, policloruro de aluminio, hidroxiclорuro de aluminio, desempeño.

ABSTRACT: A study of water clarification process in industrial water treatment system using a polymerized inorganic coagulant (aluminum hydroxychloride) is made in this paper. Initially, the most important conceptual elements of the stages of clarification process (coagulation, flocculation and sedimentation) are established. Then, it identifies the major conventional coagulants used in water treatment and the polyaluminum chlorides (PAC's) are mentioned as part of a new generation of alternative coagulants whose use has increased in recent decades because of their better performance with respect to conventional coagulants; technical and operational aspects to be considered when implementing a water clarification process using a PAC as coagulant are specified. Finally, some comparative data of water clarification process real operating conditions, from a previous work, which replaced a conventional coagulant (aluminum sulfate) by aluminum hydroxychloride are presented and a better performance of the process after the replacement is proved.

KEYWORDS: Water treatment, clarification, coagulant, polyaluminum chloride, aluminum hydroxychloride, performance.

1. INTRODUCCIÓN

El tratamiento del agua es el conjunto de operaciones y procesos que se realizan sobre el agua cruda con el fin de remover o reducir sus contaminantes y lograr que sus características organolépticas, físicas, químicas y

microbiológicas cumplan las especificaciones contenidas en las normas que regulan la materia [1, 2]. El agua debe ser tratada debido a la presencia de impurezas como sólidos suspendidos, materiales colorantes, microorganismos, materia orgánica, gases disueltos, minerales y otros.

Las plantas de tratamiento de aguas, independientemente de su tamaño, nivel de sofisticación tecnológica o la calidad actual del agua tratada, necesitan periódicamente introducir cambios en sus procesos para garantizar mejoras en su funcionamiento y en la calidad del agua tratada para estar a la par de los avances en el ramo y cumplir con legislaciones gubernamentales cada día más exigentes. La utilización de los coagulantes más comunes como, por ejemplo, el sulfato de aluminio, se ha venido cuestionando en los últimos tiempos debido, entre otras causas, a la dificultad técnica para mantener estable el pH óptimo de coagulación durante la operación y su posible relación con la aparición de enfermedades neurodegenerativas [3-5]. Si el pH no está dentro del intervalo adecuado, la clarificación es pobre y puede solubilizarse el aluminio ocasionando problemas de altas variaciones en los valores de turbiedad, pH, alcalinidad, dureza y aluminio residual del agua clarificada. El aluminio en solución ocasiona una reestabilización de las cargas de las partículas en suspensión y experimenta una postfloculación generando problemas en la apariencia del producto terminado, especialmente en aguas envasadas [6].

Una de las opciones consideradas para poder alcanzar altos niveles de calidad del agua tratada y desempeño del proceso es el uso de los coagulantes alternativos que han surgido en las últimas décadas. Éstos, son una nueva generación de coagulantes inorgánicos prepolimerizados incluyendo policloruros de aluminio (PAC's), clorhidrato de aluminio (ACH) y polisulfatos de aluminio (PAS), los cuales han mostrado mejor desempeño que los coagulantes convencionales como el sulfato de aluminio (alumbre) o cloruro férrico y son, hoy día, ampliamente aplicados para tratamiento de aguas municipales y aguas residuales especialmente en Europa y Asia [7, 8].

Si bien estos coagulantes alternativos son usados exitosamente en procesos de clarificación de Aguas debido a su desempeño superior en la remoción de materia orgánica y partículas en

suspensión y su capacidad de garantizar un proceso con mínima variación y menor costo que los coagulantes convencionales [9], sus mecanismos de coagulación no han sido estudiados ampliamente [8] y hay pocas referencias en la literatura sobre resultados comparativos del funcionamiento de procesos donde se haya remplazado el sulfato de aluminio por un PAC [10, 11], aunque existen referencias bibliográficas de experimentos de clarificación de aguas donde se usa un PAC como coagulante [7, 9, 10, 12, 13]. Por ello, en este artículo se hace una revisión de elementos conceptuales de la clarificación como columna vertebral del documento; se mencionan los principales coagulantes utilizados y se hace una comparación del comportamiento en el proceso de clarificación entre los coagulantes convencionales y los PAC's; finalmente, se especifican las principales consideraciones técnicas y operativas en la implementación de procesos de clarificación usando un PAC (hidroxicloruro de aluminio) como coagulante en un sistema de tratamiento de aguas industriales para la elaboración de bebidas, ilustradas con la presentación de los resultados de un experimento comparativo al remplazar un coagulante convencional (sulfato de aluminio) por dicho PAC.

2. CLARIFICACIÓN DEL AGUA

La clarificación del agua tiene por objeto retirar los sólidos suspendidos, sólidos finamente divididos y materiales coloidales, convirtiéndolos en partículas más grandes que se pueden remover con mayor facilidad. Es un proceso utilizado tanto en sistemas de tratamiento de *aguas municipales* con el fin de obtener agua potable para consumo humano, como en sistemas de tratamiento de *aguas industriales* que comprenden el tratamiento individual del agua proveniente de acueductos municipales de acuerdo con su uso final, ya sea agua para elaboración de bebidas o alimentos, generación de vapor o circuitos de refrigeración, lavado de envases, etc.

La clarificación incluye los subprocesos de *coagulación*, *floculación* y *sedimentación*.

- **Coagulación:** es el proceso de formación de pequeñas partículas gelatinosas mediante la adición de un coagulante al agua y la aplicación de energía de mezclado, que desestabiliza las partículas suspendidas por neutralización de las cargas de coloides cargados negativamente [14]. Comienza en el mismo instante en que se agrega el coagulante y dura solo fracciones de segundo [15]. Desde el punto de vista electrostático, el propósito de la coagulación es reducir el potencial zeta por adición de iones específicos e inducir la desestabilización de las partículas para aglomerarlas [14, 15].

La coagulación es el tratamiento más eficaz para la eliminación de impurezas en el agua y también puede representar un gasto elevado cuando no se realiza adecuadamente. La dosis de coagulante condiciona el funcionamiento de las unidades de sedimentación y es imposible realizar una buena clarificación si la cantidad de coagulante no es la adecuada [15, 16].

- **Floculación:** es el proceso mediante el cual se juntan las partículas desestabilizadas o coaguladas para formar un aglomerado más grande llamado *flóculo* y se debe a un mecanismo de formación de puentes químicos o enlaces físicos [15]. Operativamente, la floculación se consigue recurriendo a una mezcla moderada y prolongada que transforma las partículas coaguladas de tamaño submicroscópico en otras suspendidas, discretas y visibles [15-17].

- **Sedimentación:** es la remoción de partículas más pesadas que el agua por acción de la fuerza de gravedad. Mediante este proceso se eliminan materiales en suspensión empleando un tiempo de retención adecuado [6, 11]. Estos sólidos están constituidos generalmente por arenas, limos y coloides agrupados mediante las etapas anteriores de coagulación y floculación.

En las plantas de tratamiento estos tres procesos, descritos anteriormente, tienen lugar en un mismo equipo denominado *clarificador*.

2.1 Agentes coagulantes

Los coagulantes son materiales químicos que se adicionan al agua para lograr la descarga de todas las partículas coloidales dando origen a la formación de medios más grandes (flóculos), que sedimentan más rápidamente [17].

2.1.1 Coagulantes convencionales

Los coagulantes más comunes que se usan en el tratamiento de aguas son compuestos inorgánicos de aluminio o hierro como el sulfato de aluminio, aluminato de sodio, sulfato ferroso, sulfato férrico y cloruro férrico [6]. Cada coagulante tiene un rango específico de pH donde tiene la mínima solubilidad y ocurre la máxima precipitación dependiendo, también, de las características químicas del agua cruda. Con excepción del aluminato de sodio, estos coagulantes son sales ácidas que disminuyen el pH del agua. Por esta razón y dependiendo del agua a tratar, es necesario agregar un álcali como cal, soda ash o soda cáustica.

2.2.2 Coagulantes alternativos (PAC's)

En los últimos 25 años se ha desarrollado una nueva generación de coagulantes inorgánicos prepolimerizados tales como PAC's, los cuales se comportan diferentes a los coagulantes convencionales en el proceso de clarificación debido a sus características de especiación química [18]. Los PAC's tienen diferentes fases sólidas en las reacciones hidrolíticas respecto a los coagulantes convencionales: los flóculos de PAC's tienden a ser grupos de pequeñas esferas y/o estructuras tipo cadena con tamaño menor a 25 mm, mientras que los flóculos de sulfato de aluminio son usualmente estructuras esponjosas y porosas con tamaño de 25 a 100 mm [19]. Esta diferencia estructural hace que los PAC's produzcan una menor turbiedad en suspensión que el sulfato de aluminio [9].

Los PAC's contienen una gama de especies hidrolíticas de Al(III) preformadas de calidad superior y poseen una estructura que es bastante estable ante hidrólisis posteriores, que contribuye a su mayor eficiencia de coagulación [8]; se consideran más eficientes que el sulfato

de aluminio dadas las ventajas de menor producción de lodos y la menor dependencia de la temperatura y el pH [20]. Sin embargo, su eficiencia también se ve afectada por algunos parámetros como la composición del agua cruda y las condiciones de operación específicas.

Como se observa en la Tabla 1, se considera que un PAC es más eficiente que el sulfato de aluminio dada su mayor capacidad de remoción de sólidos suspendidos y, por tanto, requiere menos dosis; dependiendo del tipo de agua, puede sustituir de 1.5 a 2.0 partes de sulfato de aluminio grado *A* y de 3.5 a 3.9 de sulfato de aluminio grado *B* [10-12].

Los PAC's son producidos adicionando una base al cloruro de aluminio hasta lograr la fórmula empírica $Al(OH)_nCl_{3-n}$, donde *n* toma valores que van de 1 a 2.5. Los diferentes PAC's se tipifican por su contenido de aluminio (porcentaje de Al_2O_3), contenido de sulfatos (porcentaje de SO_4) y contenido de hidróxido (porcentaje de basicidad) [21]. La basicidad se refiere al número de iones hidróxido promedio por átomos de aluminio en las moléculas del PAC ($[OH]/[Al]$), y es un índice del grado de polimerización [9].

La reacción de hidrólisis de un PAC se da por etapas. Dependiendo de las condiciones del proceso, se forman los siguientes productos intermedios: dímeros $[Al_2(OH)_2(H_2O)_8]^{+4}$; complejos polihidroxilo $[Al_8(OH)_{20}]$, $[Al_8(OH)_{22}]^{+2}$, $[Al_8(OH)_{24}]$, $[Al_{13}O_4(OH)_{24}(H_2O)_{12}]^{+7}$, $[Al_{14}(OH)_{38}]^{+8}$, $[Al_{30}Cl_9(OH)_{81}(H_2O)_{38}]^{+5}$; compuestos complejos $[Al_8(OH)_{20}(H_2O)_{10}]Cl_4$ y partículas y agregados en la forma original del PAC [22]. La eficiencia de la coagulación está en función de cuál o cuáles de los anteriores productos intermedios de la hidrólisis reaccionan con las impurezas del agua.

Tabla 1. Comparación de características básicas entre sulfato de aluminio y policloruros de aluminio (PAC's). Fuente: Zouboulis *et al*, 2008

Table 1. Comparison of basic characteristics between aluminum sulfate and polyaluminum chloride (PAC's). Source: Zouboulis *et al*, 2008

Criterio	Sulfato de Aluminio	PAC's
<i>Temperatura</i>	La temperatura afecta la hidrólisis y, por ende, la producción de complejos hidróxilos cargados positivamente esenciales para la coagulación.	Menor efecto de la temperatura por la presencia de formas de aluminio prepolimerizadas.
<i>pH</i>	El rango de pH controla cuál especie de hidróxilo de aluminio se produce.	Se espera menor impacto del pH por la presencia de formas de aluminio prepolimerizadas.
<i>Especie de aluminio</i>	La mayoría de especies de aluminio son complejos hidróxilo monoméricos con una carga catiónica de +1 a +3.	Presencia de formas de aluminio monoméricas y poliméricas.
<i>Cinética</i>	Más lenta	Más rápida

3. PROCESO DE CLARIFICACIÓN CON HIDROXICLORURO DE ALUMINIO

En este numeral se abordan los principales aspectos técnicos y operativos que se deben considerar al momento de implementar un proceso de clarificación de aguas usando hidroxiclорuro de aluminio como coagulante, bien sea como un proyecto nuevo o el remplazo de un coagulante convencional que esté en uso.

La implementación de este proceso demanda de una planificación previa. Se requiere un conocimiento a fondo de las características técnicas del producto y su futuro comportamiento para poder predecir el rendimiento en el proceso. Esto se logra realizando múltiples ensayos de *pruebas de jarras* donde se simulan lo más cercano posible a la realidad, en condiciones de laboratorio, los procesos químicos y mecánicos que tienen lugar en el equipo de clarificación.

El hidroxicloriguro de aluminio, $Al_2(OH)_5Cl_2 \cdot 5H_2O$, es una sal inorgánica de aluminio multinuclear (PAC) capaz de formar con mayor rapidez y perfección flóculos con mayor velocidad de sedimentación y poder clarificante logrando remociones más altas de turbiedad respecto a otras sales de aluminio mononuclear como el sulfato de aluminio. El pH óptimo de funcionamiento está entre 5.0 y 9.0 dependiendo del contenido de carbono orgánico disuelto en el agua [11, 12, 21].

El hidroxicloriguro de aluminio se presenta comercialmente como un líquido ligeramente viscoso de color ámbar claro, a veces opalescente y de sabor dulzaino astringente. Tiene la ventaja de su fácil manejo y dosificación sin dejar residuos insolubles indeseados, a diferencia de los coagulantes convencionales granulados que deben disolverse y en muchos casos dejan residuos que dañan los equipos dosificadores [11].

La información mostrada en los siguientes apartados y que sirve para confirmar los referentes teóricos es producto de un experimento que se llevó a cabo en la planta de tratamiento de aguas industriales de una fábrica de bebidas y aguas envasadas, donde se reemplazó un coagulante convencional (sulfato de aluminio tipo B) por hidroxicloriguro de aluminio, en un clarificador con una capacidad de 36 m³. El experimento consistió en un diseño de comparación simple con muestreo completamente al azar, donde se analizaron los dos tratamientos mediante la realización de pruebas de hipótesis e intervalos de confianza para las medias, con el fin de determinar si producían o no resultados equivalentes en las

variables de respuesta, constituidas por las características fisicoquímicas del agua cruda y del agua clarificada (pH, turbiedad, alcalinidad total, dureza total, aluminio residual) y las condiciones de operación del clarificador (velocidad de agitación, lodos espesos, lodos livianos, sólidos disueltos totales); el tiempo de seguimiento fue de 54 días consecutivos, obteniendo un total de 54 muestras en cada tratamiento. Los análisis realizados a las muestras se realizaron siguiendo los procedimientos estandarizados establecidos por la AOAC [11, 23].

3.1 Dosificaciones de coagulante y acondicionador de pH

Dependiendo de las características fisicoquímicas del agua cruda, se requiere la adición o no de un acondicionador de pH, el cual debe seleccionarse atendiendo requerimientos de fácil manejo, solubilidad completa y economía. Las dosificaciones adecuadas de coagulante y acondicionador de pH se determinan mediante la realización de pruebas de jarras, dependiendo, principalmente, de las condiciones de turbiedad del agua cruda (Tabla 2). La dosis óptima se obtiene cuando para cada muestra de agua cruda con un valor de turbiedad determinado se logran los valores más bajos de turbiedad y aluminio residual en el agua tratada.

Tabla 2. Ejemplo de resultados de pruebas de jarras con hidroxicloriguro de aluminio y soda cáustica.

Fuente: Cogollo y Rhenals, 2003

Table 2. Example of jar tests results using aluminum hydroxychloride and caustic soda. Source: Cogollo and Rhenals, 2003

Turbiedad agua cruda (NTU)	Dosis hidroxicloriguro de aluminio (ppm)	Dosis soda cáustica (ppm)
0.87	24	5
1.28	25	5
2.15	26	5
2.87	27	6
4.32	28	6
7.25	29	6

La dosis de coagulante es un parámetro crítico dado que si éste se adiciona por debajo de la cantidad requerida, no se neutralizan totalmente

las cargas de las partículas, la formación de microflóculos es escasa y la turbiedad del agua tratada es elevada; si se adiciona exceso de coagulante, se produce la inversión de las cargas de las partículas y la sucesiva formación de gran cantidad de microflóculos con tamaños muy pequeños y velocidades de sedimentación muy bajas y la turbiedad del agua tratada es, igualmente, elevada [16].

Luego de tener los datos de las dosis seleccionadas, es necesario comprobar el grado de asociación entre las variables *turbiedad del agua cruda* y *dosis de coagulante*, calculando el coeficiente de correlación (R^2) entre las mismas, para determinar qué proporción de la variación total en la turbiedad del agua pueden explicarse con la dosis aplicada de coagulante. Es deseable un valor elevado de R^2 , cercano a 1, para asegurar un ajuste satisfactorio del modelo a los datos experimentales [14].

En el caso de los datos experimentales mostrados en la Tabla 2, el mejor ajuste se logró mediante el modelo logarítmico:

$$\text{Dosis (ppm)} = 2.3959 \times \ln(\text{turbiedad, NTU}) + 24.355 \quad (1)$$

El coeficiente de correlación obtenido fue $R^2 = 0.9953$, lo cual significa que la dosis de coagulante aplicada explica el 99,53% de los cambios experimentados en la turbiedad del agua sometida a tratamiento.

Es necesario resaltar que los resultados de las pruebas de jarras y, por ende, el modelo de ajuste entre dosis de coagulante y turbiedad del agua cruda, sólo son aplicables para el rango de turbiedad del agua cruda objeto de estudio y con características fisicoquímicas similares; en este caso, sólo es aplicable (1) en el rango de turbiedad de 0.87 hasta 7.25 NTU. Esta consideración es razonable ya que la cantidad de coagulante a adicionar en aguas con turbiedad por encima del rango estudiado puede ser menor al predicho por el modelo, debido a que cuando ésta aumenta, la probabilidad de colisión entre las partículas también es muy elevada y la coagulación se realizaría con facilidad usando menor concentración de coagulante. De modo

análogo, cuando la turbiedad es baja, la coagulación se realiza difícilmente y la cantidad de coagulante es igual o mayor que si la turbiedad fuera alta. Por lo anterior, es imprescindible divulgar y especificar al personal encargado de la operación rutinaria estos rangos operativos y establecer las medidas correctivas cuando el agua cruda presente características fuera de los mismos.

3.2 Comportamiento de variables fisicoquímicas

En la Tabla 3 se muestra el comportamiento de las principales variables fisicoquímicas en un equipo de clarificación usando dos tipos diferentes de coagulantes producto del experimento referenciado anteriormente. La variación de las características fisicoquímicas seleccionadas corresponde al porcentaje de cambio experimentado en el valor promedio de cada una de ellas al someterse el agua al proceso de clarificación y cambiar su condición de agua cruda a tratada.

Tabla 3. Comparación de comportamiento de variables fisicoquímicas en un equipo de clarificación con dos tipos de coagulante. Fuente: Cogollo y Rhenals, 2003

Table 3. Comparison of physicochemical variables behavior in clarification set using two coagulants. Source: Cogollo and Rhenals, 2003

Variable	Tipo de proceso	
	Sulfato de aluminio tipo B y cal (45 ppm)	Hidroxiclورو de aluminio y soda cáustica (1%)
Variación pH (%)	2.4	0.6
Remoción Turbiedad (%)	59.5	73.5
Variación Alcalinidad Total (%)	13.7	2.2
Variación Dureza Total (%)	18.8	1.8
Variación Aluminio Residual (%)	8.3	-33.3

Los resultados del estudio mostraron que, en general, el sistema de clarificación usando hidroxiclورو de aluminio como coagulante presenta una menor variabilidad desde el punto de vista de la calidad fisicoquímica del agua tratada con respecto al proceso con sulfato de

aluminio tipo B. En el caso del pH, se nota una variación poco significativa (0.6%), manteniendo esta característica fisicoquímica prácticamente constante a lo largo de todo el proceso (Tabla 3) [11].

El porcentaje de remoción de turbiedad indica la eficiencia del sistema de clarificación y mide la fracción de la turbiedad inicial del agua cruda removida durante el proceso. En la Tabla 3 se observa que al usar hidroxiclورو de aluminio, se obtienen mayores porcentajes de remoción de turbiedad que los logrados con el sulfato de aluminio tipo B, corroborando su característica de mayor poder coagulante, garantizando que, en todo momento, la turbiedad del agua clarificada será menor que la del agua cruda [11].

El comportamiento de las características de alcalinidad total y dureza total es prácticamente invariable a lo largo del proceso de clarificación con PAC's [18, 20]. De hecho, en la Tabla 3 se nota que el grado afectación de la alcalinidad total es 5 veces menor y el de la dureza total 9 veces menor en el proceso con hidroxiclورو de aluminio con respecto al experimentado por estas variables en el proceso de clarificación con sulfato de aluminio tipo B [11].

En varios experimentos de clarificación de aguas usando un PAC como coagulante [7-10, 12] se ha encontrado que el aluminio residual en el agua tratada se reduce con respecto al agua cruda. En el caso de los resultados mostrados en la Tabla 3 se nota que en el proceso de clarificación con hidroxiclورو de aluminio se logra una disminución de la cantidad de aluminio residual presente en el agua cruda; mientras que en el proceso con sulfato de aluminio tipo B se produce un incremento en dicha variable.

El comportamiento anterior puede explicarse por la mayor capacidad de formación de flóculos dada la estructura y naturaleza líquida del hidroxiclورو de aluminio, logrando una reacción más completa. En aguas crudas de baja turbiedad, como en el caso de los datos de la Tabla 2 y Tabla 3, y usando sulfato de aluminio como coagulante, se presenta coagulación por barrido, donde las partículas son atrapadas al producirse una sobresaturación de precipitado de

hidróxido de aluminio; por consiguiente, se necesita aumentar las dosis de sulfato de aluminio para obtener valores de turbiedad aún más bajos, con el riesgo subsecuente del aumento del aluminio residual en el agua clarificada.

3.3 Condiciones de operación

La eficiencia del proceso de clarificación se refleja en las condiciones de operación del equipo de clarificación. En general, las variables indicadoras de las condiciones de operación del equipo tienen un mejor comportamiento en el proceso con hidroxiclورو de aluminio comparado con el que utiliza sulfato de aluminio, en aguas de similares características fisicoquímicas (Tabla 4) [11].

Tabla 4. Ejemplo de condiciones de operación de equipo de clarificación con dos tipos de coagulante.

Fuente: Cogollo y Rhenals, 2003

Table 4. Operations conditions of clarification equipment using two coagulants. Source: Cogollo and Rhenals, 2003

Variable	Tipo de proceso	
	Sulfato de aluminio tipo B y cal (45 ppm)	Hidroxiclورو de aluminio y soda cáustica (1%)
Flujo agua cruda (L/min)	350	350
Flujo coagulante (mL/min)	1081	7.3
Flujo acondicionador de pH (mL/min)	395	105
Velocidad de agitación (RPM)	6	4
Lodos espesos (%)	91.8	92.5
Lodos livianos (%)	15.5	15.5
Sólidos disueltos (%)	77.2	60.7
Costo Global (\$/m ³)	39.3	27.3

3.3.1 Flujos de coagulante y acondicionador de pH

Los flujos de coagulante y acondicionador de pH a suministrar dependen de la concentración óptima determinada en las pruebas de jarras. El hidroxiclورو de aluminio puede adicionarse en forma pura, haciendo uso de una bomba peristáltica de mínimo consumo de energía que

permite el manejo de bajos caudales de alimentación, sin necesidad de hacer disoluciones (como en el caso del sulfato de aluminio tipo B) que puedan afectar su estabilidad y capacidad reactiva. En cuanto al acondicionador de pH, es recomendable, para facilitar su manejo, usar uno de naturaleza líquida como la soda cáustica.

3.3.2 Velocidad de agitación

La velocidad de agitación del equipo de clarificación está relacionada directamente con el número de colisiones entre las partículas suspendidas en el agua. Debido a las características propias del proceso de clarificación con hidroxiclورو de aluminio, donde se forman flóculos de mayor tamaño y con mayor velocidad de sedimentación que los formados con sulfato de aluminio, se requiere operar el equipo de clarificación a una menor velocidad de agitación, que la usada con éste último. Esta velocidad óptima de agitación debe calcularse considerando las particularidades mecánicas y patrones de flujo de cada equipo de clarificación y las características fisicoquímicas del agua a tratar. En la Tabla 4 se muestra que para llevar a cabo el remplazo de sulfato de aluminio tipo B por hidroxiclورو de aluminio y lograr una adecuada clarificación fue necesario reducir la velocidad de agitación del clarificador de 6 a 4 RPM.

3.3.3 Porcentaje de lodos espesos y livianos

El monitoreo del porcentaje de lodos espesos y livianos sirve para evaluar la formación del flóculo y las condiciones del tratamiento. Cada fabricante recomienda un porcentaje óptimo de lodos para las diferentes zonas del clarificador. Las características reactivas del hidroxiclورو de aluminio permiten lograr un porcentaje de lodos espesos igual o superior y un porcentaje de lodos livianos igual o menor que el obtenido con sulfato de aluminio [11, 13].

3.3.4 Sólidos disueltos totales

Otra variable relacionada con la eficiencia de la floculación es el porcentaje de sólidos disueltos totales en la zona de clarificación. El mayor poder coagulante del hidroxiclورو de aluminio

y la baja turbiedad del agua clarificada que logra, hacen que se obtengan menores concentraciones de sólidos disueltos totales con respecto al proceso con sulfato de aluminio (Tabla 4) [11, 13].

3.3.5 Costos del tratamiento

El costo del tratamiento es, generalmente, el factor más importante para la selección de un coagulante y se calcula como el costo de las cantidades de coagulante y acondicionador de pH empleados por volumen (m^3) de agua tratada. El estudio comparativo de costos de tratamientos usando distintos coagulantes debe tomar en consideración el costo global del tratamiento y no solamente el costo unitario de cada reactivo; se deben considerar adicionalmente la dosis de coagulante, el costo del acondicionador de pH, la producción de lodos, costo del agua empleada en retrolavado de filtros y frecuencia de dicha operación y el valor de la mejor calidad del agua. Los datos de la Tabla 4 muestran que a pesar que el hidroxiclورو de aluminio tiene un precio unitario más alto que el alumbre [11], las bajas dosis requeridas tanto de coagulante como de acondicionador de pH, hacen que el costo global del tratamiento disminuya significativamente (30.5%) al remplazar el sulfato de aluminio tipo B por hidroxiclورو de aluminio.

4. CONCLUSIONES

La clarificación es un proceso fundamental en el tratamiento de aguas ya que de su correcto funcionamiento va a depender en gran medida el cumplimiento del objetivo de remover las impurezas presentes en el agua cruda. En el mercado existen muchos tipos de coagulantes convencionales que se han venido utilizando tradicionalmente para la desestabilización de las partículas y que han mostrado ser efectivos en este propósito. Sin embargo, las exigencias crecientes en cuanto a especificaciones de calidad del agua tratada y de optimización técnica y financiera de los procesos de tratamiento de aguas han hecho que se vea cuestionada la eficiencia de dichos coagulantes y se considere su remplazo por una nueva generación de coagulantes alternativos, surgidos en las últimas décadas, como los PAC's, los

cuales han probado tener un desempeño superior a los coagulantes convencionales.

La escogencia del coagulante adecuado se puede considerar como un proceso de toma de decisiones multicriterio fundamental para garantizar unas óptimas condiciones de operación del equipo de clarificación y la mejor calidad del agua tratada al menor costo posible. Asimismo, una vez implementado el proceso de clarificación con el coagulante seleccionado, la variabilidad de las características fisicoquímicas del agua cruda entrante a la planta de tratamiento condiciona que la dosificación de dicho coagulante sea de naturaleza dinámica requiriendo de la realización periódica y permanente de pruebas de jarras para mantener actualizadas las dosis a aplicar con el fin de garantizar un buen desempeño del proceso de clarificación

En sistemas de tratamiento de aguas industriales, el uso de coagulantes polimerizados como el hidroxiclورو de aluminio puede lograr un mejor desempeño del proceso de clarificación tanto desde el punto de vista del mejoramiento de la calidad del agua tratada como del costo del tratamiento, en comparación con los coagulantes convencionales como el sulfato de aluminio. La solubilidad completa y el mayor poder coagulante del hidroxiclورو de aluminio y la acción efectiva de un acondicionador de pH adecuado pueden garantizar una alta remoción de turbiedad y menores niveles de aluminio residual en aguas clarificadas, lo cual es deseable por salud pública, apariencia de producto terminado y mejor operación de las etapas posteriores en las plantas de tratamiento, por ejemplo, una menor saturación del lecho de filtros de arena o purificadores de carbón.

REFERENCIAS

- [1] CARTWRIGHT, P. Tratamiento y reuso del agua en aplicaciones comerciales e industriales. Agua Latinoamérica, 9 (1), 20–24, 2009.
- [2] MINISTERIO DE LA PROTECCIÓN SOCIAL, Decreto 1575 de 2007. Bogotá D.C., 2007.

[3] BECARIA, A., LAHIRI, D., BONDY, S., CHEN, D., HAMADEH, A. *et al.* Aluminum and copper in drinking water enhance inflammatory or oxidative events specifically in the brain. Journal of Neuroimmunology, 176, 16–23, 2006.

[4] FLATEN, T. Aluminium as a risk factor in Alzheimer's disease, with emphasis on drinking water. Brain Research Bulletin, 55 (2), 187–196, 2001.

[5] NORDBERG, G.F. Human health effects of metals in drinking water: relationship to cultural acidification. Environmental Toxicology and Chemistry, 9 (7), 887–894, 1990.

[6] QUINTANA, R. Cómo tratar el agua. Documento técnico. Coca Cola de Colombia, Bogotá D.C., 2000.

[7] TZOUPANOS, N.D., ZOUBOULIS, A.I. AND TSOLERIDIS, C.A. A systematic study for the characterization of a novel coagulant (polyaluminium silicate chloride). Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 342, 30–39, 2009.

[8] PERNITSKY, D.J. AND EDZWALD, J.K. Selection of alum and polyaluminum coagulants: principles and applications. Journal of Water Supply: Research and Technology, 55 (2), 121–141, 2006.

[9] SINHA, S., YOON, Y., AMY, G. AND YOON, J. Determining the effectiveness of conventional and alternative coagulants through effective characterization schemes. Chemosphere, 57, 1115 – 1122, 2004.

[10] ZOUBOULIS, A., TRASKAS, G. AND SAMARAS, P. Comparison of efficiency between poly-aluminum chloride and aluminum sulphate coagulants during full-scale experiments in a drinking water treatment plant. Separation Science and Technology, 43 (6), 1507–1519, 2008.

- [11] COGOLLO, J. AND RHENALS, A. Optimización del proceso de clarificación en la planta de tratamiento de aguas de una embotelladora de bebidas. Montería [Trabajo de Grado Ingeniero de Alimentos]. Montería: Universidad de Córdoba, 2003.
- [12] ROMERO, C., SOLÓRZANO, R., ABREU, O., BRIZUELA, L. AND PÉREZ, Z. Síntesis de un polímero inorgánico de aluminio y su uso para clarificación de agua. *Revista Ingeniería UC*, 14 (3), 16 – 23, 2007.
- [13] MCCURDY, K., CARLSON, K. AND GREGORY, D. Flocc morphology and cyclic shearing recovery: comparison of alum and polyaluminum chloride coagulants. *Water Research*, 38, 486–494, 2004.
- [14] GHAFARI, S., ABDUL, H., HASNAIN, M. AND AKBAR, A. Application of response surface methodology (RSM) to optimize coagulation–flocculation treatment of leachate using poly-aluminum chloride (PAC) and alum. *Journal of Hazardous Materials*, 163, 650 – 656, 2008.
- [15] SUAREZ, J. Coagulación – Flocculación. Memorias Curso de Operadores de Plantas de Potabilización. Cali, Colombia, 136 – 167, Noviembre de 1987.
- [16] ANDÍA, Y. Tratamiento de agua: coagulación y flocculación. Documento técnico. Planta de Tratamiento de Agua Sedapal, Lima, 2000.
- [17] PRADILLA, F. Clarificación de aguas. Documento técnico. Química Nalco de Colombia S.A, Barranquilla, 1994.
- [18] YE, C., WANG, D., SHI, B., YU, J., QU, J. *et al.* Alkalinity effect of coagulation with polyaluminum chlorides: Role of electrostatic patch. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 294, 163-173, 2007.
- [19] VAN BENSCHOTEN, J.E. AND EDZWALD, J.K. Chemical aspects of coagulation using aluminum salts: Hydrolytic reaction of alum and polyaluminum chloride. *Water Research*, 24, 1519–1526, 1990.
- [20] WANG, Y., ZHOU, W-Z., GAO, B-Y., XU, X-M. AND XU, G-Y. The effect of total hardness on the coagulation performance of aluminum salts with different Al species. *Separation and Purification Technology*, 66, 457-462, 2009.
- [21] SHEN, Y-H. AND DEMPSEY, B. Synthesis and speciation of polyaluminum chloride for water treatment. *Environment International*, 24 (8), 899-910, 1998.
- [22] BOCHKAREV, G.R., KURBATOV, P.V. AND KONDRAT'EV, S.A. Intensification of coagulation purification of highly colored waters. *Journal of Mining Science*, 39 (1), 94-101, 2003.
- [23] A.O.A.C. Official Methods of Analysis. Washington D.C: Association of Official Analytical Chemists, 2000.