

FACTIBILIDAD DEL USO DE POLÍMEROS PARA LA CLARIFICACIÓN DEL AGUA POTABLE EN LA CIUDAD DE MÉRIDA

Samanta GIORDANI, Luzmari GONZÁLES, Astrid MORALES

Jessica QUIJANO y Andreína TEJADA.

U. E. Colegio "La Presentación".

Mérida, estado Mérida, 2008.

RESUMEN

El agua es un fluido indispensable para la vida humana y su consumo debe estar dentro de los parámetros de calidad. El crecimiento demográfico de Mérida en los últimos 30 años, ha incrementado la demanda de agua potable y no se han construido nuevas plantas ni ampliado las existentes. El objetivo del presente trabajo fue mejorar el tratamiento químico del agua, utilizando productos de reciente tecnología (polímeros) en el actual proceso de potabilización. La variable dependiente fue el grado de 'turbiedad' del agua potable final, mientras la variable independiente fue la dosis de polímeros coagulantes y floculantes que permiten alcanzar un valor: la turbiedad ideal, inferior a los límites permitidos. Utilizando técnicas de laboratorio denominadas 'pruebas de jarras', se simula y reproducen las condiciones operativas de la planta, comparando la eficiencia de estos productos con el tratamiento actual y se determina su dosis óptima; el valor de pH siempre estuvo ubicado dentro de los límites recomendados por la Organización Mundial de la Salud, entre 6,5 y 8,5. Se aceptó la hipótesis: "El uso de clarificantes de nuevas tecnologías, como el polímero coagulante "PAC" (Policloruro de aluminio) y el polímero floculante 'Poliacrilamida', en sustitución del tratamiento actual, mejorarán los niveles de turbiedad del agua potable producida en la Planta de Tratamiento "Dr Enrique Bourgoin" a niveles inferiores a 5 NTU, recomendados por la Organización Mundial de la Salud y Panamericana de la Salud". Como conclusión: el coagulante P.A.C y el floculante Poliacrilamida, clarifican el agua hasta valores inferiores a los exigidos por las organizaciones reguladoras.

Palabras clave: uso, factibilidad, polímero, agua potable, Mérida.

INTRODUCCIÓN

Se denomina agua potable a la tratada para el consumo humano bajo unos estándares de calidad, determinados por las autoridades locales e internacionales. El suministro de agua potable al consumidor es un problema que ha ocupado al hombre desde la antigüedad. No existe tal cosa como agua pura natural; en la naturaleza, toda agua contiene impurezas.

El agua potable se produce en **plantas de tratamiento** (hidrológicas) especialmente diseñadas para ello. Son grandes obras civiles, donde

el agua cruda que ingresa es transformada en agua potable. Al proceso de conversión de agua común en agua potable según las normas de calidad de la Organización Mundial de la Salud, se le denomina **potabilización**.

El objetivo de toda planta de tratamiento de agua, es el de eliminar la mayor cantidad de impurezas y contaminantes, tanto microbiológicos como sólidos minerales y sales inorgánicas, mediante una serie de equipos y operaciones (proceso físico o mecánico), y el remanente eliminarlo mediante un proceso

químico (coagulación y floculación con productos químicos), para obtener un producto transparente, incoloro, insípido, desinfectado, sin presencia de microorganismos patógenos al hombre, entregando así al usuario un agua potable de calidad, totalmente confiable.

El objetivo general del presente trabajo, está dirigido a mejorar la parte del tratamiento químico del agua para uso potable en la ciudad de Mérida, utilizando productos de reciente tecnología (polímeros) que sustituyan los productos que se utilizan actualmente, ya que las dos últimas décadas, la calidad del agua en nuestra ciudad ha desmejorado notoriamente con el consecuente impacto sanitario sobre la población.

ALCANCE DEL TRABAJO. DETERMINACIÓN DE OBJETIVOS

Concluida la investigación y sus correspondientes fases, como son la revisión bibliográfica, inspección de la planta de tratamiento y comprensión de sus operaciones, determinación y desarrollo del procedimiento experimental, discusión y análisis de los resultados experimentales, se habrá alcanzado el objetivo de “Determinar la factibilidad de la aplicación de estas nuevas tecnologías de polímeros y sus correspondientes dosis para la clarificación del agua en Planta de Tratamiento “Dr. Enrique Bourgoïn” de la ciudad de Mérida”.

Objetivo general

Probar que se puede disminuir notablemente la turbiedad, sedimentos y color del agua potable, mediante el uso de nuevos polímeros como son el polímetro coagulante PAC o policloruro de aluminio y el floculante poliacrilamida.

Objetivo específico

Demostrar que el polímero coagulante policloruro de aluminio y el polímero floculante poliacrilamida, clarifican el agua en

forma más eficiente que los productos que se utilizan actualmente.

HIPÓTESIS PLANTEADA

“El uso de clarificantes productos de nuevas tecnologías, tales como el polímero coagulante PAC ó Policloruro de Aluminio y el polímero floculante Poliacrilamida, en sustitución de los productos actuales, mejorarán notablemente los niveles de turbiedad del agua potable producida en la Planta de Tratamiento “Dr. Enrique Bourgoïn” de la ciudad de Mérida, a pesar de que esta planta opera por encima del 70% de su capacidad. La turbiedad se reducirá a niveles aceptados por la Organización Mundial de la Salud y la Organización Panamericana de la Salud (menor que 5 NTU)”.

DESCRIPCIÓN DE LAS VARIABLES

Todo proyecto científico que pretenda resolver un determinado problema mediante la verificación de una hipótesis, debe necesariamente diferenciar las variables involucradas en el mismo.

La “**variable dependiente**” o la variable estudiada (el efecto), se refiere a la variación del grado “turbiedad” del agua potable que llega como producto final al consumidor.

La “**variable independiente**” se refiere a las dosis de polímeros coagulantes y floculantes que permiten alcanzar un bajo valor de turbiedad (ideal), inferior a los límites permitidos por los entes reguladores (Ministerio del Ambiente, OMS, etc.).

Tipo de investigación

La metodología de investigación se fundamentó en la Investigación científica y empírica, del tipo Experimental de laboratorio, donde se plantea y somete a evaluación la Variable independiente, en este caso los nuevos productos químicos (polímeros) a evaluar, los cuales mejorarán la turbiedad y

calidad del agua potable, es decir, la Variable dependiente. Una vez desarrollado el proceso analítico, se presentan y analizan los resultados obtenidos para emitir las correspondientes recomendaciones.

Población y muestra

Para justificar el presente estudio, se realizaron encuestas para medir el grado de satisfacción o inconformidad de la población merideña con respecto a la calidad de agua potable que recibe de Aguas de Mérida.

El muestreo se realizó en toda la ciudad de Mérida, separando los diversos sectores según la ubicación de las sub-estaciones (tanques dentro de la ciudad) de distribución.

Población: Se encuestaron 100 personas habitantes de las zonas cercanas a las 4 sub estaciones de distribución de agua potable de la Ciudad de Mérida, sin discriminación de edad, sexo, estrato social, religión o profesión.

Muestreo: Se encuestaron 25 personas de cada una de las cuatro sub estaciones (La Carvajal, La Pedregosa, Chamita y La Carabobo)

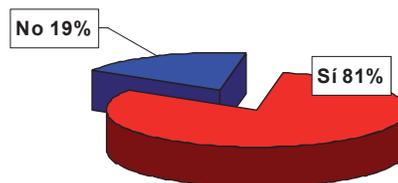
Formato utilizado para las encuestas:

REPUBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA MINISTERIO DEL PODER POPULAR PARA LA EDUCACIÓN U.E. COLEGIO "LA PRESENTACIÓN"		
Anteproyecto: "FACTIBILIDAD DEL USO DE POLÍMEROS PARA LA CLARIFICACIÓN DE AGUA POTABLE EN LA CIUDAD DE MÉRIDA"		
N° Encuesta: Sector u Ubicación:		
Marque con una "X" la opción que corresponda:		
	Sí	No
1 El Agua Potable que llega a su casa, ¿presenta turbiedad?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2 El Agua Potable que llega a su casa, ¿presenta color?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3 El Agua Potable que llega a su casa, ¿tiene sabor?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4 ¿Hierva el Agua Potable que llega a su casa, ó utiliza algún equipo ó sistema para purificarla (ej. pasteurizadores, filtros, equipos de ozono)?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5 El Suministro de agua potable a su vivienda o sector ¿es continuo?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6 ¿Confía en la calidad del Agua Potable que suministra a su familia?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7 Desearía un mejor servicio de agua potable? ¿Estaría de acuerdo en que se mejorara el tratamiento actual?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8 ¿Estaría dispuesto a pagar más por un mejor tratamiento ó servicio?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Integrantes: Giordani T. Samanta / González R. Luzmari / Morales C. Astrid / Quijano S. Jessica / Tejada G. Andreina		
Asesor: Ing. Arnaldo Giordani		

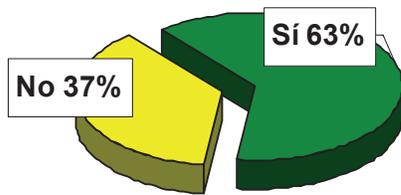
Resultados de las encuestas:

Gráficos

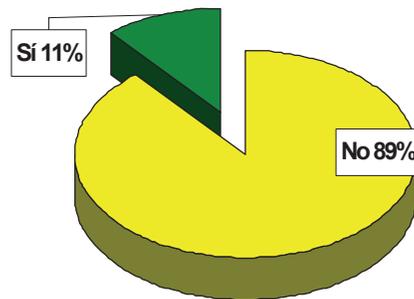
1° El Agua Potable que llega a su casa, ¿presenta Turbiedad?



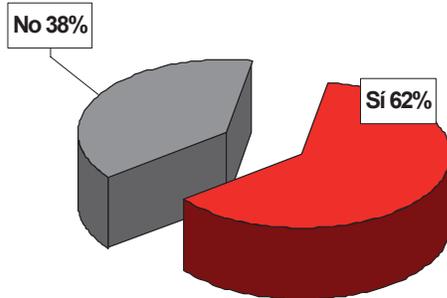
2° El Agua Potable que llega a su casa, ¿presenta Color?



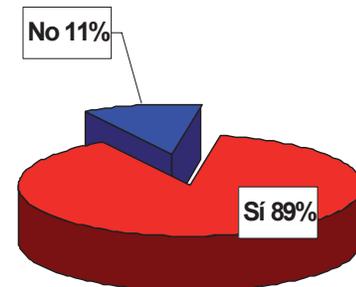
6° Confía en la calidad de Agua Potable que suministra a su familia?



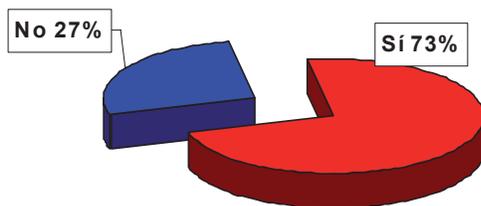
3° El Agua Potable que llega a su casa, ¿presenta Sabor?



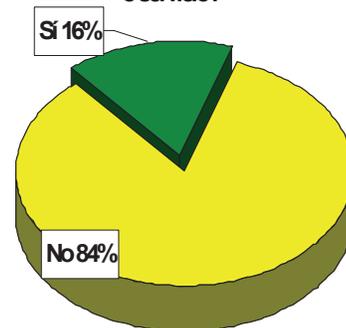
7° ¿Desearía un mejor servicio de Agua Potable? ¿Estaría de acuerdo en mejorar el actual Tratamiento?



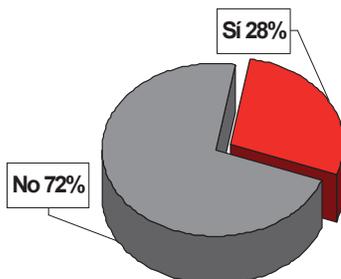
4° Hierve el Agua o utiliza filtros, pasteurizadores o sistemas de ozono



8° Estaría dispuesto a pagar por un mejor tratamiento o servicio?



5° El suministro Agua Potable a su sector ¿es continuo?



ANÁLISIS DE LAS ENCUESTAS. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Definitivamente, la calidad de agua suministrada a la población a través del sistema de plantas de tratamiento y distribución de agua potable a la ciudad de Mérida es deficiente y justificó el presente estudio. Grandes porcentajes de los encuestados, coinciden en que el agua potable recibida, presenta altos niveles de turbiedad y color, así como sabor, hechos sumamente graves para la salud pública, que indican que el sistema de tratamiento ha colapsado por diferentes razones, como el crecimiento demográfico y fallas en el suministro continuo de biocidas (cloro) y coagulantes (sulfato de aluminio) para la reducción de turbiedad, haciéndose insuficiente para satisfacer las necesidades de la población en cuanto a calidad del agua potable. Esto justifica de por sí la implementación de nuevas tecnologías que ayuden a minimizar estos problemas.

Muy pocos confían en la calidad del agua recibida y un gran número de encuestados proceden a hervir el agua o a utilizar equipos de purificación en función de su capacidad adquisitiva. Es de recordar que hervir el agua puede eliminar parte de las bacterias y materia orgánica, pero no reduce los niveles de turbiedad.

Las fallas en el sistema de bombeo, contribuyen a incrementar los niveles de turbiedad y sólidos, ya que las tuberías y tanques se llenan de lodo y productos de corrosión en el fondo, y cuando se reactiva el bombeo se remueven todos los sólidos enturbiando aún más el agua para el consumo.

Resalta el hecho, de que a pesar de que la mayoría de los encuestados no confían en el agua que reciben sus familias y coinciden en que es necesario una notable mejoría en el tratamiento y calidad final del agua potable que se consume en la ciudad, muy pocos están dispuestos a pagar por ello. Esto dificulta

las inversiones en la mejora de las condiciones mecánicas y uso de productos químicos, así como la ampliación de las plantas actuales de tratamiento.

MATERIALES Y EQUIPOS

Para la realización de las experiencias de laboratorio se requiere de los siguientes equipos y materiales:

Tabla No. 2:

Recursos de laboratorio utilizados en las experiencias

EQUIPOS	MATERIALES
Equipo de jarras	Polímero coagulante (policloruro de aluminio PAC)
Turbidímetro	Polímero floculante (poliacrilamida)
Medidor de pH	Sulfato de aluminio, $Al_2(SO_4)_2$
Colorímetro	Cloruro férrico, $FeCl_3$
Vasos precipitado (50 a 500 ml)	Carbonato de calcio, $CaCO_3$
Matraz erlenmeyer (100 y 250 ml)	Sol. patrones de turbiedad (1, 10, 100 NTU)
Jeringas (1, 2, 5, 10 ml)	Soluciones patrones de pH (4 y 7)
Cilindros graduados (10-100 ml)	Agua destilada
Tubos de ensayo	
Rejillas para tubo de ensayo	
Agitadores de vidrio	
Soporte universal	
Pinzas	
Espátula	
Recipientes plásticos de 1 galón	
Pizetas	
Cronómetro	

Procedimiento Experimental

- **Caracterización de la “Muestra patrón”:** se determina la turbiedad, “pH” y color del agua cruda (sin tratar) a la entrada de la planta de tratamiento. Este es nuestro “blanco” o patrón de comparación.
- **Condiciones mecánicas de las pruebas:** a continuación se presenta una tabla con

las velocidades de agitación y tiempos de mezcla utilizados durante las “Pruebas de jarras” realizadas (estas variables son iguales a los valores operacionales empleados en la planta):

Tabla No. 3

Velocidades y tiempos de agitación utilizados en el equipo de jarras

ETAPA DEL PROCESO	Tiempo (minutos)	Velocidad de agitación (r.p.m)
Mezcla rápida (Etapa de Coagulación)	2	100
Mezcla lenta (Etapa de floculación)	10	40
Sedimentación	30	0

- **“Pruebas de jarras” para la selección del mejor coagulante:** para efectos de comparación, se realizan “pruebas de jarras” con las sales inorgánicas coagulantes sulfato de aluminio y cloruro férrico y el polímero “policloruro de aluminio”. Se añaden 8 ppm de cada uno de los tres coagulantes. Como floculante se utiliza el polímero potable, la poliacrilamida (Floctreat-7913) a razón de 3 ppm constante para cada una de las pruebas. Se deja sedimentar o asentar durante un período de 30 minutos. Esta prueba permite determinar el mejor coagulante, que es el que reduce en mayor porcentaje los niveles de turbidez y color del agua cuando es combinado con una dosis constante de floculante. Se reporta turbiedad, “pH”, color e Índice de Willcomb.
- **“Pruebas de jarras” para el ajuste de la dosis del mejor coagulante:** una vez determinado el mejor coagulante, se

realizan una nueva serie de “pruebas de jarras” con ese producto, variando su dosis (entre 1 y 12 ppm) y utilizando nuevamente el floculante cuya dosis una vez más, se mantiene constante (3 ppm). Se miden nuevamente los parámetros de turbiedad, “pH”, color e Índice de Willcomb. La finalidad es determinar la mejor dosis del coagulante seleccionado en la prueba anterior.

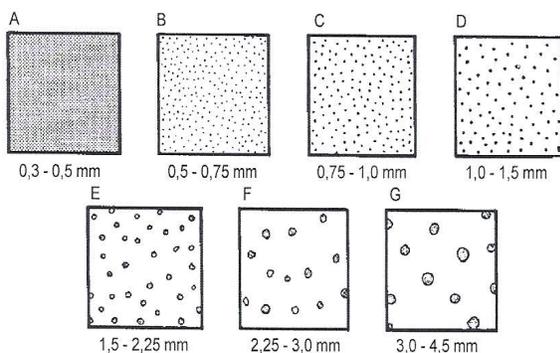
- **“Pruebas de jarras” para la determinación de la mejor dosis de floculante:** una vez determinada la mejor dosis de policloruro de aluminio, se procede a simular la fase de floculación o mezcla lenta y se agrega el polímero floculante, “poliacrilamida”. Se reporta “pH”, color, turbiedad e Índice de Willcomb. El proceso se repite para diferentes dosis de floculante (entre 0,5 y 4 ppm), hasta obtener los “flóculos” más grandes, consistentes y de mayor velocidad de asentamiento o precipitación. Al finalizar esta prueba se pueden cuantificar los polímeros coagulantes y floculante ideales para la clarificación del agua.
- **Evaluación de la calidad de los “flocs” y de su velocidad de sedimentación:** a continuación se presenta una tabla con el denominado **“Índice de Willcomb”**, el cual permite asignar un valor cualitativo para poder calificar la formación más consistente y rápida de sedimentar, de los “flocs”. Para efectos de referencia y comparación, también se presenta un diagrama con las dimensiones y dispersiones típicas de los “flocs” formados.

Tabla No. 4
Índice de Willcomb

Número del índice	Descripción
0	Flóculo coloidal.
2	Visible. Flóculo muy pequeño, casi imperceptible para un observador no entrenado.
4	Disperso. Flóculo bien formado pero uniformemente distribuido (Sedimenta muy lentamente o no sedimenta).
6	Claro. Flóculo de tamaño relativamente grande pero que precipita con lentitud.
8	Bueno. Flóculo que se deposita fácil pero no completamente.
10	Excelente. Flóculo que se deposita completamente dejando el agua cristalina.

Figura No. 2

Diámetros típicos de referencia para la evaluación de "flocs".



- **Cantidad de productos a ser dosificados a cada jarra con las jeringas:** es necesario convertir la unidad de concentración "partes por millón" (ppm) en mililitros, para poder agregar con las jeringas la cantidad exacta de polímero para las pruebas. La fórmula utilizada es:

$$\text{Dosis en la jeringa (ml)} = \frac{\text{ppm deseado} \times \text{Volumen del Beaker}}{\text{Concentración de la solución} \times 10^6}$$

En donde:

$$\ddot{u} \text{ ppm} = \text{gr} / \text{cm}^3$$

$$\ddot{u} \text{ Volumen del Beaker o Jarra} = 500 \text{ ml}$$

$$\ddot{u} \text{ Concentración de la solución} = 1 / 100 = 0,01\% \text{ (se diluye 1 ml de producto en 99 ml de agua destilada).}$$

Se diluye con la finalidad de abrir las cadenas de polímeros y así poder atrapar más "flocs".

$$\ddot{u} 10^6 = \text{Factor de conversión}$$

- **Evaluación del color:** para determinar este parámetro en las muestras analizadas se utilizó un colorímetro digital (Standard Methods No. 2120-B). La puntuación asignada a cada lectura se presenta en la siguiente tabla:

Tabla No. 5

Escala de las unidades de color

UNIDADES DE COLOR (lectura)	ESCALA PUNTUACIÓN ó
1 a 50	1
51 a 100	5
101 a 200	10
201 a 300	25
301 a 400	35
401 a 500	50

Tabla No. 6
Selección del coagulante

No. de JARRA	ETAPA	MUESTRA	DOSS (ppm)	r.p.m.	Tiempo (min)	FLOCLANTE	DOSS (ppm)	r.p.m.	Tiempo (min)	Tiempo de Sediment.	Turbiedad (NTU)	%Remoción de Turbiedad	pH	Indice de Willcomb	Color (UC)	%Remoción de Color
1	Selección del mejor Coagulante	Agua Cruda (sin Coagulante ni Floculante)	N/A								113	0	7,89	N/A	50	0
2		Agregando Sulfato de Aluminio, $Al_2(SO_4)_3$	8	100	2	Poliacrilamida (Floctreat-7913)	3	40	10	30	26	76,99	7,63	6	15	70
3		Agregando Cloruro Férrico, $FeCl_3$									31	72,57	7,64	4	25	50
4		Agregando Polidloruro de Aluminio (PAC)									17	84,96	7,40	8	10	80

Resultados de las “pruebas de jarras” para la selección de la mejor dosis del coagulante:

Tabla No. 7.
Selección de la mejor dosis de coagulante

No. de JARRA	ETAPA	MUESTRA	DOSS (ppm)	r.p.m.	Tiempo (min)	FLOCLANTE	DOSS (ppm)	r.p.m.	Tiempo (min)	Tiempo de Sediment.	Turbiedad (NTU)	%Remoción de Turbiedad	pH	Indice de Willcomb	Color (UC)	%Remoción de Color
1	Ajuste de la Dosis del Coagulante seleccionado (Polidloruro de Aluminio P.A.C)	Agua Cruda (sin Coagulante ni Floculante)	0								113	0	7,89	N/A	50	0
5		Muestras de Agua variando las dosis del Coagulante. Seleccionado (P.A.C. y agregando 3 ppm fijos de Floculant (Poliacrilamida, Floctreat/7913)	1	100	2	Poliacrilamida (Floctreat-7913)	3	40	10	30	74	34,51	7,83	2	50	0,00
6			2								71	37,17	7,83	2	35	30,00
7			3								63	44,25	7,81	2	35	30,00
8			4								55	51,33	7,77	4	35	30,00
9			5								49	56,64	7,72	4	25	50,00
10			6								38	66,37	7,70	4	25	50,00
11			7								26	76,99	7,69	6	10	80,00
12			8								17	84,96	7,40	8	10	80,00
13			9								14	87,61	7,13	8	10	80,00
14			10								11	90,27	7,01	8	5	90,00
15			11								18	84,07	6,58	6	10	80,00
16			12								19	83,19	6,43	4	10	80,00

Resultados de las “pruebas de jarras” para la selección de la dosis óptima de polímero floculante:

Tabla No. 8
Selección de la dosis ideal de floculante poliactrilamida (Floctreat-7913)

No. de JARRA	ETAPA	MUESTRA	DOSS (ppm)	r.p.m.	Tiempo (min)	FLOCLANTE	DOSS (ppm)	r.p.m.	Tiempo (min)	Tiempo de Sediment.	Turbiedad (NTU)	%Remoción de Turbiedad	pH	Indice de Willcomb	Color (UC)	%Remoción de Color
1	Ajuste de la Dosis del Floculante (Poliactrilamida, Floctreat-7913)	Agua Cruda (sin Coagulante ni Floculante)	NA								113	0	7,89	N/A	50	0
5		Muestras de Agua con 10 ppm fijos del Coagulante (PAC) y variando el Floculante (Poliactrilamida, FI-7913)	0,5	100	2	Poliactrilamida (Floctreat-7913)	40	10	30	16	85,84	7,18	4	10	80,00	
6			1,0							11	90,27	7,15	6	10	80,00	
7			1,5							9	92,04	7,11	8	5	90,00	
8			2,0							3	97,35	7,08	10	1	98,00	
9			2,5							7	93,81	7,06	8	5	90,00	
10			3,0							11	90,27	7,01	8	5	90,00	
11			3,5							13	88,50	6,94	6	10	80,00	
12			4,0							18	84,07	6,87	4	10	80,00	

Análisis y discusión de resultados

Serie de pruebas No. 1, Tabla No. 6, Gráficos No. 9, 10, 11 y 12.

Selección del Mejor Coagulante:

- En la primera serie de pruebas de jarras, que sirvieron para seleccionar el coagulante manteniendo una dosis de 3 ppm de floculante invariable, se pudo observar claramente como el policloro de aluminio (PAC), es mucho más eficiente como coagulante que las sales inorgánicas como el sulfato de aluminio ($Al_2(SO_4)_3$) y el cloruro férrico ($FeCl_3$). En el gráfico N° 9 se aprecia que con el PAC los niveles de turbiedad (17 NTU) disminuyen en aproximadamente 35% con respecto al sulfato de aluminio (26 NTU) y en 45% referido al cloruro férrico (NTU). El gráfico No. 10 muestra como el % de remoción de turbiedad del PAC (80%) fue mejor que el del $Al_2(SO_4)_3$ (70%) y muy superior al del $FeCl_3$ (50%).

- El mejor tamaño y consistencia de los “flóculos”, así como la mayor velocidad de sedimentación, representados por el “Índice de Willcomb”, se obtuvieron con el coagulante policloruro de aluminio, superior al sulfato de aluminio y al cloruro férrico en la “escala de evaluación del color, $8 > 6 > 4$ respectivamente (Gráfico No. 11).

- La eficiencia de estos productos se repite en la evaluación del color, en el siguiente orden: PAC con 80% de remoción $> Al_2(SO_4)_3$ con 70% $> FeCl_3$ con 50% (Gráfico No. 12).

Serie de pruebas No. 2, Tabla No. 7, Gráficos No. 13 y 14.

Ajuste de la mejor dosis del coagulante seleccionado:

- El gráfico No. 14, referente a la evaluación del tamaño, consistencia y velocidad de sedimentación de los “flóculos”, representado por el Índice de Willcomb, indica que para esta

serie de pruebas, los mejores resultados se obtienen con dosis de coagulante PAC, desde 8 hasta 10 ppm. Esto significa que la prueba no es determinante ya que tenemos tres valores óptimos para la dosis.

- Para definir la dosis, se puede entonces analizar el Gráfico No. 13, donde se puede observar que los mejores resultados tanto en remoción de turbiedad como de color, se obtienen para una dosis de de 10 ppm de PAC. Para esta concentración de PAC (10 ppm) se obtuvo una remoción de turbiedad del 90,3 %, combinada con una remoción de color del 90%. También se puede observar que si agregamos cantidades de coagulante superiores a 10 ppm, ocurre un efecto de reversión, desmejorando los resultados.

Serie de pruebas No. 3, Tabla No. 8, Gráficos No. 15, 16 y 17.

Ajuste de la mejor dosis del floculante:

- Definido el mejor coagulante (PAC) y su dosis (10 ppm), la siguiente serie de pruebas para definir la mejor dosis de floculante indica mediante los Gráficos No 15 y 16 que la mayor remoción de turbiedad (97,4%) y de color (98%) se obtienen con una dosis de 2 ppm del floculante, la poliacrilamida Floctreat-7913.

- El Índice de Willcomb (gráfico No. 17), confirma los resultados anteriores, y es que para 10 ppm de coagulante PAC, y 2 ppm del floculante poliacrilamida. Las velocidades de sedimentación más rápidas, tamaño, consistencia y dispersión de los flóculos, obtienen las mejores puntuaciones para esta dosis de floculante.

- En ninguna de las series de pruebas realizadas, el valor del “pH” presentó mayores variaciones del valor obtenido para el agua “cruda” (sin tratar). El valor del “pH” siempre estuvo ubicado dentro de los límites de control recomendado por la Organización Mundial de la Salud, esto es, entre 6,5 y 8,5.

CONCLUSIONES

- Quedó demostrada la hipótesis referente a la factibilidad de reducir los valores de turbiedad, color, sólidos y coloides al utilizar nuevas tecnologías de polímeros en proceso de tratamiento del agua potable en la ciudad de Mérida al minimizar la turbiedad hasta valores de 3 NTU, inferiores a los 5 NTU recomendados por la Organización Mundial de la Salud (O.M.S.) y por debajo de valores entre 60 y 80 NTU con que tiene que operar la planta en períodos de lluvia.
- El PAC, es un coagulante mucho más eficiente que el sulfato de aluminio, el $Al_2(SO_4)_3$ y el cloruro férrico, el $FeCl_3$ en la reducción de los niveles de turbiedad y color
- La dosis óptima de coagulante PAC, resultó ser de 10 ppm. Dosificaciones inferiores o superiores, producen un efecto de reversión sobre la turbiedad y color
- La combinación de coagulantes (PAC) y floculantes (poliacrilamida), de concentraciones de 10 y 2 ppm respectivamente, permite “clarificar” el agua de la planta “Dr. Enrique Burgoin”, en un período mucho más rápido que utilizando el $Al_2(SO_4)_3$ o el $FeCl_3$, y por lo tanto ayuda a compensar la deficiencia en la capacidad operativa de la planta.

RECOMENDACIONES

- Implementar el uso de coagulantes (PAC) y floculantes (poliacrilamida), en concentraciones de 10 y 2 ppm respectivamente
- Realizar una “Prueba piloto”, o prueba en planta, en el sistema real y con condiciones reales de operación de la planta, con la finalidad de obtener resultados aún más exactos para ajustar

más las dosis y reducir los costos de tratamiento. La duración ideal de la prueba sería de 6 horas. La dificultad sería obtener los fondos ya que para ese lapso se requerirían de 240 kg de coagulante y 48 kg de floculante con un costo total de 3.302 Bs.F

- El costo actual del servicio de agua potable es de aprox. 0,45 Bs.F/m³. Implementar el tratamiento con estos polímeros implica un incremento de aprox. un 23% sobre este costo, esto es, 0,55 Bs.F/m³, y las encuestas realizadas indican que más del 84% de los encuestados no está dispuesto a pagar más por una mejora del servicio. El usuario requiere ser educado mediante una campaña de información para que comprenda que la salud está por arriba de los intereses económicos.

BIBLIOGRAFÍA

- Baker Performance Chemicals. (1997). *Manual de polímeros*. 2ª Edición. New York, NY: Editorial McGraw-Hill. pp. 43-131.
- Gaspart, Joaquín. (1999). *Fundamentos para los procesos de potabilización*, Tomos I y II. Barcelona: Rezza Editores, S.A. pp. 14-72.
- Gulf Coast Chemical. (1988). *Tratamiento de agua potable*. New York. pp. 66-113.
- Instituto Nacional de Obras Sanitarias, I.N.O.S. (1988). *Manual de tratamiento de agua*. Caracas. pp. 45-77.
- Lewis, Bernard T. (1991). *Tratamiento de agua potable. Manual de operaciones y mantenimiento*. 2ª Edición. New York, NY: Editorial McGraw-Hill. pp. 10-117.
- Lenntech, Arthur. (2005). *Agua residual y purificación del agua*. Holanda: Holding B.V. Rotterdamseweg 402 M 2629 HH Delft. pp. 67-84.
- Lipesa. (2004). *Química del agua*. Caracas: Editorial CoBo. pp. 14-67.

Nalco Chemical Company. (1988). *Manual de tratamiento de agua*". 5ª Edición. New York, NY: Editorial McGraw-Hill. pp. 34-146.

Norris, Shreve. (1998). *Procesos químicos industriales*. 2ª Edición. New York, NY: Editorial McGraw-Hill. pp. 21-63.

Química Nalco de Colombia, S.A. (1994). *Principios de clarificación de agua*. Bogotá. pp. 1-87.

Van Olphen, Ken. (1963). *Introducción a la química de los coloides*". Segunda Edición. New York: Interscience Publishers. pp. 131-146.