

**EVALUACIÓN DEL PROCESO DE COAGULACIÓN EN LA PLANTA DE
TRATAMIENTO BOSCONIA, UTILIZANDO COAGULANTES INORGÁNICOS Y
POLIMEROS ORGÁNICOS**

JAIME ALFONSO MORENO CAPACHO

CARLOS ALBERTO DELGADO AGUILAR

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA
BUCARAMANGA**

2009

**EVALUACIÓN DEL PROCESO DE COAGULACIÓN EN LA PLANTA DE
TRATAMIENTO BOSCONIA, UTILIZANDO COAGULANTES INORGÁNICOS Y
POLIMEROS ORGÁNICOS**

AUTORES:

JAIME ALFONSO MORENO CAPACHO

CARLOS ALBERTO DELGADO AGUILAR

**Trabajo de grado para optar por el
título de Ingeniero Químico**

DIRECTOR DEL PROYECTO DE GRADO:

MARIANNY Y. COMBARIZA M.

Química, Ph. D.

CO-DIRECTOR DEL PROYECTO DE GRADO:

JOHN JAIRO BARRENECHE MARTINEZ

Químico

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA
BUCARAMANGA**

2009

DEDICATORIA

A DIOS EL PADRE QUIEN ME HA DADO SU INCONDICIONAL AMOR Y
LA MARAVILLOSA VIDA QUE TENGO.

A MI SEÑOR JESUCRISTO POR REGALARME LA SALVACION CON SU
SACRIFICIO SANTO Y POR SER MI PERPETUO ABOGADO DELANTE DE
DIOS.

A EL ESPIRITU SANTO POR ESTAR SIEMPRE A MI LADO
ACOMPAÑANDOME Y DANDOME PODER Y FUERZAS PARA SEGUIR
SOÑANDO.

A MIS PADRES LAS PERSONAS QUE MAS AMO EN ESTA VIDA, POR SU
ENTREGA TOTAL PARA MI FORMACION Y BIENESTAR.

A MI HERMANITA POR ESTAR SIEMPRE A MI LADO
APOYANDOME EN TODO.

A MI SOBRINITA POR ROBARME CADA DIA UN MOTON DE SONRISAS.

A LINAJE REAL POR BRINDARME SU INCONDICIONAL COMPAÑIA.

A TODOS MIS AMIGOS POR ESTAR SIEMPRE QUE LOS NECESITO.

Carlos Alberto Delgado Aguilar.

DEDICATORIA

A DIOS QUE DÍA A DÍA ME DIO LA OPORTUNIDAD DE REALIZAR ESTA META, PORQUE TU PADRE CON TU INMENSO AMOR Y MISERICORDIA FUISTE MI GUÍA Y APOYO EN CADA MOMENTO Y SOBRE TODO TE AGRADEZCO POR PERMITIRME COMPARTIR ESTE PASO CON TODA MI FAMILIA Y LAS PERSONAS QUE LLEVO EN MI CORAZÓN.

A MIS PADRES JAIME Y YOLANDA LAS PERSONAS MÁS ENTREGADAS E INCONDICIONALES CON MIGO, POR TODA SU FORMACIÓN Y APOYO A LO LARGO DE MI VIDA. EN ESPECIAL POR ESE INMENSO AMOR Y EJEMPLO QUE SIEMPRE HE RECIBIDO DE USTEDES

A MI HERMANO POR ESTAR SIEMPRE A MI LADO.

A MI HERMANITA NIKOLL, POR DESPERTAR EN MÍ LOS MÁS BELLOS SENTIMIENTOS Y SER MI MAYOR FUENTE DE ALEGRÍA.

A MIS AMIGOS POR TODO EL APOYO Y TIEMPO COMPARTIDO, POR SUS ENSEÑANZAS Y TODAS LAS EXPERIENCIAS COMPARTIDAS Y SU CONFIANZA EN MÍ.

Jaime Alfonso Moreno Capacho.

AGRADECIMIENTOS

A LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, MI ALMA MATER

A LA ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA POR DARNOS LA MEJOR
FORMACION PROFESIONAL

A EL ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA POR
BRINDARNOS LA OPORTUNIDAD DE REALIZAR
NUESTRO PROYECTO DE GRADO

A LA DOCTORA MARIANNY YAJAIRA COMBARIZA
POR SU DEDICACION Y TIEMPO

A EL JEFE DE LA PLANTA BOSCONIA JHON JAIRO BARRENECHE
MARTINEZ POR SU TIEMPO, APOYO Y ENSEÑANZAS

A TODO EL PERSONAL DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO BOSCONIA
POR TODA SU COLABORACION Y APOYO

Carlos Alberto Delgado Aguilar.

Jaime Alfonso Moreno Capacho.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
1. CONCEPTOS TEÓRICOS	2
1.1 Operaciones y procesos unitarios para la potabilización del agua.....	2
1.2 Coagulación.....	2
1.2.1 Factores que influyen en la coagulación.....	3
1.2.2 Química de coagulación con sales de aluminio.....	3
1.2.3 Reacciones con la alcalinidad.....	3
1.3 Floculación.....	4
1.3.1 Factores que influyen en la floculación.....	4
1.4 Sedimentación.....	5
1.5 Simulación de los procesos de coagulación, floculación y sedimentación.....	5
1.5.1 Prueba de jarras.....	5
2. DESARROLLO EXPERIMENTAL	6
2.1 Entrenamiento en técnicas de Análisis y Ensayos de Jarras.....	7
2.2 Recolección de Muestras de agua.....	7
2.3 Evaluación de coagulantes Inorgánicos y Orgánicos.....	7
2.3.1 Determinación de la dosis optima.....	9
2.4 Evaluación de Ayudantes de Coagulación.....	10
2.4.1 Determinación de la dosis optima de Sulfato de Aluminio.....	10
2.4.2 Determinación de la relación coagulante / Ayudante de Coagulación.....	10
2.4.3 Determinación de la Capacidad de Reemplazo.....	11
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS	12
3.1 Comportamientos de los Coagulantes Inorgánicos.....	12
3.1.1 Análisis de los Comportamientos.....	17
3.2 Resultados de los Coagulantes Orgánicos.....	18
3.3 Ayudantes de Coagulación.....	22

3.3.1 Resultados de ensayos de Jarras con Sulfato de aluminio liquido tipo B y Rapised B.....	22
3.3.2 Resultados de ensayos de Jarras con Sulfato de aluminio liquido tipo B y Rapised ACB 75-9.....	23
4. CONCLUSIONES.....	24
5. RECOMENDACIONES.....	26
6. BIBLIOGRAFÍA.....	27
7. ANEXOS.....	29

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Proceso de potabilización del agua.....	2
Figura 2. Diagrama de Bloques de la metodología desarrollada.....	6
Figura 3. Montaje de Equipo de Jarras.....	8
Figura 4. Ensayo de Jarras para una turbiedad de 20 NTU.....	12
Figura 5 . Ensayo de Jarras para una turbiedad de 24 NTU.....	13
Figura 6. Ensayo de Jarras para una turbiedad de 30 NTU.....	13
Figura 7. Ensayo de Jarras para una turbiedad de 77 NTU.....	13
Figura 8. Ensayo de Jarras para una turbiedad de 85 NTU.....	14
Figura 9 Ensayo de Jarras para una turbiedad de 90 NTU.....	14
Figura 10. Ensayo de Jarras para una turbiedad de 270 NTU.....	14
Figura 11. Ensayo de Jarras para una turbiedad de 460 NTU.....	15
Figura 12. Ensayo de Jarras para una turbiedad de 590 NTU.....	15
Figura 13. Ensayo de Jarras para una turbiedad de 1050 NTU.....	15
Figura 14. Ensayo de Jarras para una turbiedad de 1600 NTU.....	16
Figura 15. Ensayo de Jarras para una turbiedad de 2190 NTU.....	16
Figura 16. Comportamiento de costos coagulantes Inorganicos.....	16
Figura 17 Dosis Optima (Turb= 25.6 NTU).....	18
Figura 18. pH Optimo (Turb= 25.6 NTU).....	18
Figura 19. Dosis Optima (Turb= 30 NTU).....	19
Figura 20. pH Optimo (Turb= 30 NTU).....	19
Figura 21. Dosis Optima (Turb= 37 NTU).....	19
Figura 22. pH Optimo (Turb= 37 NTU).....	19
Figura 23. Dosis Optima (Turb= 46.4 NTU).....	19
Figura 24. pH Optimo (Turb= 46.4 NTU).....	19
Figura 25. Dosis Optima (Turb= 63.8 NTU).....	20
Figura 26. pH Optimo (Turb= 63.8 NTU).....	20
Figura 27. Dosis Optima (Turb= 105 NTU).....	20
Figura 28. pH Optimo (Turb= 105 NTU).....	20
Figura 29. Dosis Optima (Turb= 620 NTU).....	20

Figura 30. pH Optimo (Turb= 620 NTU).....	20
Figura 31. Comportamiento de costos de los polímeros Coagulantes.....	21
Figura 32. Conductímetro WTW 315 i.....	29
Figura 31. Turbidímetro HACH 2100 N.....	30
Figura 32. PHmetro Mettler Toledo.....	31
Figura 33. Espectrofotómetro HACH DR- 2000/DR-2400/ DR-2800.....	32
Figura 34. Titulador electrométrico Metrohm.....	33

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Porcentajes de relación de Sulfato de Aluminio / ayudante de Coagulación.....	11
Tabla 2. Capacidades de Reemplazo.....	12
Tabla 3. Resultados Rapised B.....	22
Tabla 4. Resultados Rapised ACB -75 -9.....	23
Tabla 5. Características Físicas.....	44
Tabla 6. Características químicas que tienen reconocido efecto adverso en la salud humana.....	45
Tabla 7. Parámetros internos para el agua cruda.....	46
Tabla 8. Parámetros internos para el agua tratada.....	46

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. MÉTODOS ANALÍTICOS.....	29
Anexo B. MARCO CONCEPTUAL.....	37
Anexo C. MARCO LEGAL.....	41
Anexo D. MARCO NORMATIVO ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA.....	47

RESUMEN

Título: EVALUACIÓN DEL PROCESO DE COAGULACIÓN EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO BOSCONIA, UTILIZANDO COAGULANTES INORGÁNICOS Y POLÍMEROS ORGÁNICOS *

Autores: DELGADO AGUILAR, Carlos Alberto.
MORENO CAPACHO, Jaime Alfonso. **

Palabras clave: Coagulación, Turbiedad, coagulantes, dosis óptima, capacidad de reemplazo.

El proceso de coagulación consiste en cambiar la carga superficial de las partículas para que se puedan adherir entre sí y formar partículas mayores que se asienten por gravedad, este proceso es realizado por sustancias químicas denominadas coagulantes y ayudantes de coagulación que tienen la particularidad de dejar residuos de aluminio y monómero que son tóxicos para la salud humana. Por esta razón se evaluaron diferentes alternativas en el proceso de coagulación en la planta de tratamiento Bosconia operada por el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga que permitieran mejorar la calidad del agua y disminuir los costos de dosificación, a través de pruebas de jarras para doce muestras de agua del río surata en los rangos de turbiedad [0 NTU, 30 NTU], [31 NTU, 100 NTU], [101 NTU, 1000 NTU] y [> 1000 NTU].

Se evaluaron trece coagulantes inorgánicos y cuatro ayudantes de coagulación de las empresas Productos Químicos Panamericanos, Sulfoquímica y Puriclor, con los cuales se realizaron estudios de dosis óptima, mejor relación sulfato de aluminio/ ayudante de coagulación y capacidad de reemplazo. Estableciendo como mejor alternativa de coagulante el Hidroxicloruro de aluminio y mejor alternativa de ayudante de coagulación el Rapised ACB 75-9 para el proceso de potabilización del agua en la planta de tratamiento Bosconia.

* Trabajo de investigación realizado en el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga. E.S.P

** Facultad de Ingenierías fisicoquímicas; Escuela de Ingeniería Química, Director: Ph. D Marianny Y. Combariza M.

ABSTRACT

Title: EVALUATION OF COAGULATION PROCESS IN THE TREATMENT PLANT LOCATED IN BOSCONIA, USING INORGANIC COAGULANTS AND ORGANICS POLYMERS *

Authors: DELGADO AGUILAR, Carlos Alberto.
MORENO CAPACHO, Jaime Alfonso. **

Keywords: coagulation, turbidity, coagulants, optimal dose, replacement capacity.

The coagulation process consists in changing the particles' surface charge that can adhere to each other and form larger particles that settle by gravity; this process is done by chemicals called coagulants and coagulation helpers that have the particularity of leaving monomer and aluminum residues that are toxic to human health. For this reason different alternatives were evaluated in the process of coagulation in the treatment plant located in Bosconia operated by the 'Acueducto metropolitano de Bucaramanga' that would improve water quality and lower the cost of dosing through jar tests for twelve samples taken from river surata in the ranges of turbidity [0 NTU, 30 NTU], [31 NTU, 100 NTU], [101 NTU, 1000 NTU] and [> 1000 NTU].

Thirteen inorganic coagulants and four coagulation helpers of the companies: '**Productos Químicos Panamericanos S.A.**' and 'Sulfoquímica y Puriclor' were evaluated, with which were conducted studies on optimal dose, best aluminum sulfate / coagulation helper ratio and replacement capacity, with which was established the aluminum hydroxide as the best coagulant alternative and Rapised ACB 75-9 as the best alternative for the coagulation helper for the water treatment process at the treatment plant at Bosconia.

* Research Project, Acueducto Metropolitano de Bucaramanga. E.S:P

** Chemical Engineering Department; Advisor: Ph. D Marianny Y. Combariza M.

INTRODUCCION

Uno de los más grandes desafíos que enfrenta la humanidad es el abastecimiento de agua con propiedades fisicoquímicas y microbiológicas adecuadas para el consumo. En el proceso de potabilización se emplean sustancias químicas como coagulantes y ayudantes de coagulación, que dejan residuos tóxicos en el agua potencialmente perjudiciales para la salud del consumidor. Por esta razón la optimización del proceso de potabilización en los acueductos es muy importante.

Desde hace 25 años se conoce la toxicidad del aluminio sobre el sistema nervioso de las ratas. Tras las primeras evidencias en animales de experimentación una serie de estudios han señalado alguna correlación entre el aluminio y el mal de Alzheimer, sin que exista un consenso claro en la comunidad científica. Es por eso que Organizaciones Internacionales como la Organización Mundial de la Salud (OMS) y el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS) que se dedican a velar por el bienestar de la salud, señalan que el sulfato de aluminio, coagulante actualmente utilizado de manera generalizada puede causar afecciones en la salud y sugieren limitar su uso.

Este trabajo tuvo como objetivo evaluar alternativas en el proceso de coagulación, en la planta de tratamiento “ Bosconia ” operada por el acueducto metropolitano de Bucaramanga S.A E.S.P, que incluyen: minimización en el uso de productos químicos, optimización de las etapas de coagulación, floculación, sedimentación y filtración en el proceso de clarificación; mejoramiento de la calidad del agua tratada en términos de turbiedad, color, pH y aluminio residual; y disminución en los costos del proceso de dosificación.

1. CONCEPTOS TEORICOS

1.1 Operaciones y procesos unitarios para la potabilización del agua. El agua cruda es sometida a operaciones físico-químicas, para obtener agua apta para consumo humano, es decir, que cumpla con las normas de calidad del decreto 1575 de 2007 ^[1] y la resolución 2115 ^[2]. Para realizar el proceso de Potabilización de este preciado liquido, se llevan a cabo las siguientes etapas (figura 1).

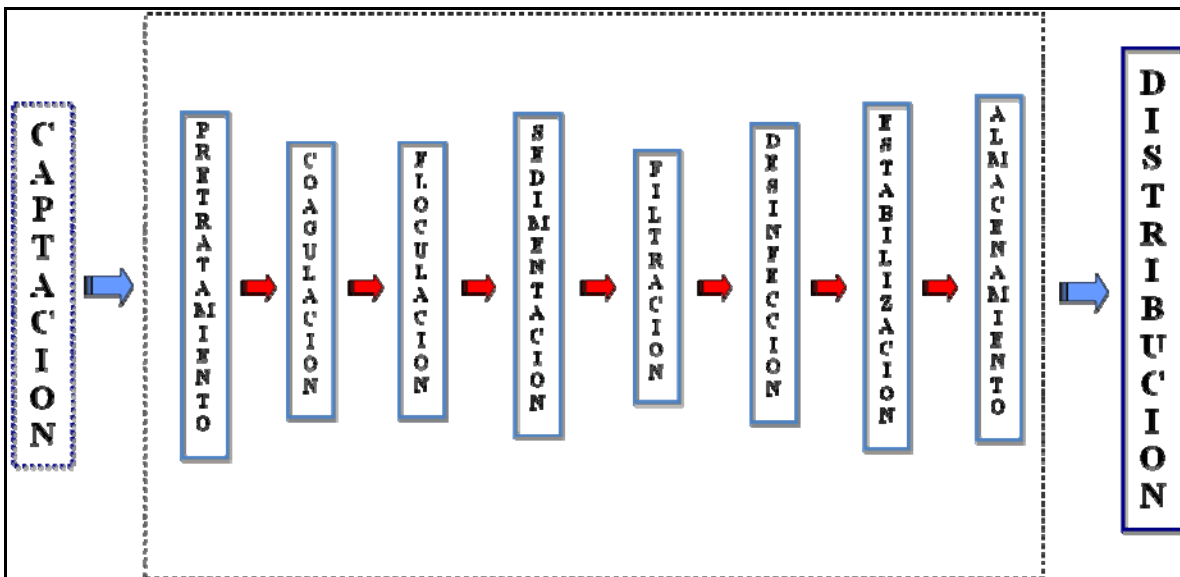


Figura 1. Proceso de potabilización del agua ^[3].

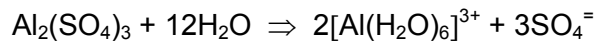
Las operaciones que comprenden las etapas de captación hasta el pretratamiento, son de tipo físico y se realizan fuera de la planta. Las fases siguientes son ejecutadas dentro de la planta de tratamiento. ^[4]

1.2 Coagulación. Es un proceso de desestabilización química de las partículas coloidales, inducido cuando se neutralizan las fuerzas que las mantienen separadas (Repulsión Coulombica), por medio de la adición de coagulantes químicos y la aplicación de energía de mezclado.

Aunque la coagulación es el tratamiento más eficaz para la remoción de contaminantes particulados, es también el más costoso dentro del proceso de Potabilización especialmente si no está optimizado. Un proceso de coagulación mal realizado causa degradación rápida de la calidad del agua y aumenta gastos de operación. Por lo tanto se considera que la dosis del coagulante condiciona el funcionamiento de las unidades de sedimentación y que es imposible de realizar una clarificación, si la cantidad de coagulante está mal ajustada ^[5,6].

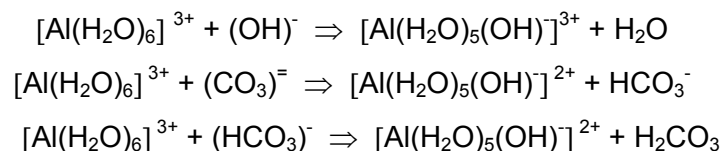
1.2.1 Factores que influyen en la coagulación. Tipo del coagulante, la cantidad de coagulante, cantidad y características de turbiedad y color, características químicas del agua, concentración del ion hidrogeno del agua, tiempo de mezcla rápida, grado de turbulencia y presencia de nucleoides ^[4].

1.2.2 Química de coagulación con sales de aluminio. El sulfato de aluminio $[\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}]$, es un polvo de color marfil, comúnmente hidratado, que con el tiempo de almacenaje suele convertirse en terrones relativamente duros. Cuando está en solución se encuentra hidrolizado de la siguiente forma:

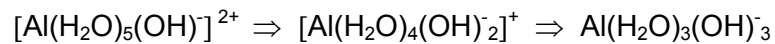


Los iones de aluminio hidratado $[\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6]^{3+}$, actúan como un ácido y reaccionan con las bases disueltas (OH^- , $\text{CO}_3^{=}$ y HCO_3^-), y con las moléculas del agua. Como los iones OH^- , $\text{CO}_3^{=}$ y HCO_3^- son más reactivos que el agua, el $[\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6]^{3+}$ siempre reacciona con ellos. De lo anterior se deduce que en el proceso de coagulación hay un consumo de álcalis y un descenso en el pH del agua ^[4,7].

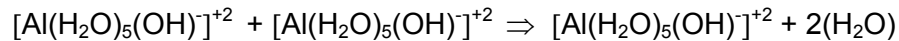
1.2.3 Reacciones con la alcalinidad. La alcalinidad es representada por los iones OH^- , $\text{CO}_3^{=}$ y HCO_3^- , las reacciones con estos iones se describen a continuación:



El $[\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_5(\text{OH})]^{2+}$ es un compuesto inestable y transitorio que se hidroliza rápidamente, reemplazando un H_2O por un OH^- así:



Otra reacción se presenta entre las especies que contienen un solo ion aluminio, que se polimeriza reaccionando entre sí:



Esta reacción de polimerización continua con el tiempo, formando compuestos tales como $\text{Al}_4(\text{OH})_{15}^{3-}$, $\text{Al}_8(\text{OH})_{20}^{4+}$, y finalmente, $\text{Al}(\text{OH})_3(\text{H}_2\text{O})_3$ ó $[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$ según el pH^[4,9]. Tanto los iones de aluminio hidratados como los compuestos poliméricos se solubilizan rápidamente por las partículas del agua, produciendo su desestabilización. ^[4,10].

1.3 Floculación. La floculación es el proceso que sigue a la coagulación y consiste en agitar la masa coagulada para permitir el crecimiento y aglomeración de los flóculos recién formados; una vez estos aumentan de tamaño se sedimentan con facilidad.

En algunas ocasiones sucede que los flóculos formados por aglomeración de varios coloides no son lo suficientemente fuertes y compactos como para sedimentarse con rapidez. En estos casos es necesario emplear un floculante que forme una “una red” entre los aglomerados. Este proceso se favorece con un mezclado lento; un mezclado demasiado rápido desestabiliza los aglomerados e impide su re-formación. La floculación puede ser mejorada por la adición de un reactivo de floculación o ayudante de floculación ^[11].

1.3.1 Factores que influyen en la floculación. Gradiente de velocidad, tiempo de floculación, tipo de coagulante usado, tipo de floc producido, adición o no de ayudante de floculación ^[4].

1.4 Sedimentación. Se entiende por sedimentación la remoción por efecto gravitacional de las partículas en suspensión presentes en el agua. Estas partículas deberán tener un peso específico mayor que el fluido. La remoción de partículas en suspensión en el agua puede conseguirse por sedimentación o filtración. De allí que ambos procesos se consideren como complementarios.

La sedimentación remueve las partículas más densas, mientras que la filtración remueve aquellas partículas que tienen una densidad muy cercana a la del agua o que han sido resuspendidas y, por lo tanto, no pudieron ser removidas en el proceso anterior.

La sedimentación es, en esencia, un fenómeno netamente físico y constituye uno de los procesos utilizados en el tratamiento del agua para conseguir su clarificación. Está relacionada exclusivamente con las propiedades de caída de las partículas en el agua. Cuando se produce sedimentación de una suspensión de partículas, el resultado final será siempre un fluido clarificado y una suspensión más concentrada. A menudo se utilizan para designar la sedimentación los términos de clarificación y espesamiento. Se habla de clarificación cuando hay un especial interés en el fluido clarificado, y de espesamiento cuando el interés está puesto en la suspensión concentrada ^[12]. Las partículas en suspensión sedimentan en diferente forma, dependiendo de las características de las partículas, así como de su concentración. Es así que podemos referirnos a la sedimentación de partículas discretas, sedimentación de partículas floculantes y sedimentación de partículas por caída libre e interferida ^[12].

1.5 Simulación de los procesos de coagulación, floculación y sedimentación.

1.5.1 Prueba de jarras. Es un método de simulación de los procesos de coagulación, floculación y sedimentación, realizado a escala de laboratorio. Mediante estas pruebas, es posible optimizar todas las etapas del proceso de Potabilización para luego escalarlas a nivel de planta. La prueba de Jarras permite

ajustar el pH, hacer variaciones en las dosis de las diferentes sustancias químicas que se añaden a las muestras, alternar velocidades de mezclado y recrear a pequeña escala lo que se podría ver en una planta piloto ó acueducto.

2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

A continuación se presenta el diagrama de bloques de los procesos realizados en la planta de tratamiento Bosconia para la optimización del proceso de coagulación y floculación en muestras de agua con diferentes niveles de turbiedad*.

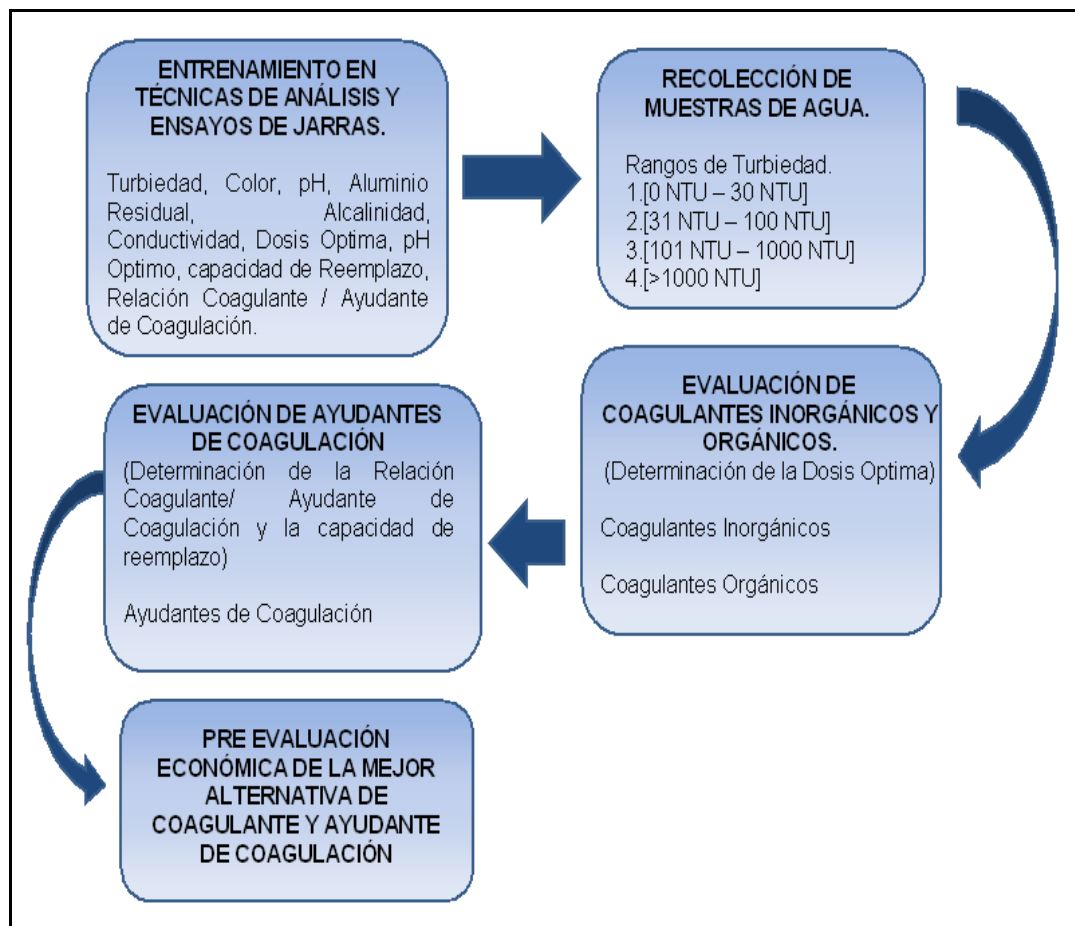


Figura 2. Diagrama de Bloques de la metodología desarrollada.

* La turbiedad se expresa en NTU (*Nephelometric Turbidity Units*, Unidades nefelométricas de turbidez).

2.1 Entrenamiento en técnicas de Análisis y Ensayos de Jarras. Inicialmente se efectuó un entrenamiento, por parte de los operadores de la planta de tratamiento Bosconia, por un periodo de un mes en las técnicas y equipos empleados en el laboratorio para los análisis que se realizan rutinariamente. Diariamente se realizaron pruebas de jarras y se determinaron propiedades como turbiedad, pH, alcalinidad, color aparente, color verdadero, conductividad y aluminio residual siguiendo los procedimientos descritos en la sección de anexos.

2.2 Recolección de Muestras de agua. Las muestras de agua empleadas en la evaluación de los diferentes coagulantes y ayudantes de coagulación fueron recolectadas del río Surata que pasa por la Planta de Tratamiento Bosconia. Se recolectaron 12 muestras de agua cruda en los siguientes rangos de turbiedad:

- 3 Muestras de agua entre [0 NTU – 30 NTU].
- 3 Muestras de agua entre [31 NTU – 100 NTU].
- 3 Muestras de agua entre [101 NTU – 1000 NTU].
- 3 Muestras de agua entre [>1000 NTU].

2.3 Evaluación de coagulantes Inorgánicos y Orgánicos. El objetivo de este ensayo fue la comparación del comportamiento de diferentes alternativas de coagulantes Inorgánicos y Orgánicos a través de la determinación de la dosis que produce la más rápida desestabilización de las partículas coloidales en la planta y hace que se forme un floc pesado y compacto que quede fácilmente retenido en los sedimentadores y no se rompa al pasar por el filtro.

Los coagulantes inorgánicos que se utilizaron para realizar las comparaciones fueron: Sulfato de Aluminio Líquido tipo A (SALTA) y tipo B (SALTB), Sulfato de Aluminio Sólido tipo A (SASTA) y tipo B (SASTB), PAC Férrico (PAC F), PAC (PAC), Pac 01 Sólido (PAC 01 S), Pac 03 Sólido (PAC 03 S), Pac 01 líquido (PAC 01 I), Pac 02 Líquido (PAC 02 I), PAC 15 (PAC 15), Hidroxicloruro de Aluminio

(HCLA) y Policloruro de Aluminio (PCLA) suministrados por Productos Químicos Panamericanos(PQP), Sulfoquímica y Puricloriclor.

Los coagulantes orgánicos que se utilizaron para realizar las comparaciones fueron: Ultrafloc 110 (UF 110), Ultrafloc 210 (UF 210).

Para este análisis se necesito el aparato de Pruebas de Jarras; que consta básicamente de un agitador múltiple de velocidad variable que puede crear turbulencia simultáneamente en seis (6) vasos de precipitado (figura 3). Utilizando este equipo, se reprodujeron las condiciones en las que se realizan los procesos de coagulación, floculación y la sedimentación en la planta de tratamiento Bosconia las cuales son:

TMR (Tiempo de mezcla rápida) = 35 seg. VMR (Velocidad de mezcla rápida) = 100 rpm.

TML (Tiempo de mezcla lenta) = 35 min. VML (Velocidad de mezcla lenta) = 31 rpm.

Ts (Tiempo de Sedimentación) = 50 min.



Figura 3. Montaje de Equipo de Jarras

2.3.1 Determinación de la dosis óptima de coagulante.

1. Se determinó la turbiedad, el color aparente, el color verdadero, la conductividad, el pH y la alcalinidad del agua cruda.
2. Se llenaron las jarras cuadradas de 2 litros con la muestra de agua cruda y se colocaron en la superficie del equipo para pruebas de jarras debajo de los agitadores, que a su vez fueron introducidos en las jarras.
3. Se adicionaron cantidades progresivas de sulfato de aluminio de concentración 1% p/v (1ml de sulfato de aluminio equivale a 5 ppm en la jarra con muestra) al agua cruda mediante jeringas hipodérmicas (tratando de que la solución de Sulfato de Aluminio penetrara profundamente para que la dispersión fuese más rápida), y simultáneamente se hizo girar las paletas del aparato a 100 rpm durante un minuto.

Nota: Los volúmenes adicionados en cada jarra son valores estimados (con base en los datos históricos de la planta de tratamiento Bosconia).

4. Transcurrido el tiempo de mezcla rápida fijado, se disminuyó la velocidad de rotación de las paletas del equipo para pruebas de jarras a 40 rpm, y se dejó flocular el agua durante 15 minutos.
5. Cumplido este tiempo se suspendió la agitación, se extrajeron las paletas y se dejó sedimentar el agua durante 15 minutos.
6. Luego se tomaron muestras de 100 ml, purgando las mangueras de las jarras previamente, es decir, dejando pasar un volumen no mayor a 5 ml. antes de tomar la muestra a la cual se le iban a practicar los análisis correspondientes.
7. Una vez tomada las muestras se les determinaron la turbiedad residual, el pH, el color aparente, el color verdadero y el aluminio residual (ver anexo A)
8. Por último se procedió a graficar la turbiedad residual en (NTU) versus cantidad de sulfato de aluminio administrado en (ppm)^[12].

2.4 Evaluación de Ayudantes de Coagulación.

Este ensayo se realizó con el fin de poder comparar la eficiencia en la remoción de turbiedad y el color de diferentes ayudantes de coagulación evaluándolos a través de pruebas de jarras donde se determinaron parámetros como: Dosis óptima, Relación coagulante / ayudante de Coagulación y Capacidad de reemplazo. Los ayudantes de coagulación que se emplearon fueron: Rapised B y Rapised ACB 75-9 suministrados por Productos Químicos Panamericano (PQP).

2.4.1 Determinación de la dosis óptima de Sulfato de Aluminio. Se procedió como se indicó anteriormente en el numeral 2.3.1

2.4.2 Determinación de la relación coagulante / Ayudante de Coagulación.**

1. Después de conocer la dosis óptima de sulfato de aluminio, se procedió como en el paso 2 de numeral 2.3.1
2. El sulfato de aluminio de concentración 1% p/v se adicionó al agua cruda y simultáneamente se hizo girar las paletas del aparato a 100 rpm; diez segundos más tarde se adicionó el ayudante de coagulación de concentración 0.1 % p/v, de acuerdo con las proporciones indicadas en la tabla 1. El tiempo de mezcla rápida (100 rpm) fue de un minuto.
3. Se realizaron nuevamente los pasos 4, 5, 6, 7 y 8 del numeral 2.3.1. A continuación se determinó el mejor porcentaje de relación, con base en las mediciones realizadas a las muestras de agua sedimentada, como la jarra que ofrece las mejores condiciones para el tratamiento.

** En la anterior prueba se consideró que una parte por millón (1 ppm) del ayudante de coagulación es equivalente a 10 ppm de sulfato de aluminio. Así por ejemplo si la dosis óptima para una muestra del río con una turbiedad determinada es de 100 ppm, para una relación 90/10 de coagulante / ayudante de coagulación para esa misma muestra, se tendría que adicionar primero 90 ppm de coagulante y a los 10 segundos se tendría que adicionar 10 ppm de polímero, sin embargo de acuerdo a la consideración que se está haciendo en realidad se aplica es 1 ppm de polímero (que reemplaza 10 ppm de coagulante)

N° de jarra	Porcentajes de Sulfato de Aluminio y Ayudante de coagulación aplicados a la dosis óptima escogida.	
	Sulfato de Aluminio (%)	Ayudante de Coagulación (%)
1	60	40
2	70	30
3	80	20
4	90	10
5	95	5
6	100	0

Tabla 1. Porcentajes de relación de Sulfato de Aluminio / ayudante de Coagulación

2.4.3 Determinación de la Capacidad de Reemplazo*.**

- 1 Conocida la dosis óptima de sulfato de aluminio y el porcentaje de relación se llenaron las jarras cuadradas de 2 litros con la muestra de agua cruda y se depositaron en la superficie del equipo para pruebas de jarras debajo de los agitadores, que a su vez se introdujeron en ellas.
2. Se colocaron las cantidades de ayudantes de coagulación al 0.1% y de sulfato de aluminio al 2 ó 1% en vasos de precipitado de 25 ml. Utilizando 6 vasos para las muestra de coagulantes y cinco vasos para las muestra de polímero.
3. El sulfato de aluminio de concentración 1% p/v se adiciono al agua cruda y simultáneamente se hizo girar las paletas del aparato a 100 rpm; diez segundos más tarde se adiciono el ayudante de coagulación de concentración 0.1 % p/v, de acuerdo con las proporciones indicadas en la tabla 2. El tiempo de mezcla rápida (100 rpm) fue de un minuto.
- 4 Se realizaron los pasos 4, 5, 6, 7 y 8 del numeral 2.3.1. A continuación se determino la capacidad de remplazo, con base en la mediciones realizadas a las muestras de agua sedimentada, como la jarra que ofrece las mejores condicione para el tratamiento.

N° de jarras.	Capacidad de reemplazo.	
	Ayudante de coagulación (ppm)	Sulfato de aluminio (ppm)
1	-	Dosis óptima
2	$(Y*10)/8$	X
3	$(Y*10)/10$	X
4	$(Y*10)/12$	X
5	$(Y*10)/15$	X
6	$(Y*10)/20$	X

Tabla 2. Capacidades de Reemplazo

X= Cantidad de Sulfato de Aluminio en la relación coagulante/ayudante de coagulación escogida.

Y= Cantidad de Ayudante de Coagulación en la relación coagulante/ayudante de coagulación escogida.

3. RESULTADOS Y ANALISIS

3.1.1 Comportamientos de los Coagulantes Inorgánicos

1. Turbiedades entre [0-30 NTU]

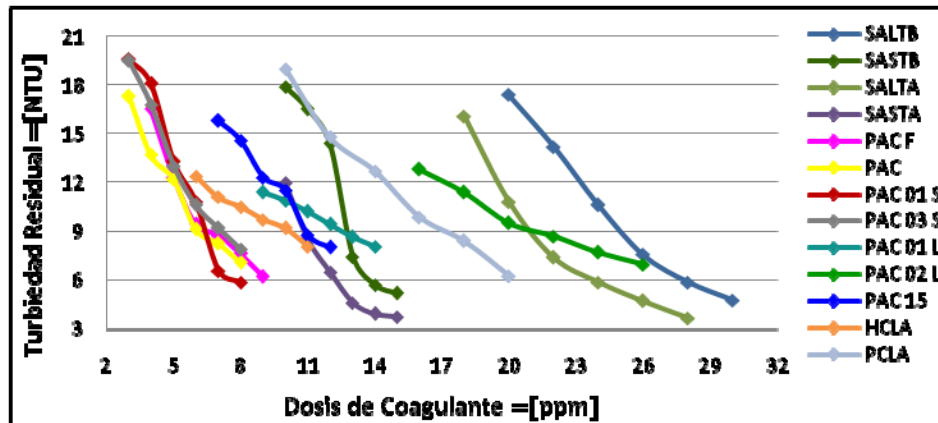


Figura 4. Ensayo de Jarras para una turbiedad de 20 NTU.

*** Vale la pena aclarar que en la tabla 2 se multiplica por 10 la dosis de ayudante de coagulación debido a que en un principio se hizo la consideración que el polímero reemplazaba 10 partes por millón. De igual forma el número que se encuentra dividiendo en la tabla 2, indica la capacidad de reemplazo del ayudante de coagulación. Siguiendo con el ejemplo anterior para la relación 90/10, la jarra número 2 (donde la capacidad de reemplazo es de 8 ppm) tendrá 90 ppm de coagulante y 1,25 ppm de polímero.

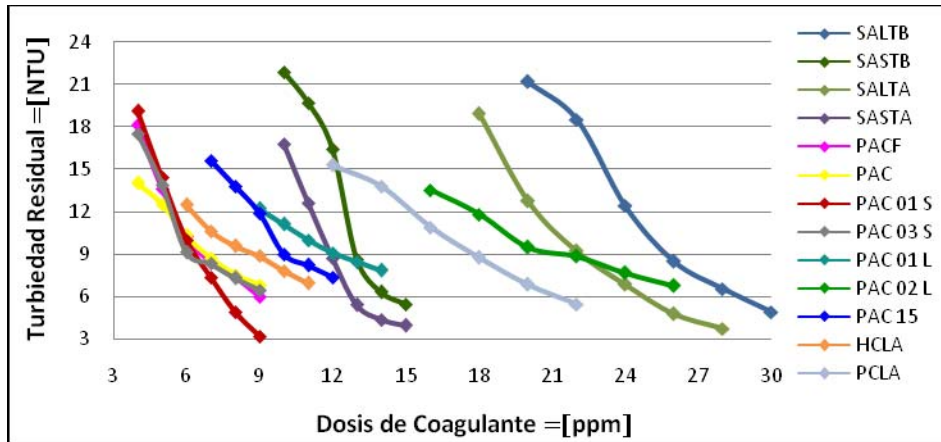


Figura 5 . Ensayo de Jarras para una turbiedad de 24 NTU.

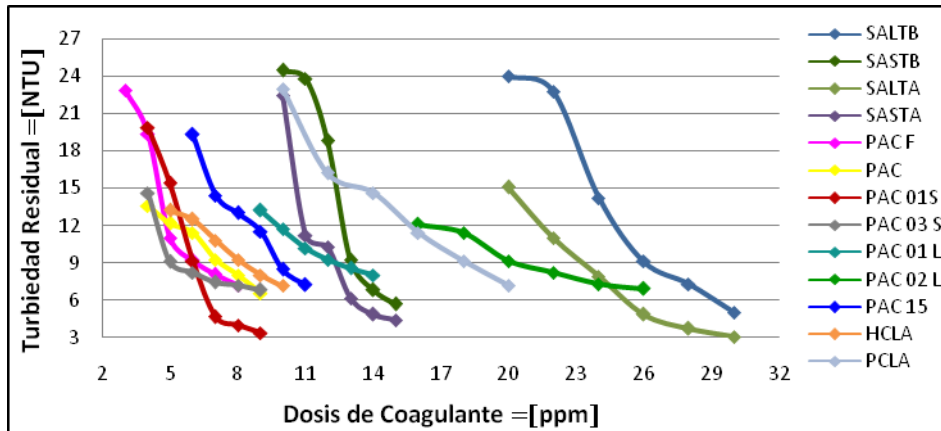


Figura 6. Ensayo de Jarras para una turbiedad de 30 NTU.

2. Turbiedades entre [31-100 NTU]

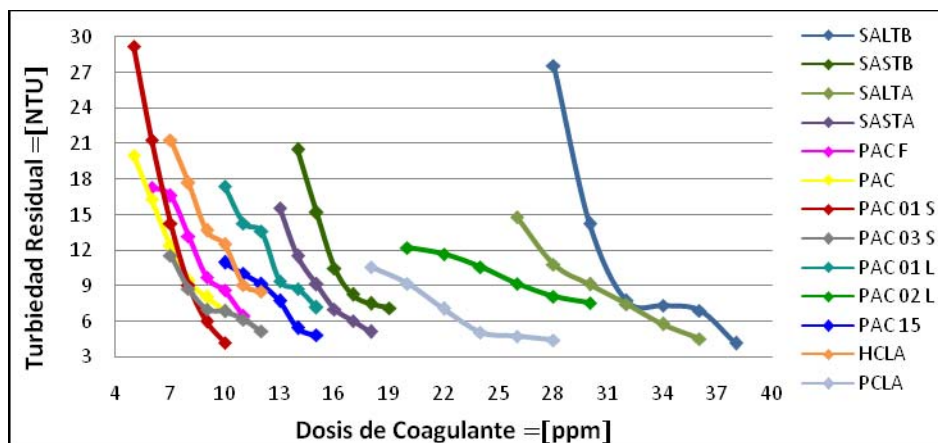


Figura 7. Ensayo de Jarras para una turbiedad de 77 NTU.

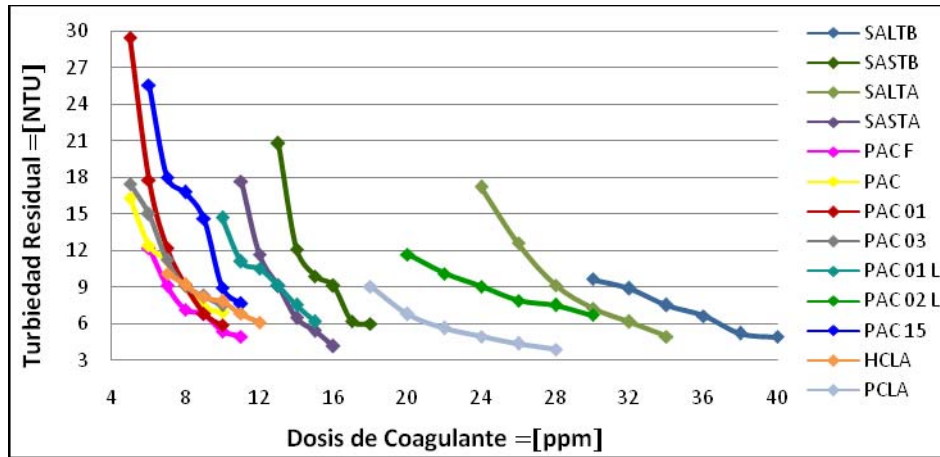


Figura 8. Ensayo de Jarras para una turbiedad de 85 NTU.

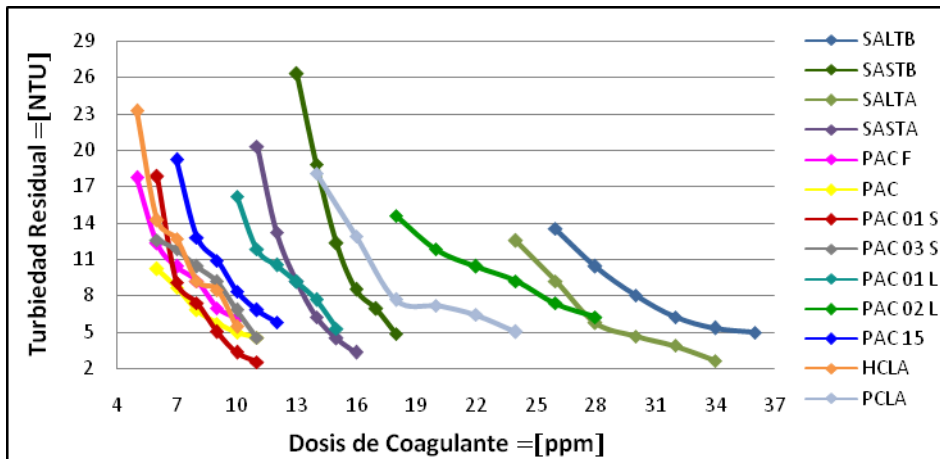


Figura 9. Ensayo de Jarras para una turbiedad de 90 NTU.

3. Turbiedades entre [101-1000 NTU]

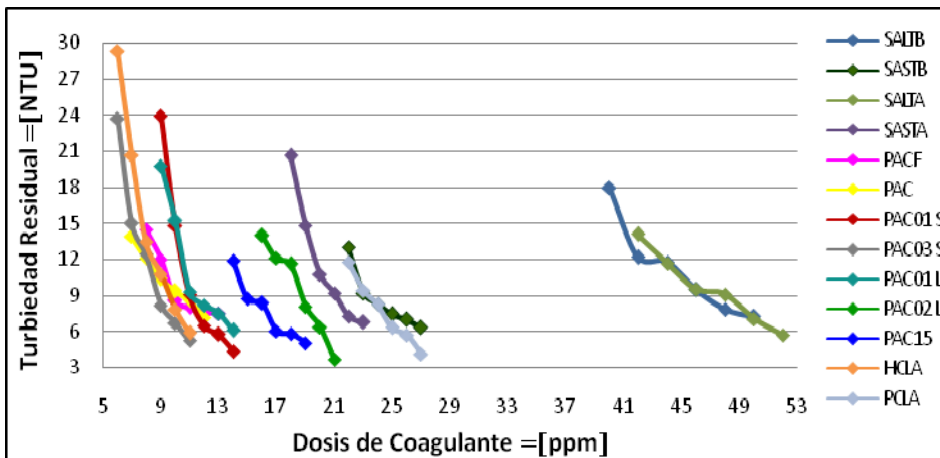


Figura 10. Ensayo de Jarras para una turbiedad de 270 NTU.

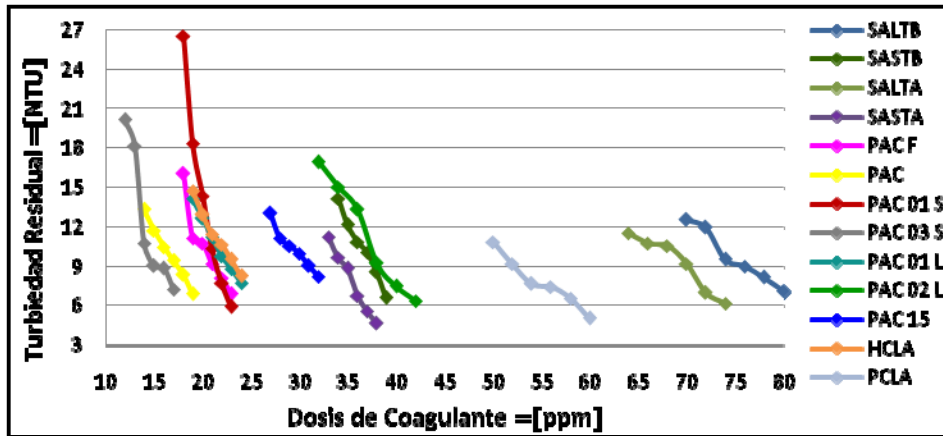


Figura 11. Ensayo de Jarras para una turbiedad de 460 NTU.

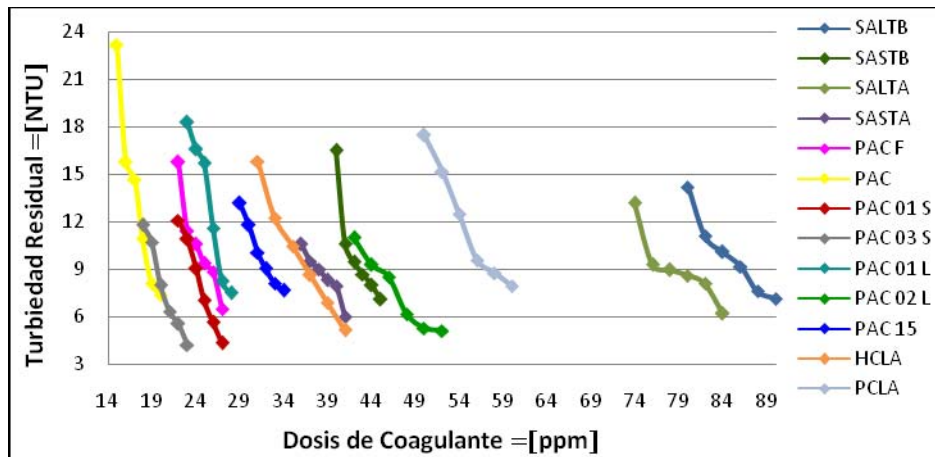


Figura 12. Ensayo de Jarras para una turbiedad de 590 NTU.

4. Turbiedades > 1000 NTU

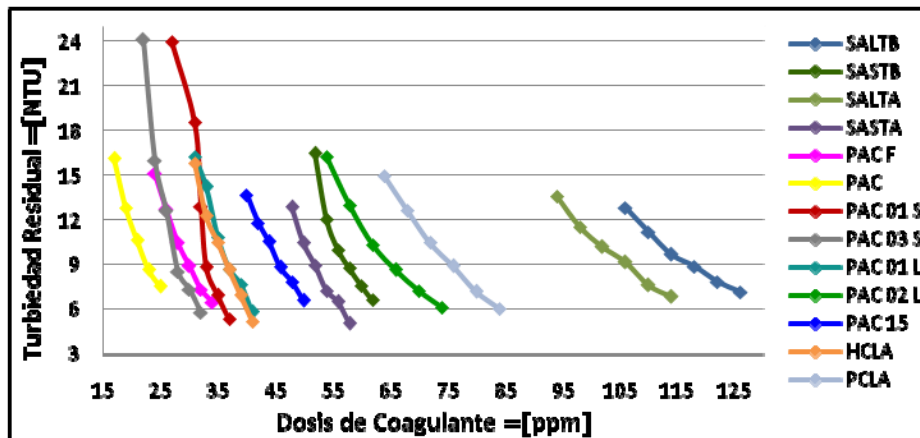


Figura 13. Ensayo de Jarras para una turbiedad de 1050 NTU.

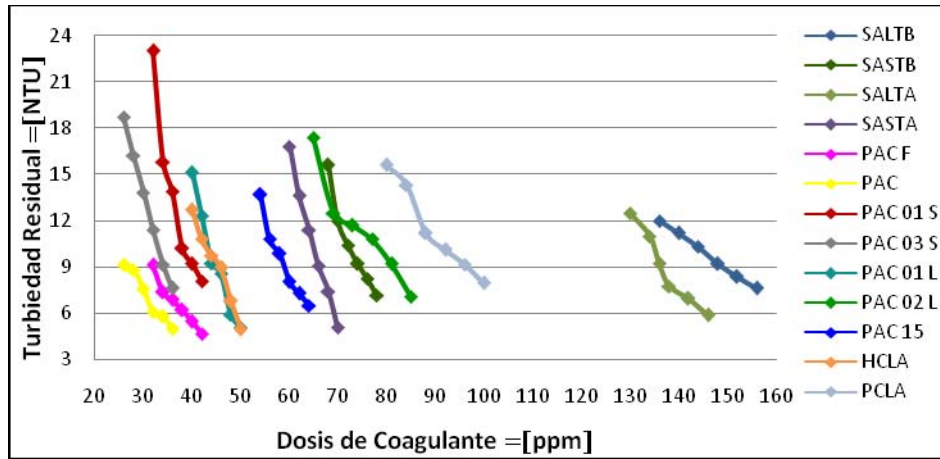


Figura 14. Ensayo de Jarras para una turbiedad de 1600 NTU.

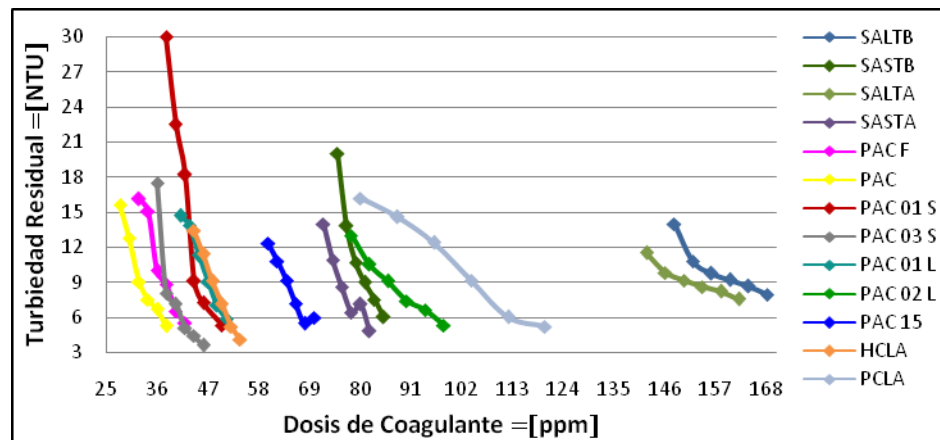


Figura 15. Ensayo de Jarras para una turbiedad de 2190 NTU.

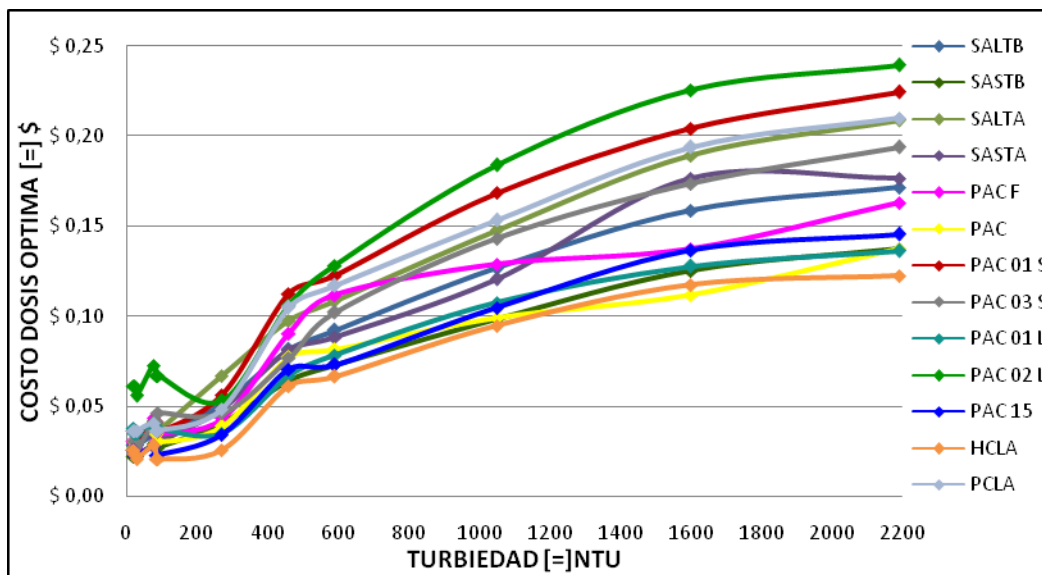


Figura 16. Comportamiento de costos coagulantes Inorgánicos.

3.1.1 Análisis de los comportamientos.

Para muestras de 0 a 30 NTU Se observa que los productos PAC 01 sólido y Sulfato de aluminio sólido tipo A, presentan una mayor remoción de turbiedad y consumo bajo en comparación con los otros coagulantes, sin embargo estos coagulantes tienen la desventaja de ser sólidos y se hace necesario solubilizarlos para la dosificación. Un producto que presenta un buen comportamiento en la remoción de turbiedad, un bajo consumo y su estado es líquido es el Hidroxicloruro de aluminio (HCLA).

Para muestras de 31 a 100NTU se observa de nuevo que el PAC 01 presenta mayores eficiencias en la remoción de material particulado, sin embargo como se menciono anteriormente tiene la desventaja de ser sólido e inestable cuando se expone a la humedad. Una vez más, el Hidroxicloruro de aluminio (HCLA) es una buena alternativa por su estabilidad y facilidad de dosificación.

Para muestras de 100 a 1000 NTU los productos PAC 01 y PAC 03 presentan un mayor porcentaje de remoción en comparación con los demás coagulantes. Debido a las dificultades que se han venido mencionando para estos productos sólidos, nuevamente el Hidroxicloruro de aluminio (HCLA) es el coagulante que ofrece mayores beneficios para el proceso de clarificación del agua consolidándose como una alternativa de gran viabilidad.

Para muestras mayores a 1000 NTU se observa que el Hidroxicloruro de aluminio (HCLA) es el coagulante de mayor eficiencia en la remoción de turbiedad. Teniendo en cuenta las ventajas de este producto lo convierten en la mejor alternativa para el tratamiento del agua con gran cantidad de sólidos suspendidos

En términos de costos de operación, los productos que presentan mayores beneficios económicos en las escalas de turbiedad examinada son el HCLA, el PAC 01 L, el PAC y el SASTB. Sin embargo una vez más el Hidroxicloruro de

aluminio (HCLA) se presenta como el de mayor viabilidad ya que un 75% de los ensayos realizados obtuvo el menor costo en la dosificación.

Productos como el PAC F, el PAC 01 S, el PAC 03 S, el SALTA, el SASTA, el PAC 02 L y el PCLA, pese a su gran contenido de alúmina y a sus bajas dosis empleadas para el tratamiento del agua, no ofrecen beneficios económicos en comparación con el SALTB que actualmente se utiliza como coagulante en la planta de tratamiento Bosconia.

3.2 Resultados de los coagulantes orgánicos

A continuación se presentan los comportamientos obtenidos en los ensayos de Jarras realizados con los siguientes coagulantes orgánicos junto con el SALTB:

Ultrafloc 110 (UF 110): Polímero coagulante catiónico líquido de mediano peso molecular desarrollado a partir de la sinergia entre un polímero inorgánico y un polímero orgánico.

Ultrafloc 210 (UF 210): Polímero coagulante catiónico líquido de mediano peso molecular desarrollado a partir de la sinergia entre un polímero inorgánico y un polímero orgánico.

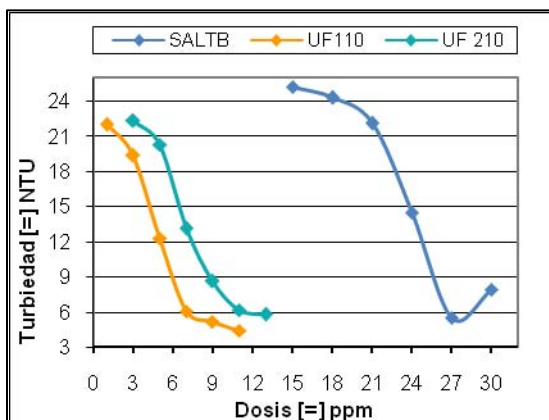


Figura 17. Dosis Optima (Turb= 25.6 NTU)

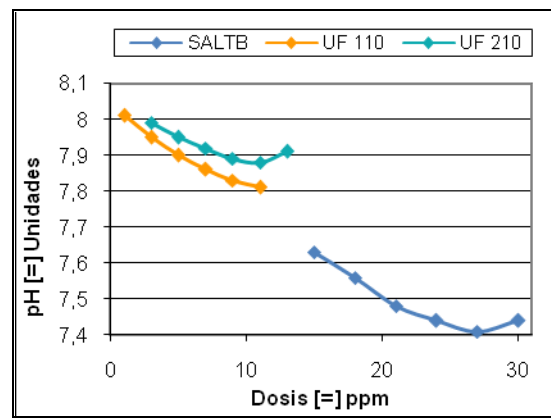


Figura 18. pH Optimo (Turb= 25.6 NTU)

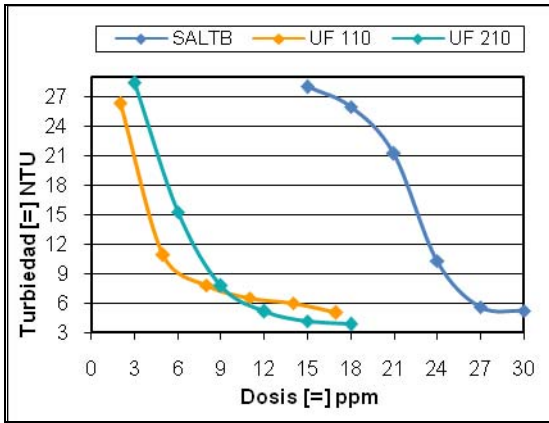


Figura 19. Dosis Optima (Turb= 30 NTU)

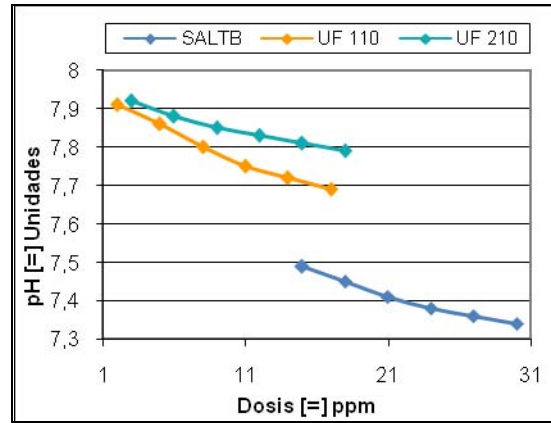


Figura 20. pH Optimo (Turb= 30 NTU)

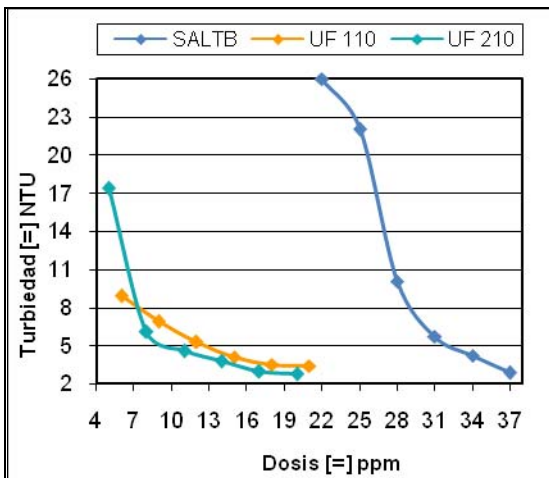


Figura 21. Dosis Optima (Turb= 37 NTU)

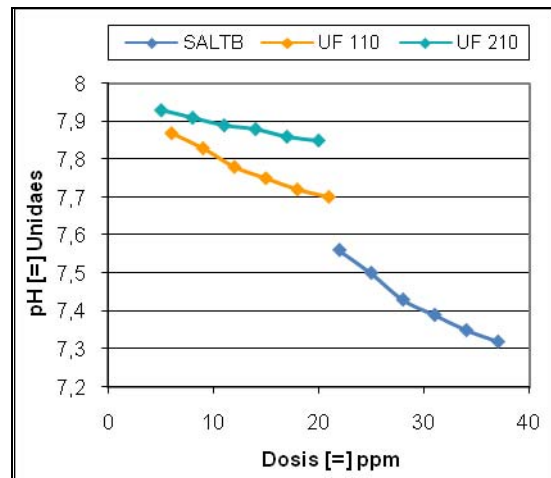


Figura 22. pH Optimo (Turb= 37 NTU)

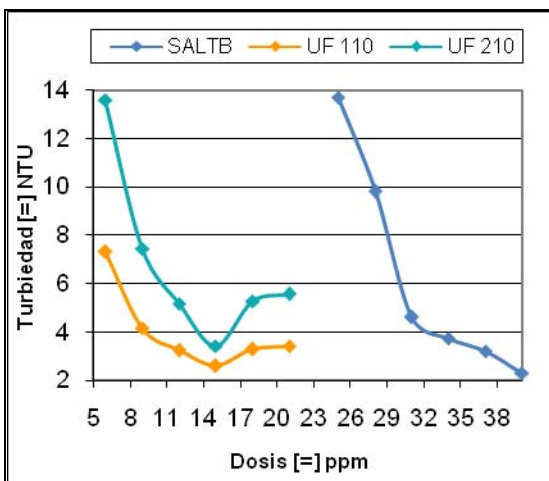


Figura 23. Dosis Optima (Turb= 46.4 NTU)

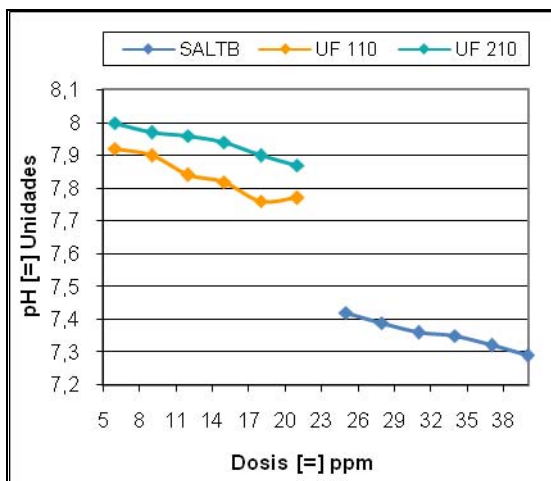


Figura 24. pH Optimo (Turb= 46.4 NTU)

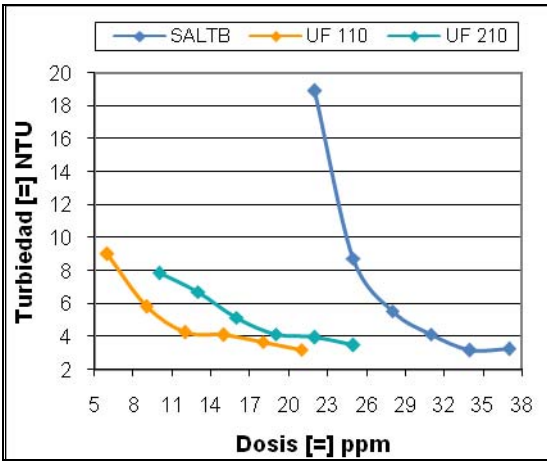


Figura 25. Dosis Optima (Turb= 63.8 NTU)

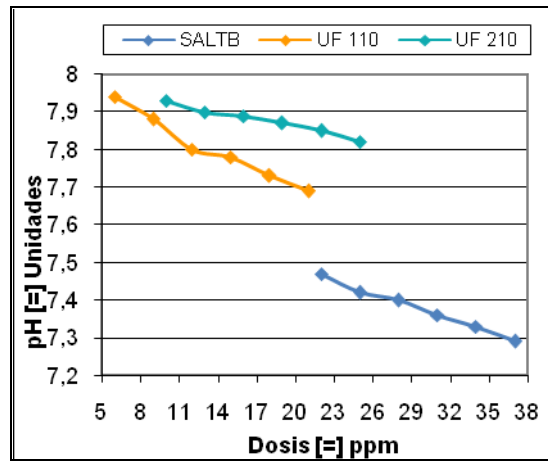


Figura 26. pH Optimo (Turb= 63.8 NTU)

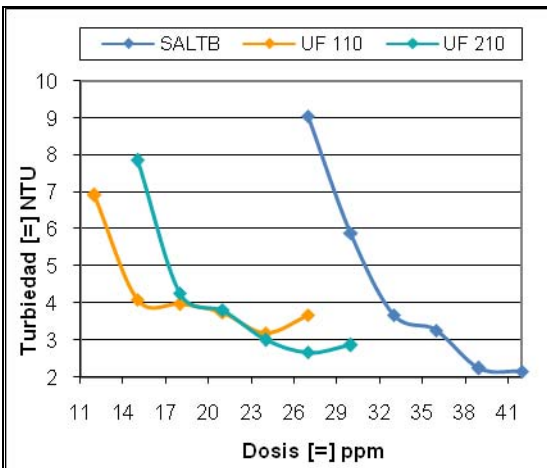


Figura 27. Dosis Optima (Turb= 105 NTU)

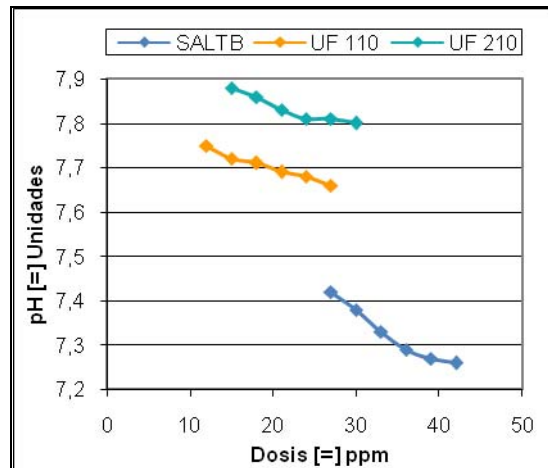


Figura 28. pH Optimo (Turb= 105 NTU)

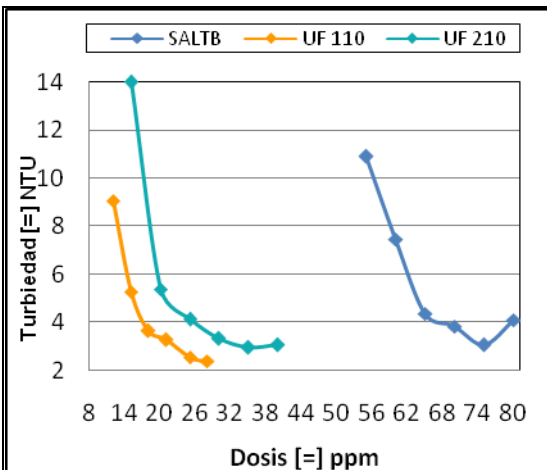


Figura 29. Dosis Optima (Turb= 620 NTU)

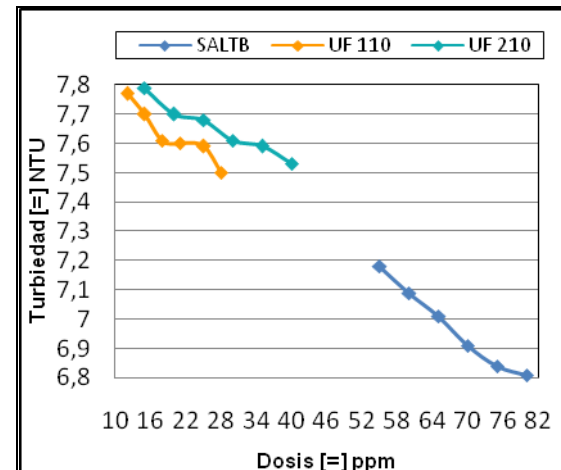


Figura 30. pH Optimo (Turb= 620 NTU)

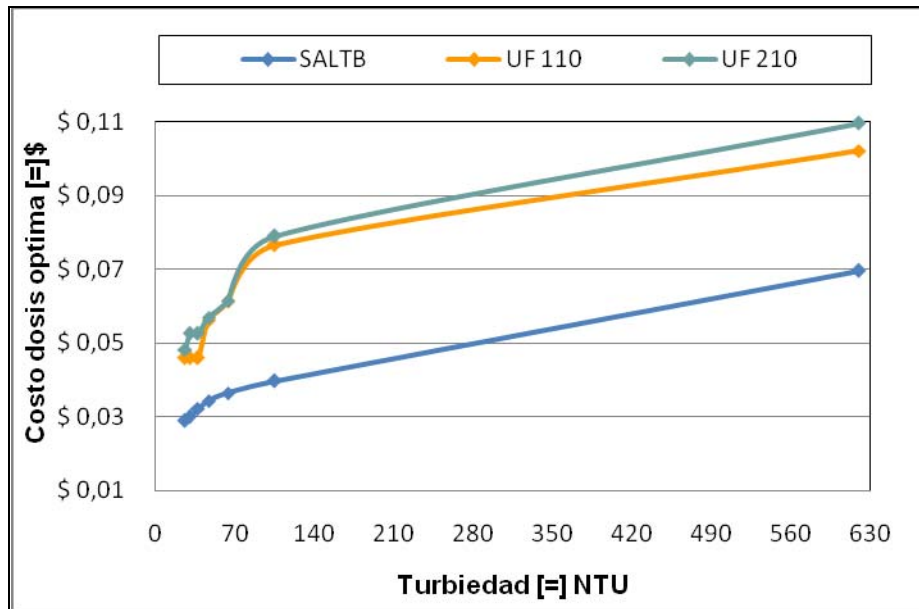


Figura 31. Comportamiento de costos de los polímeros Coagulantes.

Observando el comportamiento de los polímeros coagulantes frente al sulfato de aluminio se concluye que el Ultrafloc 110 tiene una mayor eficiencia que el Ultrafloc 210 y que el Sulfato de Aluminio Líquido tipo B. La utilización del Ultrafloc 110 permite alcanzar mejores condiciones en términos de turbiedad residual y control del pH. Dentro de la normatividad interna del acueducto metropolitano de Bucaramanga que es un intervalo de 7 a 8 unidades; el Ultrafloc 110 evita la utilización de cal para la estabilización del pH del agua.

Como se puede observar en la anterior grafica (figura 31) el Sulfato de Aluminio Tipo B (SALTB) presenta un mejor comportamiento económico (menores costos de operación en todos los siete ensayos realizados con los coagulantes orgánicos). También se puede decir acerca de estos dos polímeros coagulantes que en términos de costos son productos similares. Sin embargo pese a su mayor contenido de alúmina y a sus bajas dosis empleadas para el tratamiento del agua, el sulfato de aluminio líquido tipo B (SALTB) presenta una mayor viabilidad como coagulante en la planta de tratamiento Bosconia.

3.3 Ayudantes de coagulación

Las pruebas se realizaron con los ayudantes de coagulación Rapised B y Rapised ACB – 75 – 9 y con el coagulante Sulfato de Aluminio liquido tipo B, para ocho muestras de agua que se encuentran en los siguientes rangos de turbiedad (0-30 NTU), (31-100 NTU), (101- 1000 NTU) y (>1000 NTU) cabe aclarar que debido a que en nuestro de departamento no se presentaron lluvias, el río surata no presento las condiciones adecuadas para obtener muestras con mayores rangos de turbiedad, a continuación se muestran los resultados obtenidos:

3.3.1 Resultados de ensayos de Jarras con Sulfato de aluminio liquido tipo B y Rapised B

	Turbiedad (NTU)	Relación SALTB/Rapised B (%)	Capacidad de Reemplazo (ppm)
1	25.6	90/10	1-15
2	30	90/10	1-15
3	47.3	80/20	1-15
4	70.7	80/20	1-15
5	99.2	80/20	1-15
6	238	80/20	1-15
7	263	80/20	1-15
8	1918	80/20	1-15

Tabla 3. Resultados Rapised B

Para muestras de 0 a 30 NTU se observa (tabla 3) que la mejor relación en porcentajes de Sulfato de aluminio y Rapised B es de 90/10. En el caso de las muestras de 31 a 100 NTU, 101 NTU a 1000 NTU y mayores a 1000 NTU se observa que la mejor proporción en porcentajes de Sulfato de aluminio y Rapised B es de 80/20.

En términos de la capacidad de reemplazo se estableció que 15 partes por millón (15 ppm) de sulfato de aluminio son reemplazadas realmente por una parte por millón (1ppm) de Rapised B.

3.3.2 Resultados de ensayos de Jarras con Sulfato de aluminio liquido tipo B y Rapised ACB 75-9

	Turbiedad (NTU)	Relación SALTB/Rapised ACB 75-9 (%)	Capacidad de Reemplazo (ppm)
1	25.6	90/10	1-15
2	30	80/20	1-15
3	47.3	90/10	1-15
4	67.5	90/10	1-15
5	105	90/10	1-15
6	263	90/10	1-15
7	1918	90/10	1-10

Tabla 4. Resultados Rapised ACB -75 -9

Para muestras de 0 a 30 NTU, 31 a 100 NTU, 101 NTU a 1000 NTU y mayores a 1000 NTU se observa (tabla 4) que la mejor relación en porcentajes de Sulfato de aluminio y Rapised ACB 75-9 es de 90/10.

También se estableció que 15 partes por millón (ppm) de sulfato de aluminio deben ser reemplazadas realmente por una parte por millón Rapised ACB 75 -9.

Según lo anterior se puede decir que debido a las propiedades similares de estos dos ayudantes de coagulación sus comportamientos en el tratamiento de agua no difieren en mucho, pero una relación coagulante/ ayudante de 90/10 es más conveniente por las siguientes razones:

- El uso de polímeros sintéticos en grandes cantidades no es muy recomendable debido a que aumenta la concentración de monómero residual en el agua tratada lo cual eventualmente también afecta la salud de los consumidores.
- El precio del polímero sintético es muy elevado en comparación con el precio del sulfato de aluminio por esta razón un menor uso del polímero es mucho más conveniente para el costo del tratamiento en la planta de tratamiento Bosconia. Por estas razones proponemos al Rapised ACB-75-9 como alternativa de ayudante de coagulación para la planta de tratamiento Bosconia.

CONCLUSIONES

En este trabajo se evaluaron diferentes tipos de coagulantes (inorgánicos y orgánicos) a nivel de laboratorio en términos de:

Eficiencia en la remoción de turbiedad y color;

Concentración de aluminio residual;

Valores de pH para el agua sedimentada acordes a los parámetros internos que no impliquen la dosificación de insumos químicos para su estabilización;

Disminución de costos de operación;

Facilidad, cantidad y eficiencia en la dosificación.

Con base en los resultados obtenidos para todos los coagulantes, considerando los parámetros mencionados en la conclusión anterior, queda demostrado que el tratamiento fisicoquímico es una opción técnicamente factible y acertada para la potabilización del agua del Río Surata.

Con relación a la turbiedad el producto de mayor eficiencia es el PAC 01 S, debido a que en la mayoría de ensayos se obtuvo un mayor porcentaje de remoción en comparación con los otros productos. Sin embargo como se menciono antes tiene la desventaja de ser solido e inestable cuando se expone a la humedad.

Los resultados indican que el Hidroxicloruro de aluminio y el Rapised ACB 75-9 presentan la mayor viabilidad económica y operativa como coagulante y ayudante de coagulación respectivamente, para el tratamiento del agua del Río Surata, captada en la planta de tratamiento Bosconia.

En algunos de los ensayos realizados con los coagulantes inorgánicos se obtuvieron concentraciones de aluminio residual mayores a 0.200 mg/l (valores por encima de los parámetros internos de la empresa), como en el caso del sulfato de aluminio líquido tipo B y el sulfato de aluminio sólido tipo B (coagulantes utilizados actualmente en la planta de tratamiento Bosconia). Sin

embargo a nivel de planta, el agua sedimentada que pasa por los filtros presenta concentraciones muchos menores a las obtenidas a escala de laboratorio mediante las pruebas de jarras.

Los polímeros coagulantes en comparación con el sulfato de aluminio líquido tipo B presentan mejores resultados en términos de turbiedad, color, baja concentración de aluminio residual y un consumo de coagulante bajo. Además su uso mantiene el agua en un intervalo apropiado de pH, lo cual asegura el cumplimiento de la normatividad interna del Acueducto metropolitano de Bucaramanga. La única desventaja de estos coagulantes es su elevado costo.

De acuerdo a los resultados obtenidos en las pruebas de Jarras, se estableció que 15 partes por millón (15 ppm) de Sulfato de aluminio líquido tipo B son reemplazadas por una parte por millón de los ayudantes de coagulación Rapised B y Rapised ACB 75-9.

De acuerdo con los resultados de Color y turbiedad, se puede decir que existe una relación directa entre la remoción de estos dos parámetros (a mayor remoción de turbiedad hay mayor remoción de color), siendo esto solo aplicable para el tratamiento fisicoquímico del agua en la planta de tratamiento Bosconia.

En cuanto a la dosificación de coagulantes, los productos líquidos representan una mejor opción debido a que se pueden aplicar directamente a diferencia de los coagulantes sólidos en los que es necesario solubilizarlos.

En términos ambientales y de la salud los mejores productos fueron el PAC y el PAC F debido a que en todos los ensayos se obtuvieron valores de aluminio residual considerablemente menores de los obtenidos por los otros coagulantes.

RECOMENDACIONES

Se sugiere almacenar las muestras de agua en un lugar fresco donde se conserven sus propiedades y realizar las pruebas de jarras lo más rápido posible con el propósito de no alterar los resultados de las pruebas.

Lavar después de cada prueba todo el material utilizado, para evitar las posibles contaminaciones en las muestras a caracterizar en el laboratorio.

Realizar las pruebas de Jarras con muestras de agua de turbiedades mayores a 1000 NTU con los coagulantes orgánicos y los Ayudantes de coagulación utilizados en el proyecto, con el fin de tener un mayor conocimiento de sus comportamientos a altas turbiedades.

Realizar la prueba en planta por un tiempo determinado con las sustancias químicas seleccionadas, con el fin de obtener datos más representativos que permitan tomar decisiones acertadas.

Realizar el análisis de monómero residual a el agua tratada en las pruebas de jarras, que permita establecer un concepto más acertado acerca de los posibles riesgos de los ayudantes de coagulación estudiados.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Decreto 1575 de 2007. Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano.
- [2] Resolución 2115 de 2007. Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano.
- [3] SISTEMA DE GESTIÓN DE CALIDAD, Acueducto Metropolitano de Bucaramanga. S.A, E.S.P
- [4] BARRENECHE, John Jairo. "Optimización de los Procesos de Clarificación del Agua Mediante el Uso de Polielectrólitos Sintéticos en el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga". Tesis de grado. Bucaramanga, 2003.
- [5] LONDOÑO C, Adela. Línea de profundización ambiental. Manizales: UNAL, 2003.
- [6] RODRIGUEZ P, Carlos. Operaciones y mantenimiento de agua. Bogotá: Universidad Francisco Javier de Caldas. 1995
- [7] SACRISTAN S. Edgard, Manual de clarificación en sistemas de aguas residuales. Química NALCO de Colombia S.A. Barrancabermeja. 1987
- [8] ANÓNIMO. Seminario Tecnología química y de materiales avanzados sirviendo a los mercados globales. CYTEC.1998.
- [9] KIM P, R. Selecting polymeric flocculants for water treatment. Public Works v-116 sep 1985 P. 108-111.
- [10] SANTAMARIA L, Leonardo. Química Sanitaria. Guías de Laboratorio. Cali, Universidad del Valle.
- [11] CARDENAS, Yolanda. Tratamiento de Agua Coagulación Floculación, Lima: SEDAPAL, 2000.

[12] MALDONADO Y, Víctor. Sedimentación. CEPIS, 2004.

[13] DEPARTAMENTO DE CONTROL DE CALIDAD Y PLANTAS DE TRATAMIENTO, Instructivo General Pruebas de Jarras, Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, 2002.

ANEXOS

ANEXO A. METODOS ANALÍTICOS

DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD

1. Encender, el equipo (Conductímetro) y lavar cuidadosamente el electrodo con agua destilada.
2. Tomar una muestra de 100 ml de agua a analizar en el vaso de precipitado y sumergir electrodo.
3. Tener en cuenta que en la cámara del electrodo no queden burbujas de aire atrapadas para evitar esto sumerge dos o más veces en la muestra.
4. Presionar la tecla de encendido, seleccionar el modo de medida de la conductividad con la tecla M.
5. Tomar lectura del equipo en $\mu\text{mhos/cm}$ y registrar el dato.



Figura 32. Conductímetro WTW 315 i.

DETERMINACIÓN DE LA TURBIEDAD

1. Encender el equipo (Turbidímetro), para medir las muestras.
2. Tomar una muestra representativa en un vaso de precipitado y agitar.
3. Transvasar la muestra a la celda del equipo hasta el aforo (aproximadamente 30 ml).
4. Tomar la celda por la tapa y agitar por inmersión para eliminar las burbujas de aire y limpiar la celda con el paño antiestático (color negro).
5. Colocar la celda dentro del compartimiento del equipo, con la muesca (flecha) hacia fuera y cerrar la tapa.
6. Esperar que a aparezca el valor en la pantalla o presionar ENTER y registrar el valor de la pantalla.
7. Los resultados se leen directamente en los Equipos **TURBIDIMETRO HACH 2100 N ó 2100 P** y se expresa en unidades **NTU** (unidades de turbiedad nefelométricas).



Figura 33. Turbidímetro HACH 2100 N

Nota

- Verificar que la medida se haga con la selección del rango automático, el botón de señal promedio, unidades NTU y el radio (indicado con la luz verde encendida).

- Si la señal de la lámpara parpadea indica bajo nivel, y debe cambiarse.
- Para valores mayores de 4000 NTU (**TURBIDIMETRO HACH 2100N**) ó valores mayores de 800 NTU (**TURBIDIMETRO HACH 2100P**), hacer diluciones y multiplicar el resultado del equipo por el factor de dilución.

DETERMINACIÓN DEL PH

1. Tomar una muestra representativa en un vaso de precipitado de 100ml.
2. Lavar el electrodo con agua destilada e introducirlo en la muestra.
3. Presionar el botón de encendido y el botón Read y esperar hasta estabilizar lectura.
4. Leer directamente en el pHmetro SEVEN EASY Mettler Toledo y expresar en unidades de pH.



Figura 34. PHmetro Mettler Toledo.

Nota

Después de cada lectura, lavar con agua destilada, sumergir el electrodo en KCl 3M y apagar el equipo.

DETERMINACIÓN DEL COLOR VERDADERO.

1. Encender el equipo, de medir las muestras, **DR-2000/DR-2400/DR-2800**.
2. Tomar una muestra representativa en una jeringa de 60 ml, ajustar la membrana Milipore de 0.45 μm y filtrar. Mínimo 25 ml de muestra para cada determinación.
3. Transvasar la muestra a la celda del equipo hasta el aforo de llenado.
4. Leer un blanco de agua destilada y la muestra, en el espectrofotómetro **HACH DR-2000/DR-2400/DR-2800**, longitud de onda de **455 nm**. La lectura es directa y los resultados se expresan como **UPC** (unidades platino cobalto).



Figura 35. Espectrofotómetro HACH DR- 2000/DR-2400/ DR-2800

Nota

- Para los valores mayores de 500 UPC, hacer dilución.
- La misma membrana se puede utilizar para varias determinaciones, pero se debe purgar para cada vez.

DETERMINACIÓN DEL COLOR APARENTE.

1. Encender el equipo, de medir las muestras, **DR-2000/DR-2400/DR-2800**.
2. Tomar una muestra representativa como mínimo de 25 ml de muestra para cada determinación.
3. Transvasar la muestra a la celda del equipo hasta el aforo de llenado.
4. Colocar la celda dentro del compartimiento del equipo y cerrar la tapa.
5. Leer un blanco de agua destilada y la muestra, en el espectrofotómetro **HACH DR-2000/DR-2400/ DR-2800**, longitud de onda de **455 nm**. La lectura es directa y los resultados se expresan como **UPC** (unidades platino cobalto).

Nota

Para los valores mayores de 500 UPC, hacer dilución.

DETERMINACIÓN DE ALUMINIO RESIDUAL POR EL MÉTODO ESPECTROFOTOMÉTRICO (ERIOCROMO CIANINA R)

1. Tomar en 2 probetas de 25 ml, un volumen de 12.5 ml de muestra y 12.5 ml de agua destilada para el blanco.
2. Adicionar a ambas 1 ml de ácido sulfúrico 0.02N y agregar al blanco 1 ml de EDTA.0.02 N.
3. Adicionar a las dos muestras 1 ml de solución de ácido ascórbico 0.1% (recién preparado) y 5 ml de solución buffer (acetato de sodio-ácido acético).
4. Finalmente se les adiciona 2.5 ml de indicador eriocromo-cianina al 10% (diluido del concentrado).
5. Aforar a 25 ml con agua destilada y mezclar. Esperar de 8 a 10 minutos para el desarrollo del color.
6. Leer en el espectrofotómetro **HACH DR-2000/DR-2400/DR-2800** método aluminio residual a una longitud de onda de **535 nm**.

Cálculos

Para la prueba colorimétrica con el equipo **HACH DR2000/DR2400 DR-2800** la lectura es directa y se expresa en mg/L de Al⁺⁺⁺ residual.

DETERMINACIÓN DE ALCALINIDAD TOTAL

1. Tomar en un vaso de precipitado de 100ml, una muestra de 50 ml de agua de río (solo a esta muestra se le hace análisis).
2. Agregar 4 gotas de indicador mixto rojo de metilo bromocresol, (presenta coloración azul).
3. Con agitación constante se titula (Titulador electrométrico Metrohm) con H₂SO₄ 0.02N, hasta que cambie a color durazno.
4. Se hace blanco de reactivo con agua destilada.

Cálculo

$$\text{mgCaCO}_3 / \text{l} = \frac{\text{Vol. H}_2\text{SO}_4 \cdot \text{N} \cdot 50 \cdot 1000}{\text{Vol. Muestra}}$$

$$\text{mg CaCO}_3 / \text{l} = (\text{Vol. H}_2\text{SO}_4 \text{ muestra} - \text{Vol. H}_2\text{SO}_4 \text{ Blanco}) \times 20$$



Figura 36. Titulador electrométrico Metrohm

Nota

La anterior formula es válida únicamente cuando se toman 50 ml de muestra.

PREPARACIÓN DE REACTIVOS QUÍMICOS

REACTIVOS QUÍMICOS PARA DETERMINACIÓN DE ALUMINIO RESIDUAL

Indicador Eriocromo Cianina –R:

Solución Concentrada: Disolver 0.300 g de Eriocromo Cianina R en aproximadamente 50 ml de agua destilada, ajustar el pH desde 9 a 2.9 con ácido acético (1:1), (se gastan aprox. 3 ml de este ácido), y finalmente aforar a 100 ml con agua destilada. Esta solución es estable por 1 año.

Solución diluida: Tomar 10 ml de la solución anterior y aforar a 100 ml con agua destilada. Esta solución es estable durante 6 meses.

Solución de Ácido ascórbico: Disolver 0.05 g ácido ascórbico y diluir a 50 ml con agua destilada. Preparar esta solución semanalmente.

Solución de H₂SO₄ 0.02N: (es el mismo ácido con el que se determina alcalinidad). Tomar 100 ml de H₂SO₄ 0.1N se lleva a 500 ml con agua destilada.

Solución de EDTA 0.01M: Tomar 10 ml de la solución 0.1 M de EDTA y aforar a 100 ml en un balón con agua destilada.

Solución Buffer para aluminio: Disolver 136 g de acetato de sodio trihidratado y 40 ml de solución de ácido acético 1 N y aforar a 1000 ml de agua destilada.

Ácido acético 1 N: 2.3 ml de ácido acético glacial en 40 ml de agua destilada.

REACTIVOS QUÍMICOS PARA DETERMINACIÓN DE ALCALINIDAD TOTAL

Solución de H₂SO₄ 0.02N: Tomar 100 ml de H₂SO₄ 0.1 N se lleva a 500 ml con agua destilada.

Indicador mixto: Tomar 0.04 g de rojo de metilo y 0.2 g de verde de bromocresol y se disuelven en 200 ml de etanol.

REACTIVOS QUÍMICOS PARA DETERMINACIÓN DE PRUEBA DE JARRAS

Solución Madre de Alumbre (solución de sulfato de aluminio al 10%), Pesar 10 g de sulfato de aluminio sólido en un vaso de precipitado de 200 ml. Disolver en aproximadamente 80 ml de agua destilada, agitar durante 5 minutos y llevar a un volumen de 100 ml en una probeta. El tiempo máximo de preservación de la solución madre de alumbre es de un (1) mes. Cuando se trabaja en planta con solución de sulfato sólido al 10%, se toma esta solución directamente como solución madre.

Solución de trabajo (solución de sulfato de aluminio al 1%), agitar la solución madre de alumbre, tomar 10 ml en una pipeta y llevar a un volumen de 100 ml con agua destilada en una probeta. El tiempo máximo de preservación de esta solución es de ocho (8) horas.

Nota

Para el caso de sulfato de aluminio líquido, tipo B:

La solución madre: Solución que llega con una densidad de 1,32 g/ml.

Solución de trabajo: Para una densidad de 1,32 g/ml, tomar 0,76 ml de la solución madre y se lleva 100 ml ó 7,6 ml y se lleva a 1000 ml.

ANEXO B. MARCO CONCEPTUAL

Agua cruda

Es aquella que no ha sido sometida a proceso de tratamiento.

Agua apta para consumo humano

Es aquella que por reunir los requisitos organolépticos, físicos, químicos y microbiológicos, en las condiciones señaladas en el decreto 1575/2007 y resolución 2115 de 2007, puede ser consumida por la población humana sin producir efectos adversos a su salud

Alcalinidad

Es un método de análisis, con el que se determina el contenido de bicarbonatos (HCO_3^-); carbonatos (CO_3^{2-}) e hidróxidos de un agua natural o tratada. La alcalinidad tiene relación con el pH del agua.

Calidad del Agua

Es el conjunto de características organolépticas, físicas, químicas y microbiológicas propias del agua.

Coagulación

Es un proceso de desestabilización química de las partículas coloidales que se produce al neutralizar las fuerzas que las mantienen separadas, por medio de la adición de los coagulantes químicos y la aplicación de la energía de mezclado.

Coagulante

El coagulante es un compuesto químico que inestabiliza la materia suspendida en forma coloidal, a través de la alteración de la capa iónica cargada eléctricamente que rodea a las partículas coloidales

Coloide

Son suspensiones estables, por lo que es imposible su sedimentación natural, son sustancias responsables de la turbiedad y del color del agua.

Color Aparente

El término color aparente se refiere al color debido tanto a las sustancias disueltas como a las partículas en suspensión. El color aparente es obtenido sin filtrar la muestra original.

Color Verdadero

Es el que existe cuando se ha removido toda la turbiedad por medio de filtración o centrifugación para evitar que esta quede registrada como color.

Conductividad Eléctrica

La conductividad eléctrica de una sustancia se define como la habilidad o poder de conducir electricidad.

Dosificación

Acción mediante la cual se suministra una sustancia química al agua.

Dosis Óptima

Concentración que produce la mayor eficiencia de reacción en el proceso de coagulación.

Filtración

La filtración puede definirse como la separación de uno o más elementos sólidos de un elemento fluido (líquido o gas), mediante el paso de la mezcla a través de un elemento poroso filtrante, llamado filtro.

Flóculo

Masa floculada que es formada por la acumulación de partículas suspendidas.

Floculación

La floculación es el proceso que sigue a la coagulación, que consiste en la agitación de la masa coagulada, sirve para permitir el crecimiento y aglomeración de los flóculos recién formados con la finalidad de aumentar el tamaño y peso necesarios para sedimentar con facilidad.

Patógeno

Es aquel elemento o medio capaz de producir una enfermedad o daño en el cuerpo de un animal, un ser humano o un vegetal, cuyas condiciones estén predisuestas a las ocasiones mencionadas.

pH

El pH es una medida de la acidez o basicidad de una solución. El pH es la concentración de iones hidronio $[H_3O^+]$ presentes en determinada sustancia

Polielectrólitos

Son moléculas en general polímeros solubles en agua que poseen carga iónica a lo largo de toda su cadena. Dependiendo de la carga estos polielectrólitos pueden ser aniónicos o catiónicos. Poseen un amplio rango de pesos moleculares y densidades de carga. Poseen un vasto campo de aplicaciones, y pueden actuar tanto como floculantes o ayudante de floculación, dependiendo de las propiedades antes mencionadas.

Planta de tratamiento

Es el conjunto de infraestructuras, equipos, materiales y otros necesarios para efectuar los procesos que permitan cumplir con las normas de calidad del agua potable.

Pruebas de Jarras

Es un método de simulación de los procesos de Coagulación, floculación y sedimentación, realizado a nivel de laboratorio que permite obtener agua de buena calidad, fácilmente separable por decantación.

Sedimentación

La sedimentación es el proceso por el cual el material sólido, transportado por una corriente de agua, se deposita en el fondo del río, embalse, canal artificial, o dispositivo construido especialmente para tal fin.

Tratamiento

Es el conjunto de operaciones y procesos que se realizan sobre el agua cruda, con el fin de modificar sus características organolépticas, físicas, químicas y microbiológicas, para hacerla potable de acuerdo a las normas establecidas en el decreto 1575 de 2007 y la resolución 2115 de 2007.

Turbiedad

Es una forma indirecta de medir la concentración de las partículas suspendidas en un líquido; mide el efecto de la dispersión que estas partículas presentan al paso de la luz; y es función del número, tamaño y forma de partículas.

ANEXO C. MARCO LEGAL

CALIDAD DEL AGUA.

Los valores que alcancen las diferentes características del agua la hacen propia para determinado uso y le imprimen una calidad específica que le permiten una clasificación.

Estas características de calidad que deben alcanzar las aguas según el uso, llevan a manejar diferentes tratamientos de adecuación para alcanzar los valores propios.

La calidad de las aguas en el país esta régida en sus valores mínimos para cada uso, de acuerdo al Decreto 1594/84 y para agua potable se establecen los valores permitidos mínimos en el Decreto 1575 de 2007 y la resolución 2115 de 2007.

Legislación colombiana - parte agua

Colombia maneja una de las legislaciones más completas y exigentes en el panorama mundial en lo que se refiere a la parte ambiental. Esta legislación que arranca desde 1974 se desarrolla con base en los códigos nacionales de recursos renovables y a partir de allí se desprenden los diferentes aspectos que tienen que ver con las entidades encargadas de los manejos, las empresas de servicios públicos, la descentralización y la función municipal frente a los usos de los recursos, toda la legislación tarifaria y la base de los impuestos en esta materia. A partir de 1993 se crea el Ministerio del Medio Ambiente y la parte agua que venía manejada por el Ministerio de Salud es acogida por el nuevo ministerio.

Desde el punto de vista de calidad de agua se podría resumir esta legislación en los siguientes decretos-ley:

Decreto 2811 de 1974 Código nacional de recursos renovables y Plan de manejo ambiental.

Ley 9ª de 1979 medidas sanitarias.

Decreto 2104 de 1983 Reglamenta el D. 2811 y la ley 9ª en recursos sólidos.

Decreto 2105 de 1983 Reglamenta Potabilización del agua.

Decreto 1594 de 1984 Reglamenta el D. 2811 y la ley 9ª. Usos del agua y recursos líquidos.

Decreto 951 de 1989 Reglamento para servicios de acueducto y alcantarillado.

Decreto 1842 de 1991 Estatuto nacional de usuarios de servicios públicos domiciliarios.

Decreto 2167 de 1992 Reestructuración del departamento nacional de planeación y crea las comisiones reguladoras de servicios públicos.

Ley 60 de 1993 le da competencia a los municipios para agua potable.

Ley 99 de 1993 crea el ministerio del medio ambiente.

Resolución 02 de 1994 normas para servicio de aseo.

Ley 136 de 1994 modernización de los municipios.

Ley 142 de 1994 Régimen de servicios públicos domiciliarios.

Decreto 1524 de 1994 Delegación en la comisión de regulación de agua potable y saneamiento básico.

Resolución 08 de 1995 Criterios y metodología para determinación de tarifas por empresas de servicios Públicos.

Decreto 1429 de 1995 Conformación de comités para el control social. (ley 142/94).

Resolución 12 de 1995 Evaluación de resultados. Criterios- indicadores- características-moderadores.

Decreto 1575 de 2007: Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano.

Resolución 2115 de 2007: por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano.

Los decretos más importantes sobre el recurso agua desde el punto de vista de calidad son:

DECRETO 1575 DE 2007- "Por el cual se establece el Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano".

Capítulo I - Disposiciones generales.

Capítulo II - Características y criterios de la calidad del agua para consumo humano.

Capítulo III - Responsables del control y vigilancia para garantizar la calidad del agua para consumo humano

Capítulo IV - Instrumentos básicos para garantizar la calidad del agua para consumo humano

Capítulo V - Procesos básicos del control y la vigilancia para garantizar la calidad del agua para consumo humano

Capítulo VI - Disposiciones comunes

Capítulo VIII – Disposiciones finales.

DECRETO 1594 DE 1984 - "Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la ley 09 de 1979, así como el capítulo II del título VI -parte III- libro II y el título III de la parte III - libro I - del Decreto 2811 de 1974 en cuanto a usos del Agua y residuos líquidos".

Capítulo I - Definiciones.

Capítulo II - Del ordenamiento del recurso.

Capítulo III - de la destinación genérica de las aguas.

Capítulo IV - de los criterios de calidad para la destinación.

Capítulo V - de las concesiones y de las normas de vertimiento.

Capítulo VII - de los registros de los vertimientos.

Capítulo VIII - De la obtención de los permisos de vertimiento y de los planes de cumplimiento para usuarios existentes.

Capítulo IX - De los permisos de vertimiento y autorizaciones sanitarias.

Capítulo X - De las autorizaciones sanitarias. Disposiciones Generales.

Capítulo XI - De los procedimientos para la modificación de normas de vertimiento, y criterios de calidad.

Capítulo XII - De las tasas retributivas.

Capítulo XIII - de los estudios de efecto ambiental.

Capítulo XIV - de los métodos de análisis y de la toma de muestras.

Capítulo XV - De la vigilancia y control.

Capítulo XVI - De las medidas sanitarias, las sanciones y los procedimientos.

Estos decretos son la base para que las Entidades de manejo ambiental - EMAR- que en la actualidad son las Corporaciones Regionales Autónomas, vigilen y controlen el uso y la calidad de las aguas en el país.

Las plantas de potabilización de agua en los municipios tienen concesiones específicas para tomar parte del caudal de las cuencas y de acuerdo a las características del agua al entrar a la planta, se realizan las dosificaciones y se plantean los tratamientos más adecuados. La medición de características como turbiedad, color y alcalinidad son fundamentales para conocer el grado de calidad y la exigencia en los tratamientos de agua potable.

Una vez terminado el paso del agua por las distintas unidades de tratamiento, se almacena y se mide la calidad del agua que será suministrada a la población. Esta calidad es controlada en cada municipio y los Servicios de Salud certifican la calidad y el seguimiento que se hace de acuerdo a lo recomendado en el Decreto 1575 y en la resolución 2115 de 2007.

Los valores mínimos para una agua potable se consignan en el decreto y son:

Capítulo II

Art. 2 Características físicas.

CARACTERISTICAS	EXPRESADAS EN	VALOR MAXIMO ACEPTABLE
Color Aparente	Unidades de platino cobalto (UPC)	15
Olor y Sabor	Aceptable o no aceptable	Aceptable
Turbiedad	Unidades Nefelométricas de turbiedad (UNT)	5

Tabla 5. Características Físicas ^[2].

Art.3 *Conductividad.* El valor máximo aceptable para la conductividad puede ser hasta 1000 microsiemens/cm. Este valor podrá ajustarse según los promedios habituales y el mapa de riesgo de la zona. Un incremento de los valores habituales de la conductividad superior al 50% en el agua de la fuente, indica un cambio sospechoso en la cantidad de sólidos disueltos y su procedencia debe ser investigada de inmediato por las autoridades sanitaria y ambiental competentes y la persona prestadora que suministra o distribuye agua para consumo humano.

Artículo 4°. *Potencial de hidrógeno.* El valor para el potencial de hidrógeno pH del agua para consumo humano, deberá estar comprendido entre 6,5 y 9,0.

Artículo 5°. *Características químicas de sustancias que tienen reconocido efecto adverso en la salud humana.* Las características químicas del agua para consumo humano de los elementos, compuestos químicos y mezclas de compuestos químicos diferentes a los plaguicidas y otras sustancias que al sobrepasar los valores máximos aceptables tienen reconocido efecto adverso en la salud humana, deben enmarcarse dentro de los valores máximos aceptables que se señalan a continuación:

Elementos, compuestos químicos y mezclas de compuestos químicos diferentes a los plaguicidas y otras sustancias.	Expresados Como	Valor máximo aceptable (mg/L)
Antimonio	Sb	0,02
Arsénico	As	0,01
Bario	Ba	0,7
Cadmio	Cd	0,003
Cianuro libre y disociable	CN ⁻	0,05
Cobre	Cu	1,0
Cromo total	Cr	0,05
Mercurio	Hg	0,001
Níquel	Ni	0,02
Plomo	Pb	0,01
Selenio	Se	0,01
Trihalometanos Totales	THMs	0,2
Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP)	HAP	0,01

Tabla 6. Características químicas que tienen reconocido efecto adverso en la salud humana ^[2].

ANEXO D. MARCO NORMATIVO ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA.

**CRITERIOS FÍSICOS Y QUÍMICOS DE LA CALIDAD DEL AGUA POTABLE
PARÁMETROS INTERNOS**

Agua Cruda

PARAMETRO	EXPRESADAS EN	VALOR ADMISIBLE
Cianuro	mg/L	0.2
Mercurio	µg/L	2

Tabla 7. Parámetros internos para el agua cruda ^[2].

Agua Tratada

PARAMETRO	EXPRESADAS EN	VALOR ADMISIBLE
Cianuro Libre	mg/L	< 0.05
Mercurio	µg/L	< 1
Turbiedad	NTU	< 2
pH	Unidades	7.0 – 8.0
Color Aparente	UPC	< 10
Cloro Residual	mg/L	0.9 – 1.2
Aluminio Residual	mg/L	< 0.2

Tabla 8. Parámetros internos para el agua tratada ^[3].