

**ESTUDIO DEL EFECTO DE LA MEZCLA DE AGUA DEL EMBALSE DE  
BUCARAMANGA CON EL RÍO SURATA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE  
BOSCONIA.**

KAROL DANIELA ARIAS ARDILA

000245464

JHONATAN LEON GONZALEZ

000240449

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA

ESCUELA DE INGENIERÍAS

FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL

BUCARAMANGA

2019

**ESTUDIO DEL EFECTO DE LA MEZCLA DE AGUA DEL EMBALSE DE  
BUCARAMANGA CON EL RÍO SURATA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE  
BOSCONIA.**

KAROL DANIELA ARIAS ARDILA

000245464

JHONATAN LEON GONZALEZ

000240499

Proyecto de grado presentado como requisito para optar al título de:

INGENIERO AMBIENTAL

DIRECTORA DEL PROYECTO

MS c. ALVARO ANDRES CAJIGAS CERON

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA

ESCUELA DE INGENIERÍAS

BUCARAMANGA

2019

**Nota de aceptación**

---

---

---

---

---

---

---

---

**Firma del presidente del jurado**

---

**Firma del jurado**

---

**Firma del jurado**

Bucaramanga, noviembre de 2019

## TABLA DE CONTENIDO

CAPITULO 1.....	11
INTRODUCCIÓN .....	11
CAPITULO 2.....	12
OBJETIVOS .....	12
Objetivo general .....	12
Objetivos Específicos.....	12
CAPITULO 3.....	13
MARCO TEORICO.....	13
Importancia del agua potable. ....	13
Embalses.....	14
Generalidades de la Potabilización de agua. ....	14
Mezcla rápida. ....	17
Potencial zeta.....	18
Fases de la coagulación. ....	19
Mecanismos de desestabilización de partículas coloidales o de coagulación. ....	21
Coagulación por incorporación o de barrido.....	21
Compresión a doble capa .....	22
Absorción y Neutralización de cargas.....	23
Adsorción y Puente .....	23
Tipos de Coagulantes usados en el proceso de potabilización de agua. ....	24
Sulfato de Aluminio [Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> ].....	24
Hidroxiclорuro de aluminio [PAC] .....	25
Floculación.....	26

Diagramas de coagulación .....	27
Algunos estudios .....	29
CAPITULO 4.....	31
METODOLOGIA.....	31
FASE I Estudio el proceso de coagulación. ....	32
Concentración de dosis de coagulante .....	33
Puntos de muestreo.....	34
Equipos de jarras .....	34
Construcción de resultados.....	34
FASE II Análisis de varianza de la calidad de agua de las mezclas realizadas entre la planta de Bosconia y el embalse de Bucaramanga.....	35
Registro de los parámetros físicos iniciales .....	36
Determinación de masas de agua de entrada.....	37
FASE III: Evaluación del proceso de floculación.....	37
CAPITULO 5.....	39
RESULTADOS Y DISCUSION .....	39
FASE I Estudio el proceso de coagulación. ....	39
Diagramas de coagulación de la mezcla 1 embalse/rio (25/75) .....	39
Diagramas de coagulación de la mezcla 2 embalse/rio (50/50) .....	40
Diagramas de coagulación de la mezcla 3 embalse/rio (75/25) .....	41
FASE II Análisis de varianza de la calidad de agua de las mezclas realizadas entre la planta de Bosconia y el embalse de Bucaramanga.....	47
Registro de parámetros.....	47
Determinación masas de agua .....	48

FASE III: Evaluación del proceso de floculación.....	49
Graficas de floculación por cada mezcla y tipo de coagulante .....	49
Floculación mezcla (25/75).....	49
Floculación mezcla (50/50).....	52
Floculación mezcla (75/25).....	55
CAPITULO 6.....	59
CONCLUSIONES .....	59
CAPITULO 7.....	60
RECOMENDACIONES.....	60
CAPITULO 8.....	61
LISTA DE REFERENCIAS .....	61
CAPITULO 9.....	63
ANEXOS .....	63

## **LISTA DE TABLAS**

<b>Tabla 1</b> concentraciones de coagulante.....	34
<b>Tabla 2</b> Parámetros iniciales de las mezclas realizadas .....	36
<b>Tabla 3</b> Gradientes y tiempos usados en floculación.....	38
<b>Tabla 4</b> Diagramas de coagulación mezcla 1 (Autores) .....	40
<b>Tabla 5</b> Diagramas de coagulación mezcla 2.....	41
<b>Tabla 6</b> Diagramas de coagulación mezcla 3.....	42
<b>Tabla 7</b> Datos significativos diagramas de coagulación .....	43
<b>Tabla 8</b> Variables diagramas de coagulación mezcla 1 .....	44
<b>Tabla 9</b> Variables diagramas de coagulación mezcla 2 .....	45
<b>Tabla 10</b> Variables diagramas de coagulación mezcla 3 .....	46
<b>Tabla 11</b> Comparación de $F_{calculada}$ y $F_{teórica}$ .....	47

<b>Tabla 12</b> Masas de agua de entrada a la planta .....	48
--	----

## **LISTA DE FIGURAS**

<b>Figura 1</b> Proceso tratamiento de agua potable .....	15
<b>Figura 2</b> Mecanismos de Adsorción-Neutralización .....	17
<b>Figura 3</b> Potencial eléctrico entre capa fija y capa exterior .....	19
<b>Figura 4</b> Anulación de cargas por el coagulante.....	20
<b>Figura 5</b> Aglomeración de partículas.....	21
<b>Figura 6</b> Adsorción de contraiones en la partícula coloidal.....	22
<b>Figura 7</b> Puentes entre coloides .....	23
<b>Figura 8</b> Zonas de desestabilización .....	29
<b>Figura 9</b> Zona topográfica planta Bosconia, Chitota, Bucaramanga, Santander .....	31
<b>Figura 10</b> Fases del estudio.....	32
<b>Figura 11</b> Proceso de evaluación de coagulación .....	33
<b>Figura 12</b> Ítems de registro de datos para el análisis de varianza.....	35
<b>Figura 13</b> Proceso de evaluación de floculación .....	38

## **LISTAS DE GRAFICAS**

<b>Grafica 1</b> Efectos de la dosificación en la turbiedad .....	25
<b>Grafica 2</b> %Turbidez residual vs Tiempo de floculación mezcla 1 PAC .....	50
<b>Grafica 3</b> %Turbidez residual vs Tiempo de floculación mezcla 1 SL .....	51
<b>Grafica 4</b> LOG Gradiente vs LOG Tiempo de floculación .....	52
<b>Grafica 5</b> %Turbidez residual vs Tiempo de floculación mezcla 2 PAC .....	53
<b>Grafica 6</b> %Turbidez residual vs Tiempo de floculación mezcla 2 SL .....	54
<b>Grafica 7</b> LOG Gradiente vs LOG Tiempo de floculación .....	55
<b>Grafica 8</b> %Turbidez residual vs Tiempo de floculación mezcla 3 PAC .....	56
<b>Grafica 9</b> %Turbidez residual vs Tiempo de floculación mezcla 3 SL .....	57
<b>Grafica 10</b> LOG Gradiente vs LOG Tiempo de floculación .....	58

## LISTAS DE ANEXOS

<b>Anexo 1</b> Hoja de seguridad sulfato de aluminio liquido tipo B (Quinsa S.A) .....	63
<b>Anexo 2</b> Hoja de seguridad policloruro de aluminio PAC (Quinsa S.A).....	66
<b>Anexo 3</b> Parámetros iniciales muestras de coagulación .....	69
<b>Anexo 4</b> Datos recogidos para pH; medias y totales (Autores).....	69
<b>Anexo 5</b> Datos recogidos para temperatura; medias y totales (Autores).....	70
<b>Anexo 6</b> Datos recogidos para color; medias y totales (Autores) .....	71
<b>Anexo 7</b> Datos recogidos para conductividad; medias y totales (Autores) .....	72
<b>Anexo 8</b> Datos recogidos para alcalinidad; medias y totales (Autores) .....	73
<b>Anexo 9</b> Datos recogidos para dureza; medias y totales (Autores) .....	74
<b>Anexo 10</b> Datos recogidos para turbiedad; medias y totales (Autores).....	75
<b>Anexo 11</b> Datos de turbidez final recogidos en la etapa de floculación mezcla 1 (25/75) (Autores) .....	77
<b>Anexo 12</b> Datos de turbidez final recogidos en la etapa de floculación mezcla 2 (50/50) (Autores) .....	78
<b>Anexo 13</b> Datos de turbidez final recogidos en la etapa de floculación mezcla 3 (75/25) (Autores) .....	78



## **RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO**

**TITULO:** **ESTUDIO DEL EFECTO DE LA MEZCLA DE AGUA DEL EMBALSE DE BUCARAMANGA CON EL RÍO SURATA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE BOSCONIA.**

**AUTOR(ES):** KAROL DANIELA ARIAS ARDILA  
JHONATAN LEON GONZALEZ

**PROGRAMA:** Facultad de Ingeniería Ambiental

**DIRECTOR(A):** ALVARO ANDRES CAJIGAS CERON

### **RESUMEN**

El presente proyecto, es el resultado de la investigación aplicada en la evaluación de mezclas entre el agua del embalse de Bucaramanga y el río Surata para la planta de tratamiento de agua potable (PTAP) de Bosconia. El proyecto consistió en la realización de tres mezclas diferentes entre las aguas anteriormente mencionadas con la finalidad de observar su comportamiento químico mientras se realizó el respectivo proceso de coagulación y floculación empleando dos agentes coagulantes (PAC y sulfato de Aluminio líquido). El estudio se basó en un ensayo en el equipo de jarras a escala laboratorio en el cual se evalúa la eficiencia del proceso de coagulación y floculación respecto a la acción de los dos agentes coagulantes, teniendo como propósito fundamental evidenciar la efectividad de los coagulantes, en la reducción de la turbiedad final y se determinó cuál de los dos tipos es el más efectivo para la PTAP. Las mezclas se le evaluaron parámetros iniciales de calidad de agua como oxígeno disuelto, alcalinidad, temperatura, dureza, color, conductividad, pH y turbiedad, también se realizaron 3 diagramas de coagulación por cada mezcla y tipo de coagulante y se seleccionó la mejor dosis sin modificación de pH, las cuales se aplicaron para el análisis del gradiente óptimo de floculación.

### **PALABRAS CLAVE:**

Floculación, Coagulación, Mezclas, Turbiedad, PAC, Sulfato Aluminio líquido, Gradiente óptimo.

## GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

**TITLE:** **STUDY OF THE EFFECT OF THE WATER MIXTURE OF THE BUCARAMANGA EMBALSO WITH THE SURATA RIVER IN THE TREATMENT PLANT OF BOSCONIA.**

**AUTHOR(S):** KAROL DANIELA ARIAS ARDILA  
JHONATAN LEON GONZALEZ

**FACULTY:** Faculty of environmental engineering

**DIRECTOR:** ALVARO ANDRES CAJIGAS CERON

### ABSTRACT

This project is the result of the research applied in the evaluation of mixtures between the water of the Bucaramanga reservoir and the Suratá river for the Bosconia drinking water treatment plant (PTAP). The project consisted on the accomplishment of three different mixtures between the aforementioned waters, in order to observe it's chemical behavior, while the respective coagulation and flocculation process was carried out, using two coagulating agents (Aluminum Poly-chlorides and Aluminum sulphate). The study was based on a trial in the laboratory scale jug equipment, in which the efficiency of the coagulation and flocculation process is evaluated with respect to the action of the two coagulation agents. Having as fundamental purpose to demonstrate the effectiveness of the coagulations in reducing final turbidity, and it was determined which of the two types is the most effective for PTAP. The mixtures were evaluated for initial quality parameters such as: dissolved oxygen, alkalinity, temperature, hardness, color, conductivity, pH and turbidity. Also, three coagulation diagrams were made for each mixture and type of coagulation, so the best does without pH modification was selected; which were applied for the analysis of the optimal flocculation gradient.

**KEYWORDS:** Flocculation, Coagulation, Mixtures, Turbidity, PAC, Liquid Aluminum Sulfate, Optimum gradient

## **CAPITULO 1.**

### **INTRODUCCIÓN**

La demanda de agua que se ha venido dando en la ciudad de Bucaramanga en los periodos de sequía ha conllevado a que el acueducto tome acciones para suplir y garantizar las necesidades de la población, con la construcción del embalse de Bucaramanga se provisionara a la planta de Bosconia en los momentos de escasez; se quiso estudiar el efecto que tendría la mezcla de agua entre el rio Surata y el embalse, teniendo en cuenta que el agua del embalse presenta condiciones de calidad nuevas, es necesario realizar el estudio para conocer y analizar posibles cambios que se presenten para la planta.

El tratamiento fisicoquímico del agua cruda cuenta con diferentes fases que están determinadas por sus distintos mecanismos de funcionamiento. La etapa de coagulación comprende una importante fase dentro del proceso de tratamiento; un análisis comparativo entre agentes coagulantes convencionales y alternativos permite demostrar la eficiencia y el costo-beneficio que conlleva el uso de estos dentro del proceso de potabilización, es por ello que el estudio tuvo como finalidad analizar el comportamiento químico en tres diferentes mezclas de aguas, evaluando la eficiencia en el proceso de coagulación con dos tipos de coagulantes distintos (**PAC**) y Sulfato de Aluminio líquido usando metodología JAR TEST para la obtención de diagramas realizando el análisis de eficiencia de remoción, así mismo usando análisis de varianza se determina la variabilidad de la calidad del agua de los parámetros escogidos entre las mezclas realizadas.

La fase posterior a la coagulación en el proceso convencional de tratamiento de agua se denomina floculación, en el cuerpo del documento se encuentra la evaluación de la aglomeración de partículas en el proceso para cada una de las mezclas probables del embalse de Bucaramanga y el río Suratá, además se representa gráficamente el comportamiento de las curvas de turbidez a través del tiempo de agitación para determinar la energía de mezcla en la floculación.

## **CAPITULO 2.**

### **OBJETIVOS**

#### **Objetivo general**

Analizar el efecto que tendrá la mezcla de agua del embalse de Bucaramanga y el río Surata en el proceso de potabilización en la planta de Bosconia.

#### **Objetivos Específicos**

- Evaluar el comportamiento de la coagulación para las mezclas probables más representativas.
- Analizar la variabilidad de la calidad del agua entre las mezclas realizadas entre el embalse de Bucaramanga y el río Surata.
- Evaluar la aglomeración de las partículas en el proceso de floculación para cada una de las mezclas probables.

## **CAPITULO 3.**

### **MARCO TEORICO**

#### **Importancia del agua potable.**

El agua es un recurso vital e indispensable para la vida humana y demás seres vivos, es considerado el solvente universal y está en contacto en un alto grado con las actividades antropogénicas que realizamos hoy, así mismo según la Organización de las Naciones Unidas (ONU), conlleva a una mejor justicia social y ambiental, garantizando una mejor calidad de vida, dignidad humana y mejores condiciones sanitarias (ONU, 2016).

Agua potable es toda aquella que, por cumplir distintas características o parámetros físicos, químicos, microbiológicos y radioactivos, es apta para el consumo humano. Por otra parte, es utilizada en bebida directa, en la preparación de alimentos, consumo de alimentos: lavado, uso doméstico: duchas, lavado de dientes, de manos, de platos y de ropa, para el servicio sanitario, actividades exteriores: riego de cultivo, lavado de carro, piscinas, entre otras tareas.

La escasez de agua está dada por el espacio que se encuentra entre el suministro de agua disponible y la demanda de un área fijada, bajo las determinaciones institucionales como la coordinación del precio que tendrá el consumo del recurso, y las condiciones de infraestructura existentes. Escasez de agua es igual al gasto mayor de suministro disponible por su alta demanda. La escasez se empieza a hacer notoria por la inconformidad de los usuarios, se hace visible la competencia por el recurso, sobreexplotación de agua subterránea y flujos insuficientes al entorno natural (FAO, 2013).

La falta de abastecimiento de agua define la limitación de acceso a agua de calidad, mostrando los bajos niveles de suministro para un lugar específico, con respecto a los niveles de demanda elaborados y diseñados, como resultado de recursos hídricos insuficientes, inexistencia de infraestructuras o un inadecuado mantenimiento de estas. Por otra parte, el

concepto de estrés hídrico son los síntomas que se muestran cuando hay escasez o carencia del recurso hídrico, por ejemplo, conflictos entre usuarios, mala calidad y fiabilidad del servicio. (FAO, 2013).

### **Embalses**

Un embalse se define como un ecosistema que por las distintas características artificiales, naturales, dimensiones: (área, profundidad máxima, profundidad media, volumen), riberas, formas de terreno que lo rodea y las aguas de drenaje que se introducen en él pueden ser catalogados y clasificados entre los diferentes tipos de cuerpos hídricos existentes. La unidad ecológica está relacionada directamente con la cuenca colectora u hoya tributaria debido a que la cantidad de agua que capta un embalse está determinada por la abundancia de precipitación que cae en su hoya tributaria por naturaleza. (MARTINEZ, 2000).

El agua que reposa en el embalse forma parte del ciclo hidrológico, es decir que existen casos en los que, sin intervención humana, pueden ser objeto de afectación causado por fenómenos naturales como lluvia, vientos, granizo, entre otros. De igual manera, estas aguas pueden verse afectadas por actividades antropogénicas dentro del territorio de la hoya tributaria.

Las aguas que se encuentran en un embalse pueden presentar tres tipos de fuentes de impacto para su deterioro biológico, físico y químico las cuales dificultara su proceso de tratamiento, debido a que se puede dar la presencia de micro-organismos vivos, partículas en suspensión, o presencia de contaminantes químicos tóxicos para los organismos vivos.

### **Generalidades de la Potabilización de agua.**

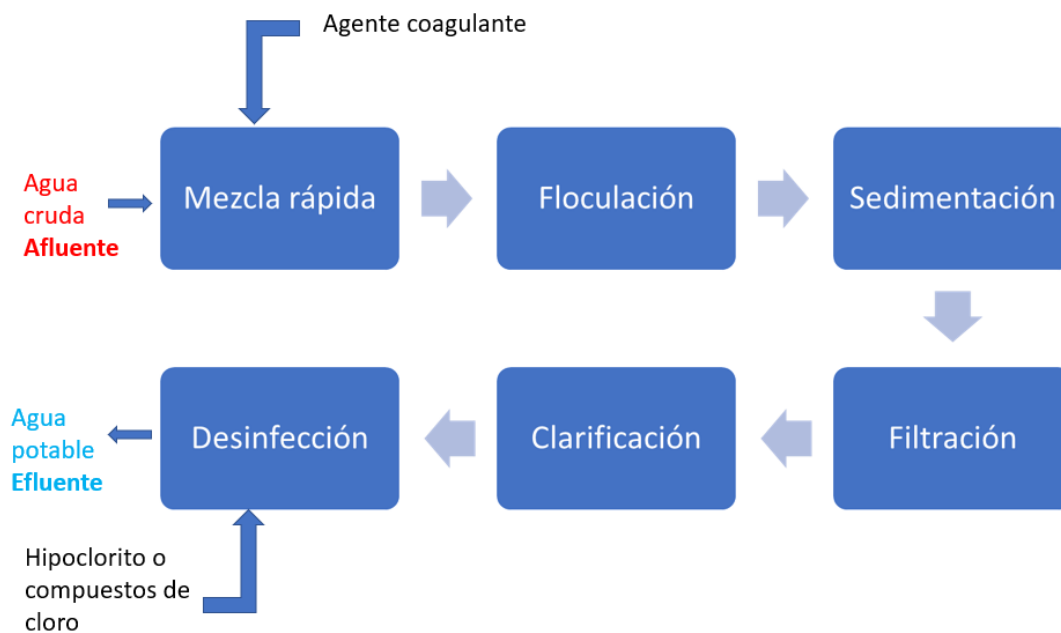
El tratamiento de una fuente hídrica es determinado por los escenarios de operación que se realizan al agua cruda, de esta manera modificar sus características físicas, químicas y microbiológicas con el fin de hacerla potable para el apto consumo humano, según la normatividad vigente colombiana de calidad del agua potable establecidas en el “Decreto 1575 del 2007 (Por el cual se establece el Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano) y la 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”. (MAVDT, 2007)

El tratamiento de agua potable convencional se define en las siguientes etapas:

- Coagulación
- Floculación
- Sedimentación
- Filtración
- Clarificación
- Desinfección

**Figura 1** Proceso tratamiento de agua potable



**Fuente:** Tomada de ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. Purificación del agua. Ed. Escuela Colombiana de Ingeniería. Bogotá, 2000

La figura 1 muestra el proceso convencional de sistema de tratamiento de agua cruda, a continuación, se definen los métodos y procesos para el tratamiento del Agua según la ley 475/985:

**Pre-cloración** está determinada como una fase de acondicionamiento para la eficiencia de sus etapas posteriores; Consiste en añadir el agente generador de formas activas de cloro a la entrada de agua cruda. (Myron, 2005)

**Coagulación:** Esta fase se determina por la adición de un agente coagulante, el cual desestabiliza las partículas, neutralizando las cargas eléctricas de sus coloides y así contribuir en la formación de flóculos de mayor tamaño. Es importante tener en cuenta que las condiciones de pH y alcalinidad del agua cruda influyen directamente en la eficiencia de la coagulación (Isabel, 2012).

**Floculación:** Es la fase por la cual se da la aglomeración de partículas inducida por una agitación lenta después de la desestabilización de estas. Siendo un proceso químico el cual consiste en la adición de floculantes, donde las partículas coloidales aglutinadas presentes en el agua cruda se decantan para su posterior filtrado. Es un paso del proceso de potabilización de aguas de origen superficial (Vargas, 2015).

**Sedimentación:** Este proceso consiste en el descenso de las partículas aglutinadas de mayor tamaño en el fondo de la superficie dada por el reposo de agua por un tiempo determinado. El principal objetivo de la sedimentación es remover mediante la fuerza gravitacional, las partículas en suspensión que se encuentran en el agua. (Perez J. , 1981)

**Filtración:** Proceso en el cual se da la remoción las partículas suspendidas del agua al hacerlas pasar a través de un medio poroso normalmente se usa grava o arena en el cual actúan una serie de mecanismos que remueven dependiendo de las características de la suspensión de partículas. Para la eficiencia de retención de partículas se han usado a lo largo de los años grava, antracita, granate, magnetita y carbón activado como casa cara de coco quemada, molida o el pelaje del fruto, así mismo se utilizan otro tipo de cascara de residuos agrícolas (Rojas, 2002).

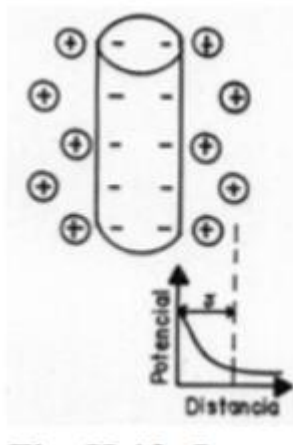


**Desinfección:** Operación por la cual se elimina cualquier flora bacteriana o patógenos presentes en el agua, así mismo es el proceso por el cual se elimina cualquier Unidad Formadora de Colonia-UFC-. La dosificación depende de las características del diseño del sistema de tratamiento, por lo general el resultado del cloro residual es de 1,1 a 0,2 ppm (Perez C. J., 1978)

### **Mezcla rápida.**

Se conoce por las condiciones de agitación y tiempo de retención de debe reunir la masa de agua en el momento que se dosifica el agente coagulante. Existen diferentes modelos de coagulación, entre ellos se encuentra la mezcla rápida para coagulación de barrido (ROMERO, 1999)

**Figura 2** Mecanismos de Adsorción-Neutralización



**Fuente:** Teoría de la coagulación, Arboleda, 1992

Los mecanismos de adsorción-neutralización muestran la formación de una capa adherida y una capa difusa la cual se da alrededor de un coloide como se evidencia en la figura 2 demostrando las teorías de Helmholtz y las de Gouy, La capa adherida se llama capa de Stern; debido a que se transporta con la partícula puede ser considerado como parte de la carga del coloide. Debe notarse que el espesor del doble lecho en comparación con su diámetro es muy pequeño (Cardenas Y. , 2000).

“Las fuerzas electrostáticas existentes en las partículas rodean a éstas de una doble capa eléctrica que interacciona con la fase acuosa.” (Arboleda, 1992).

### **Potencial zeta**

El potencial zeta es la energía que se necesita para atraer una carga unitaria desde el infinito hasta el “plano de cizalla” (Jhonson y Alexander, 1971). Stern, definió el potencial Z como el existente al comienzo de la parte difusa, es decir, que  $f=Z$  se relaciona con la carga de la partícula y su distancia a través de la cual la carga es efectiva. Por otro lado, el potencial z se asimila a la doble capa a un condensador de dos cargas iguales y opuestas, separadas por el espesor. Es decir, en caso de que las cargas sean iguales a q, el potencial del condensador es la potencial zeta. Según la electrostática el potencial varío la constante dieléctrica Dc y viene expresado de la siguiente manera (E Reyes, 2016):

$$Z = 4\pi q \frac{\delta}{Dc}$$

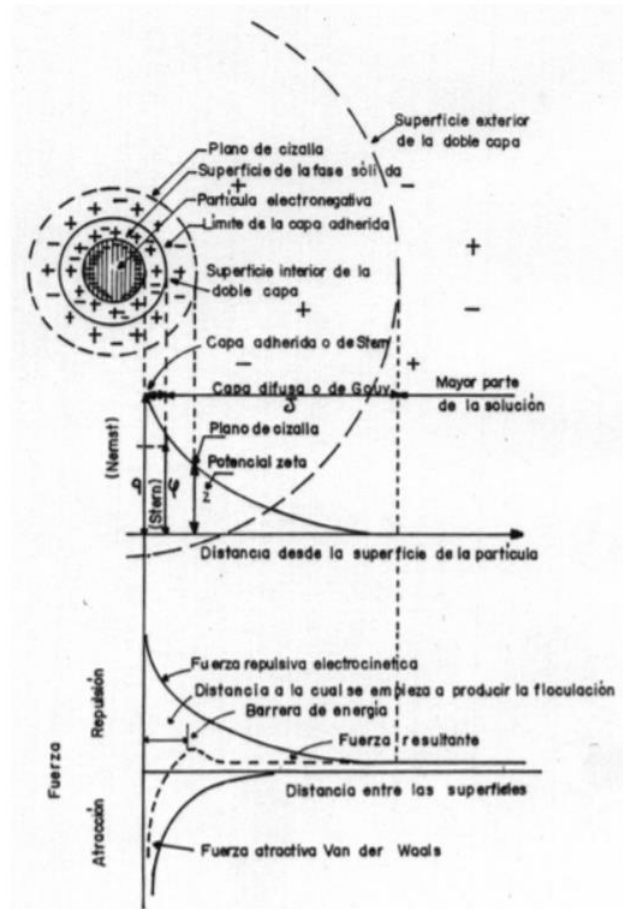
Donde

$$q\delta = \frac{ZDc}{4\pi}$$

El producto de qd, es la distancia por la cual se considera efectiva, es el momento eléctrico del coloide y se ha determinado partiendo de la constante dieléctrica.

El potencial zeta también está definido “como el entrono entre el solvente adherido a la partícula en su movimiento y el solvente que puede moverse con respecto a la partícula; es la medida en milivoltios, del potencial eléctrico entre la capa fija y la capa exterior de contraiones que rodean al coloide” (ROMERO, 1999)

**Figura 3** Potencial eléctrico entre capa fija y capa exterior



**Fuente:** Teoría de la coagulación, Arboleda, 1992.

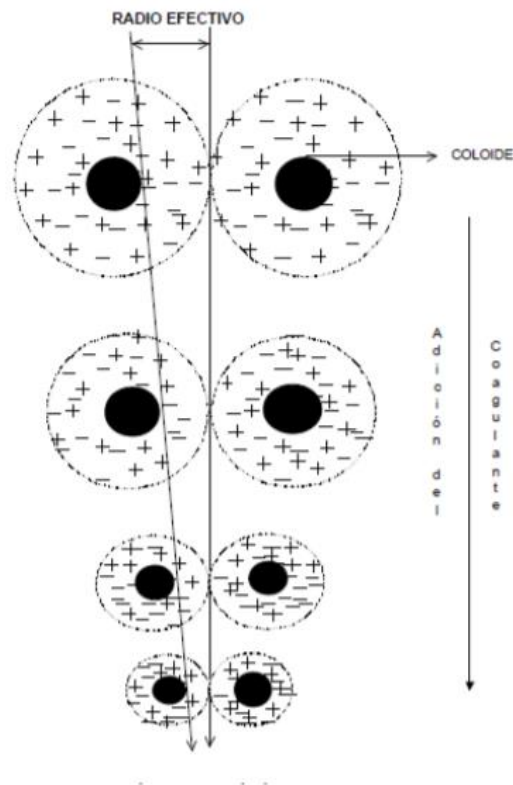
### Fases de la coagulación.

Es importante tener en cuenta el comportamiento físico de las partículas o coloides presentes en el agua cruda, dichas partículas cuentan con dos propiedades asociadas con el movimiento browniano y área superficial. Las propiedades anteriormente descritas permiten desafiar la ley de la gravedad y, por tanto, limitan su remoción por acción simple o atenuación natural. Sus características demuestran la afinidad con una inmensa área superficial, los coloides adsorben iones desiguales, dando paso a la formación de una carga eléctrica que impacta a la estabilidad o neutralidad de estos. Se puede definir entonces la

coagulación como “Una medida de la cantidad de partículas que se adhieren, durante la etapa, en un periodo de tiempo determinado” (ROMERO, 1999)

En la figura 4, se muestra como la adición de coagulante anula las cargas eléctricas de las superficies de dos coloides para aglomerarse. (Cardenas A. , 2000)

**Figura 4** Anulación de cargas por el coagulante



**Fuente:** Teoría de la coagulación, Arboleda,1992.

Esta etapa se puede dividir en cinco fases que actúan simultáneamente y que explican reacciones físicas y químicas. En la **primera fase** ocurre la hidrólisis de los diferentes tipos de coagulantes y la desestabilización de las partículas en suspensión, luego en la **segunda fase** se destaca la precipitación y la formación de compuestos químicos polimerizados, posteriormente en la **tercera fase** se realiza la adsorción de las cadenas poliméricas en la superficie de las partículas coloidales, y la siguiente **cuarta fase** es la adsorción mutua entre

los coloides; la última reacción que ocurre es la acción de barrido que se determina en la quinta fase.

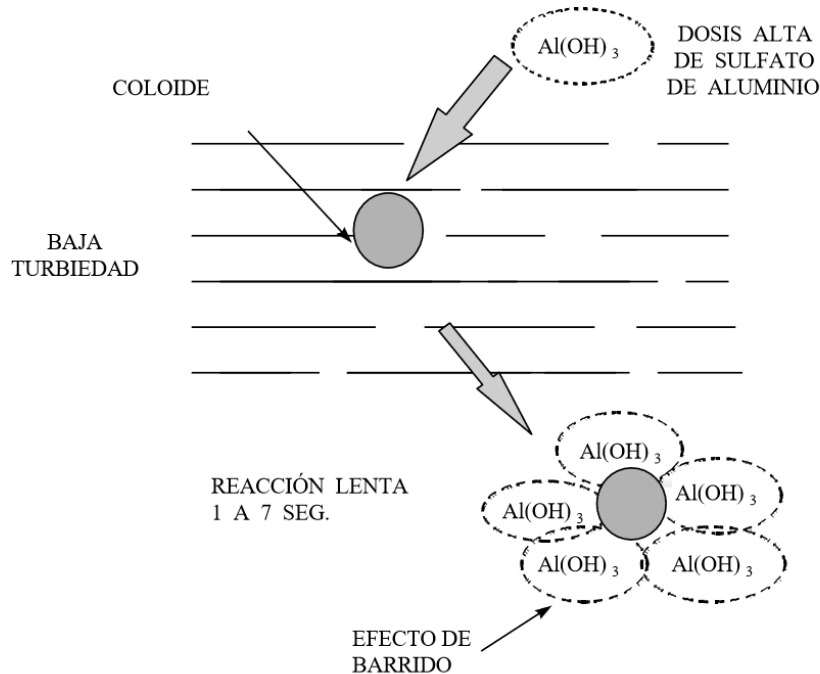
### Mecanismos de desestabilización de partículas coloidales o de coagulación.

#### Coagulación por incorporación o de barrido

En la coagulación por barrido al agregar una alta concentración de un agente coagulante se produce una interacción entre los coloides y la formación de precipitado de hidróxido de hierro, que se excede el límite de solubilidad de ese compuesto. Los hidróxidos al precipitarse forman una masa llamada floc la cual ocurre por la reacción de la alcalinidad y el agua con los coagulantes, el floc atrapa en su caída los coloides y partículas suspendidas las cuales se ven forzadas a descender. Este tipo de remoción de turbiedad, es la más usada en el proceso, presentandose cuando el agua tiene pocos sedimentos y posee baja turbidez, por lo tanto, la cantidad de partículas coloidales es pequeña (B Bolto, 2007).

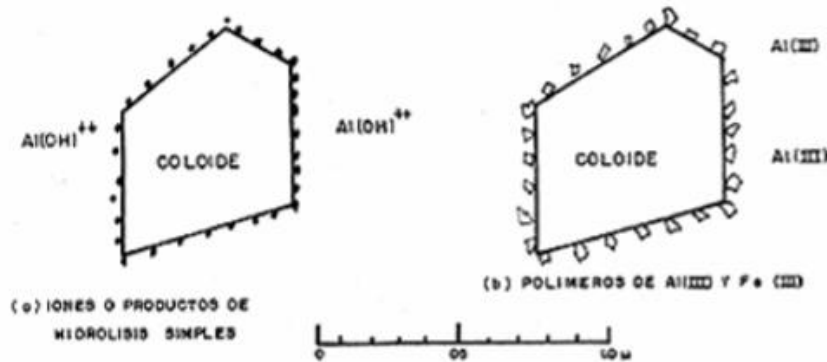
Las partículas son aglomeradas usando una sobresaturación de sulfato de aluminio u otro producto de coagulación.

**Figura 5** Aglomeración de partículas



## Compresión a doble capa

Figura 6 Adsorción de contraiones en la partícula coloidal



Fuente: Sawyer, 2001

La adición de contraiones a los coloides produce una capa difusa la cual permite disminuir la fuerza de repulsión y el potencial Z, la etapa de coagulación da inicio cuando las partículas se encuentran separadas a una distancia específica conocida como "L". La adición de una sal, no cambia el potencial del coloide, pero si permite alterar la forma de la curva de las fuerzas, disminuyendo la distancia hasta la cual son efectivas. La reducción del espesor de la doble capa es importante, sin embargo, es más importante que la reducción del potencial zeta hasta el punto isoeléctrico ( $Z = 0$ )

La coagulación puede producirse por diferentes situaciones como cuando el potencial z se hace cero, cuando el exceso de coagulante impide producir una estabilización, puesto que no podría adsorber más contraiones de los que su carga primaria lo permite. Y también se sucede, cuando entre mayor sea la carga del contraión más disminuirá la carga del coloide de acuerdo con la ley de Schulze Hardy que dice: "La precipitación de un coloide es efectuada por aquel ion del electrolito añadido, que tenga una carga opuesta en signo a la de las partículas coloidales y el efecto de dicho ion se incrementa tanto más cuanto mayor sea el número de cargas que posea (Sawyer, 2001)

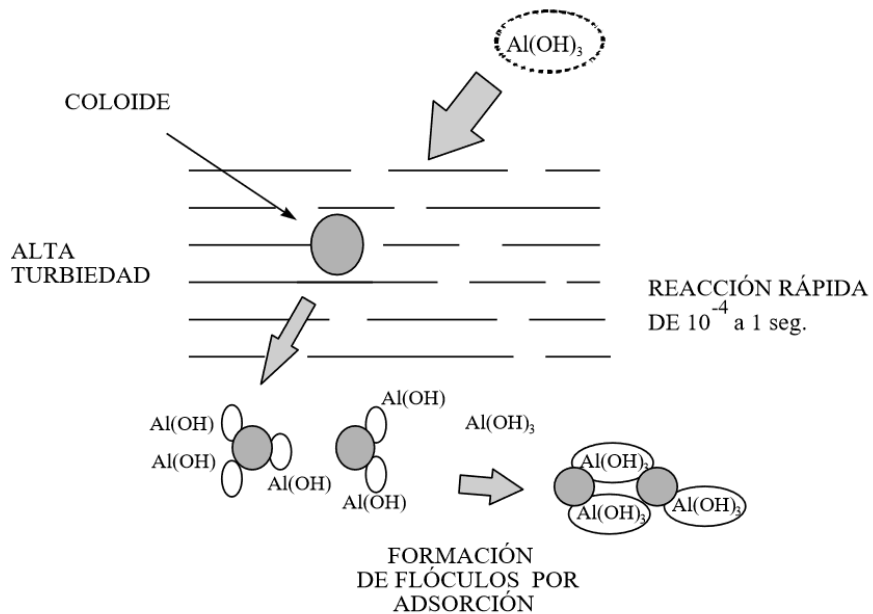
### Absorción y Neutralización de cargas

Los coloides que presentan una carga negativa atraen a los iones de carga positiva que se encuentran dentro del coagulante los cuales forman una capa adherente al coloide. Cuando se agregan sales de aluminio o sales de hierro al agua, se forma una serie de especies solubles hidrolizadas. En el caso del sulfato de aluminio o alumbre, las especies hidrolizadas que se forman son  $Al^{3+}$ ,  $Al(OH)^{2+}$ ,  $Al_8(OH)_{20}^{4+}$  y  $Al(OH)_4$ , las cuales son tomadas para representar todo el sistema. Estas especies se adhieren o forman complejos superficiales con los coloides, y lo desestabilizan, lo que permite la formación de flocs (ROMERO, 1999).

### Adsorción y Puente

En estas varias especies negativas de hierro y aluminio pueden desestabilizar los coloides usando adsorción, a partir de la primera fase, se forma un puente entre coloides que permite la adhesión de estos en presencia de altas cantidades de polímero (B Bolto, 2007).

Figura 7 Puentes entre coloides



## **Tipos de Coagulantes usados en el proceso de potabilización de agua.**

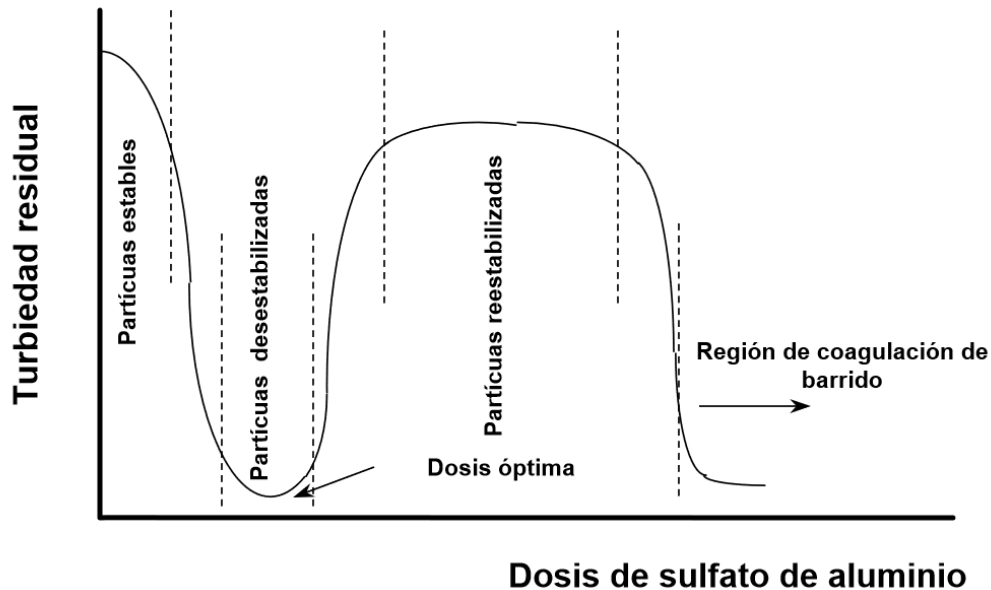
### **Sulfato de Aluminio [Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>]**

El sulfato de Aluminio, también recibe el nombre de alumbre, cuenta con una disponibilidad de fácil acceso para su compra; contando con un costo relativo; esta sustancia puede causar irritación, además de lastimar las mucosas, puede causar hemorragias si se pone en contacto sin los elementos de protección personal, es usado con mayor frecuencia en las PTAP que manejan un proceso convencional, su manejo es relativamente sencillo, encontrándose en una presentación líquida o sólido, a diferentes concentraciones de alúmina. Su propiedad como catión metálico está asociada con el agua en solución, actuando como ácidos y con las bases de esta, ocurriendo un aumento en el consumo y una disminución en el pH al actuar también con las bases que constituyen la alcalinidad. Existe la teoría de ácidos-bases de Bronsted-Lowry, que explica “las reacciones de los iones de aluminio y hierro con el agua; son de gran utilidad en la desestabilización.” (Derivados, 2016).

En la gráfica 1 se observa el efecto al aplicar la dosificación de sulfato de aluminio en la turbiedad de agua residual, es decir, el comportamiento de las partículas coloidales desde la etapa de estabilización hasta la coagulación, demostrando la variabilidad y la neutralización de los coloides para formar el floc deseado.



**Grafica 1** Efectos de la dosificación en la turbiedad



**Fuente:** Grafica efecto de la dosificación efecto de la dosificación de sulfato de aluminio en n de sulfato de aluminio en la turbiedad residual del agua,2002.

### **Hidroxicloruro de aluminio [PAC]**

Se considera un coagulante alternativo; es inorgánico polimerizado, se comporta químicamente totalmente diferente a los coagulantes convencionales. Cuentan con varias fases solidas al entrar en contacto con el agua, los flóculos obtenidos por los agentes coagulantes PAC's se denominan la mayor parte del tiempo en grupos de pequeñas esferas y/o cadenas de un tamaño menor a 25 mm, mientras que los flóculos de sulfato de aluminio en su mayoría pueden ser estructuras esponjosas y porosas con tamaños que oscilan entre 25 a 100 mm (VAN BENSCHOTEN, 1990). Dicha diferencia estructural produce en los PAC's mejor eficiencia y una menor turbiedad en suspensión que el alumbre (WANG, 2009)

Los agentes coagulantes PAC's contienen distintas especies de Al(III) de calidad superior y poseen una estructura estable ante hidrólisis posteriores, lo cual logra aumentar a su eficiencia de coagulación (BOCHKAREV, 2003); su eficiencia está ligada a la variación de

parámetros como las condiciones iniciales del agua cruda y las condiciones de operación específicas (ZOUBOULIS,2008).

En la tabla 1, se muestra el ejemplo del resultado en el estudio de prueba de jarras aplicando dos diferentes agentes coagulantes, en este caso con hidroxiclорuro de aluminio y soda caustica, donde se tuvo en cuenta el resultado de las diferentes variables en este caso hubo una diferencia de al menos 1.2% en la variabilidad de pH, así mismo se demostró la eficiencia de remoción al añadir hidroxiclорuro con un 73.5% frente a un 59.5% de la eficiencia de remoción dado por el sulfato de aluminio.

**Tabla 1** Resultados pruebas de jarras

VARIABLE	TIPO DE PROCESO	
	SULFATO DE ALUMINIO TIPO B Y CAL (45PPM)	HIDROXICLORURO Y SODA CAUSTICA (1%)
VARIACION pH	2.4	0.6
REMOCIÓN TURBIEDAD	59.5	73.5
VARIACION ALCALINIDAD TOTAL	13.7	2.2
VARIACION DUREZA TOTAL	18.8	1.8
VARIACIÓN ALUMINIO RESIDUAL	8.3	-33.3

**Fuente:** Ejemplo de resultados de pruebas de jarras con hidroxiclорuro de aluminio y soda cáustica. **Fuente:** Cogollo y Rhenals, 2003.

### **Floculación.**

Este proceso, está denominado como una lenta agitación en el agua, que permite el crecimiento del flóculo. Es el proceso donde las partículas se encuentran desestabilizadas y las pequeñas partículas en suspensión son capturadas por el hidróxido metálico, formando un flóculo, facilitando la remoción de algunas partículas dispuestas en el agua por medio de los procesos de sedimentación y filtración. El crecimiento se produce por el contacto de las partículas con un tamaño mayor de una micra, el contacto de partículas se crea por el gradiente de velocidad masa líquida. Dentro de esta fase se cuenta con importantes objetivos

distintos que buscan reunir los micro flóculos que produzcan partículas mayores con peso específico superior al agua y puedan compactar el flóculo, el cual logra disminuir el grado de hidratación y puede producir una baja concentración de volumen, que permita una alta eficiencia en la siguiente fase de sedimentación – filtración (Arboleda, 1992). En la floculación se deben distinguir dos tipos; Floculación orto cinética que se realiza por medio de energía suministrada por fuerzas externas hacia el agua como por ejemplo las paletas giratorias o hélices, o estructuras hidráulicas, produciendo energía cinética en las partículas a diferentes velocidades y direcciones, lo cual aumenta la posibilidad de colisión. Floculación peri-cinética es inducida dentro del líquido debido al movimiento Browniano y a que los coloides al precipitarse pueden aglomerarse (Perez J. , 1981). La etapa de sedimentación comienza al tiempo que opera la desestabilización de las partículas. Este proceso es lento, por tanto, no es viable para el tratamiento de agua (Arboleda, 1992).

Se pueden clasificar los floculadores de accionamiento mecánicos o hidráulico de acuerdo con el tipo de energía que se suministre para agitar la masa de agua. Se puede lograr una clasificación más amplia si se tiene en cuenta el modo como se realiza la aglomeración de las partículas coloidales.

Los floculadores son, por ejemplo, pantallas helicoidales, medios porosos, tuberías y floculadores de potencia o de disipación de energía como Paletas y Turbinas.

Los autores Villegas y Letterman, lograron relacionar el tiempo de floculación (T) y el gradiente de velocidad (G) con la dosis de coagulante. La figura 6-3 muestra los resultados experimentales con valores de gradiente de velocidad de 500, 200, 100 y 25 s<sup>-1</sup>. La turbiedad disminuye a través del tiempo de floculación, hasta llegar a un mínimo después del cual comienza a aumentar. De acuerdo con los datos obtenidos en las curvas de la figura, para cada turbiedad residual ( $n^*$ ) debe existir un valor correspondiente de gradiente óptimo de velocidad (Vargas, 2015)

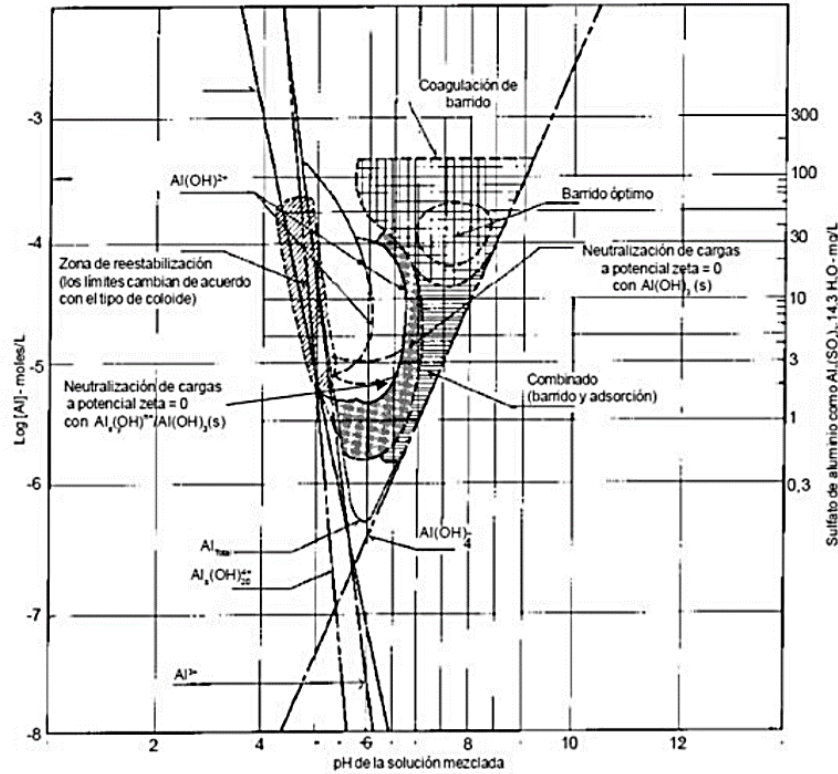
### **Diagramas de coagulación**

Los diagramas de coagulación son usados comúnmente para analizar la dosis de coagulante de un tipo de coagulante dado y la concentración de partículas (MERTEL, 2010). Las

herramientas mayormente usadas para este propósito son los diagramas de coagulación en los que se indica las condiciones de dosis químicas y pH en que ocurre una remoción efectiva. Los diagramas de coagulación son usados para predecir la remoción de turbiedad y color, y presenta los mecanismos de coagulación establecidos por zonas; estos diagramas son útiles, además, para el diseño y operación de plantas de tratamiento, por lo tanto, es importante que el ingeniero y el operador de las plantas los conozcan para facilitar la toma de decisiones en cuanto a la elección de tipo y dosis de coagulante (MERTEL, 2010).

Los diagramas de coagulación pueden determinar el comportamiento de coagulación de la turbiedad para un tipo de agua, con sulfato de aluminio como  $Al_2(SO_4)_3$ , en el cual, se identifican 4 zonas de desestabilización en la figura 8. La primera zona de desestabilización es por el mecanismo de neutralización de carga a potencial  $\zeta$  igual a 0 con  $Al(OH)_n^+/Al(OH)_3(s)$ , la cual ocurre a un pH cercano a 6.5 y a una dosis de sulfato de aluminio cercano a 2.3 mg/L. La segunda zona de desestabilización es por el mecanismo barrido; la cual ocurre en un rango de pH de 5.8 y 9.3 y a un rango de dosis de sulfato de aluminio de 11.5 a 140 mg/L. Dentro de esta zona se observa una pequeña zona en donde ocurre la coagulación óptima por atrapamiento que comprende los rangos de pH de 7 a 8.4, y de dosis de coagulante de 17 a 60 mg/L. La tercera zona de desestabilización es por el mecanismo de neutralización de cargas a potencial zeta igual a 0 con  $Al(OH)_3(s)$ ; la cual ocurre en un rango de dosis variable en función del pH. Los rangos de pH van desde 5.4 a 7.2, y el rango de dosis de sulfato de aluminio es desde 0.4 a 35 mg/L. La cuarta zona de desestabilización es por un mecanismo combinado: barrido y adsorción, el cual ocurre en un rango de pH de 6.4 a 8.5, y un rango de dosis de sulfato de aluminio de 0.5 a 30 mg/L (MERTEL, 2010).

**Figura 8** Zonas de desestabilización



**Fuente:** Diagramas de coagulación con sulfato de aluminio para remoción de turbiedad. Tomado de (Barrenechea Martel).

### Algunos estudios

Un artículo publicado en el año 2016 por la Universidad Distrital Francisco José de Caldas evaluó la calidad del agua en la planta potabilizadora El Dorado, demostrando el tratamiento o el sistema de tratamiento de agua del embalse La Regadera. La planta tiene una capacidad máxima de tratamiento de 1,6 m<sup>3</sup> /s y se realizan procesos de aireación, coagulación, floculación, sedimentación, filtración, desinfección y estabilización de pH, es decir, corresponde a un sistema convencional de potabilización de agua. La calidad del agua es determinada a partir de una serie de parámetros físicos, químicos y microbiológicos respecto a directrices, normas o estándares de calidad del agua basados en niveles de toxicidad científicamente aceptables (ONU-DAES, 2014), permitiendo así caracterizarla como apta o

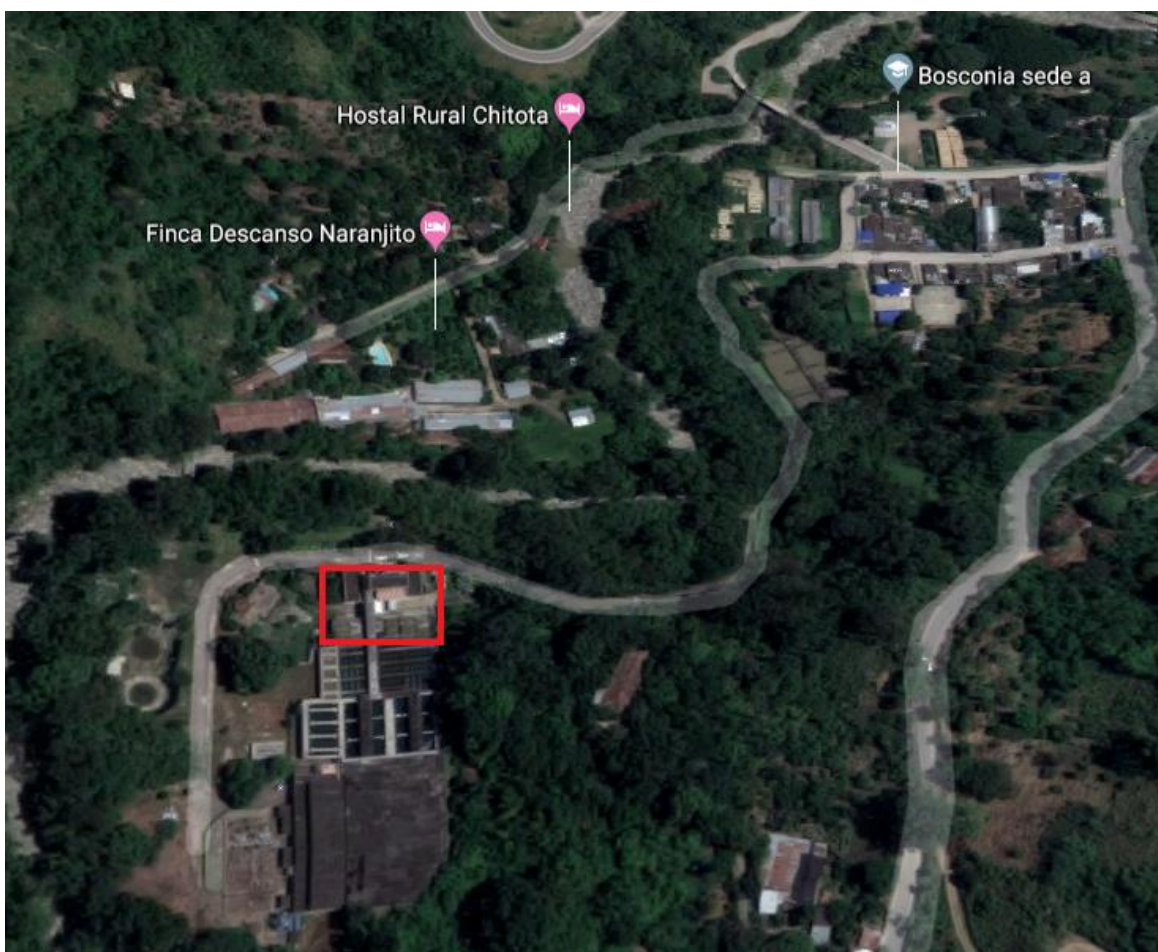
no para el consumo humano. Generalmente, se cuantifican mediante pruebas estandarizadas las propiedades y componentes presentes en el agua para establecer condición o determinar propiedades de interés para el tratamiento, conducción o almacenamiento. El estudio evidenció los parámetros fisicoquímicos posterior al tratamiento convencional realizado en la PTAP presentó una elevada variabilidad en las concentraciones registradas, teniendo en cuenta los valores medios y desviaciones estándar, es decir que las condiciones no se mantuvieron constantes, influenciado directamente por las características del agua captada, los procesos de potabilización usados y la dosificación de reactivos. Los resultados obtenidos permitieron evidenciar que el agua suministrada fue apta para el consumo humano y no representó ningún riesgo para la salud humana; reflejando un eficiente tratamiento de potabilización. (LOPEZ, 2016 )

## CAPITULO 4.

### METODOLOGIA

La investigación se llevó a cabo en la planta Bosconia ubicada en Bucaramanga, Santander el área de Chitota, en el departamento de Santander, Colombia, como se muestra en la Figura 9. En las coordenadas 7°09'08.9"N 73°06'55.0"W.

**Figura 9** Zona topográfica planta Bosconia, Chitota, Bucaramanga, Santander



**Fuente:** (Google Mapas, 2019).

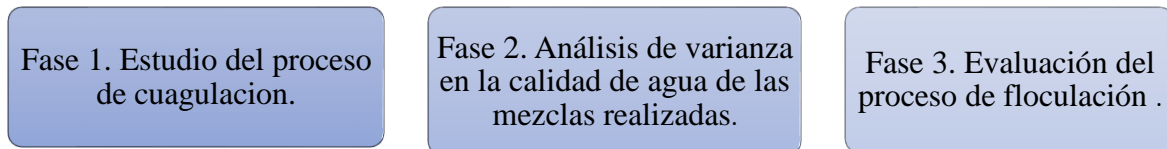
La planta de Bosconia está localizada al nororiente de la ciudad, entre las cotas topográficas 685 y 675 msnm, en la vía que conduce de Bucaramanga, al municipio de Matanza. La planta tiene “una capacidad de 1980 l/s, y es del tipo convencional con tanques

desarenadores, presedimentadores, mezcla rápida, floculación mecánica, sedimentación y filtración.” (amb, 2019).

El estudio se realizo en la PTAP de Bosconia, haciendo uso de dos tipos de cuagulante y variaciones de pH con NaOH y HCL. El proyecto conto de tres fases con el fin de cumplir los objetivos planteados, las cuales fueron:

- Fase I Estudio del proceso de coagulación
- Fase II Análisis de varianza en calidad de agua de las mezclas realizadas entre la planta de Bosconia y el embalse de Bucaramanga
- Fase III Evaluacion del proceso de floculación.

**Figura 10** Fases del estudio



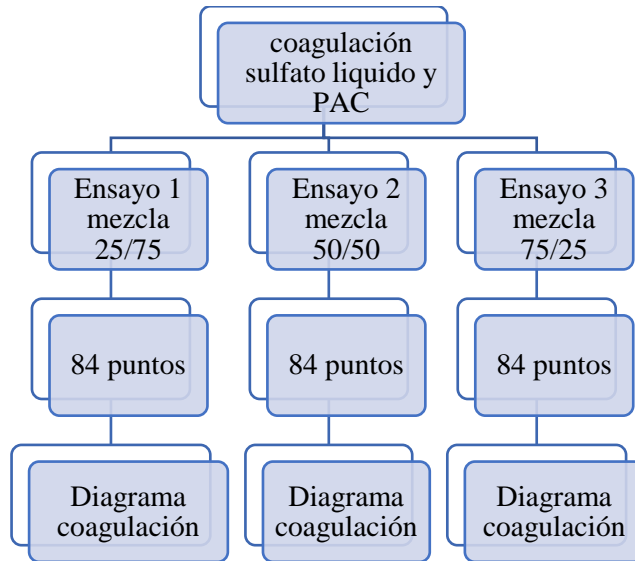
**Fuente:** Autores

### **FASE I Estudio el proceso de coagulación.**

La fase uno del estudio tuvo como finalidad realizar la evaluación del comportamiento de las mezclas de agua del embalse de Bucaramanga y el río Surata ante la presencia de dos tipos de agentes coagulantes PAC y Sulfato de Aluminio líquido, se realizaron cambios de pH y dosis del agente para la obtención de los datos necesarios para la construcción de los diagramas de coagulación.



**Figura 11** Proceso de evaluación de coagulación



**Fuente:** Autores

La **Figura 11** muestra un esquema desglosado de lo que se requirió para el desarrollo de esta fase el cual se realizó tres veces por cada mezcla y tipo de agente coagulante para la obtención final de 18 diagramas de coagulación.

### **Concentración de dosis de coagulante**

La dosis de coagulante se determinó mediante la Ecuación 1 para los dos tipos de agentes

$$\text{ECUACION 1 } (\rho_1 \times c_1 \times v_1 = \rho_2 \times c_2 \times v_2)$$

P<sub>1</sub>= Densidad del coagulante utilizado

C<sub>1</sub>= Concentración del coagulante

v<sub>1</sub>= Volumen de coagulante a suministrar

P<sub>2</sub>= Densidad del coagulante utilizado

C<sub>2</sub>= Concentración de la solución madre al 1%

V<sub>2</sub>= Volumen de la solución madre a preparar

**Tabla 1** concentraciones de coagulante

Tipo	Dosis de coagulante en mg/L											
PAC	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6
ALM	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

**Fuente:** Autores

En la **Tabla 1** se muestra las dosis utilizadas por cada tipo de coagulantes a las 12 respectivas jarras en cada prueba realizada con o sin variación de pH.

#### **Puntos de muestreo**

Se realizó la toma de muestra diaria, durante el tiempo de estudio establecido con una totalidad de 200 L/día calculando el respectivo porcentaje de 25, 50 o 75 así determinar la cantidad de agua requerida para la mezcla del embalse y río.

#### **Equipos de jarras**

Los ensayos se realizaron simulando las condiciones de operación; para una mezcla rápida de 1 minuto a 300 RPM, en la mezcla lenta de 15 minutos a 30 RPM, y para sedimentación se da un tiempo de 15 minutos en reposo a 0 RPM; se trabajaron con dos equipos para sacar 12 puntos por prueba haciendo 14 pruebas por día para la realización de dos diagramas de coagulación; esta fase tuvo una duración de nueve días.

El JAR TEST fue realizado con volumen de un 1 litro al 1% de concentración por coagulante; seguido de la modificación de pH, agregando ácido clorhídrico (HCl) e hidróxido de sodio (NaOH) para reducir o aumentar  $\pm 0,5$  unidades del pH inicial, el cual obtuvo un rango entre 5 a 8 unidades de pH tomando los resultados al finalizar la mezcla rápida obteniendo 12 datos de pH por prueba, terminando con la medición de turbidez al acabar el tiempo de sedimentación; de esta manera se registraran 84 datos para cada parámetro.

#### **Construcción de resultados**

Se usó un software para graficar cada diagrama de coagulación, realizándose con las dosis de cada coagulante establecidos en la tabla 1 y los resultados de pH y turbidez; haciendo

tres diagramas por cada mezcla, con los dos coagulantes estipulados, teniendo en cuenta como línea de tendencia la primera prueba la cual se realizó sin modificación de pH que se denota en color negro en cada diagrama.

Se realizaron tres tablas comparando los datos más relevantes que se obtuvieron por el uso de los coagulantes en cada una de las mezclas, evidenciando la cantidad de dosis en mg/L que necesita cada uno para obtener una remoción similar.

### **FASE II Análisis de varianza de la calidad de agua de las mezclas realizadas entre la planta de Bosconia y el embalse de Bucaramanga**

Esta fase evaluó la calidad de las mezclas hechas durante un periodo de cuatro semanas, cinco veces por semana haciendo dos mezclas por día, en las que se tomó sus parámetros fisicoquímicos con el fin de desarrollar un análisis de varianza para determinar la existencia de diferencias significativas de calidad entre las mezclas realizadas del embalse de Bucaramanga con el río Surata; constando de tres ítems para realizar este análisis como se observa en la figura mostrada a continuación.

**Figura 12** Ítems de registro de datos para el análisis de varianza



**Fuente:** Autores

Se eligió el método de varianza ANOVA debido a que este permite comparar si las medias de las tres mezclas con respecto a cada parámetro de calidad son iguales o presentan diferencias; planteando un test de hipótesis que consta de una hipótesis nula lo que indica si la variación de cada parámetro es igual entre sí, ósea si los valores tomados no tienen ninguna diferencia en su calidad entre las tres mezclas representándola a continuación  $H_0: M_1 = M_2 = M_3$  o si por el contrario se presenta una variación de calidad del parámetro entre las tres mezclas esta será la hipótesis alternativa; haciendo una comparación entre la variable del F teórico y la F calculada; el F teórico se eligió según la tabla de FISHER con un nivel de significancia  $\alpha = 0,05$  según sus grados de libertad (*gl*) para numerador y denominador hallados en totales Suma de cuadrados(SC) y medias. (Ferrero, 2019)

### Registro de los parámetros físicos iniciales

Al obtener la homogenización de ambos cuerpos de agua a tratar, se tomaron 500 ml de muestra para hacer la medición de los parámetros fisicoquímicos iniciales de las mezclas los cuales se usarán para el análisis; en la tabla 3 se muestran los parámetros escogidos.

**Tabla 2** Parámetros iniciales de las mezclas realizadas

Parámetros	Equipos	Frecuencia
PH	PH metro/ PB-04	5 veces/semana
Turbidez	Turbidímetro TL 2300	5 veces/semana
Color Aparente	Espectrofotómetro DR 2800	5 veces/semana
Conductividad	Conductímetro Cond 3151	5 veces/semana
Alcalinidad	876 Dosimat plus	5 veces/semana
Dureza	877 Dosimat plus	5 veces/semana

**Fuente:** Autores

La evaluación de los parámetros se realizó con los datos registrados inicialmente de las tres mezclas de agua entre el embalse de Bucaramanga y el río Surata, evidenciando los cambios significativos de calidad entre los parámetros de calidad.

### **Determinación de masas de agua de entrada**

Se determinó las posibles cantidades de agua de entrada a la planta por medio de la ecuación 2 según los porcentajes de cada mezcla y la capacidad total de operación de la planta Bosconia.

#### **ECUACION 2.**

$$x \text{ entrada agua del embalse} = \frac{\text{capacidad total planta (L/s)} \times \% \text{ mezcla a determinar}}{100\%} = \text{L/s}$$

### **FASE III: Evaluación del proceso de floculación.**

La fase tres del estudio tuvo la finalidad de evaluar la floculación, consiste en la agitación de la masa de agua coagulada para el crecimiento y aglomeración de los flóculos recién formados. La floculación es favorecida por el mezclado lento que permite juntar poco a poco las partículas de floc, formando partículas de mayor tamaño las cuales son más pesadas por lo tanto habrá una mejor remoción en el proceso de sedimentación.

Para este proceso se elige las dosis de mejor remoción para cada tipo de coagulante y mezcla para la obtención de 6 gráficas de floculación, en los cuales se hizo una variación del gradiente de velocidad y tiempo de agitación para permitir la presentación de las constantes de asociación y ruptura.

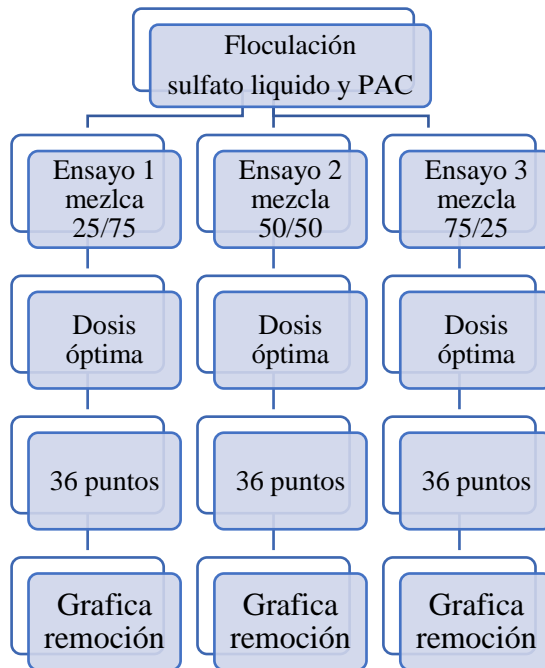
**Tabla 3** Gradientes y tiempos usados en floculación

RPM	10	20	30	40	50	60
TIEMPO (min)	1	5	15	25	35	45

**Fuentes:** Autores

En la tabla 3 se observan los tiempos y velocidades utilizados para la obtención de los datos para la elaboración de las gráficas de floculación.

**Figura 13** Proceso de evaluación de floculación



**Fuente:** Autores

## **CAPITULO 5.**

### **RESULTADOS Y DISCUSION**

#### **FASE I Estudio el proceso de coagulación.**

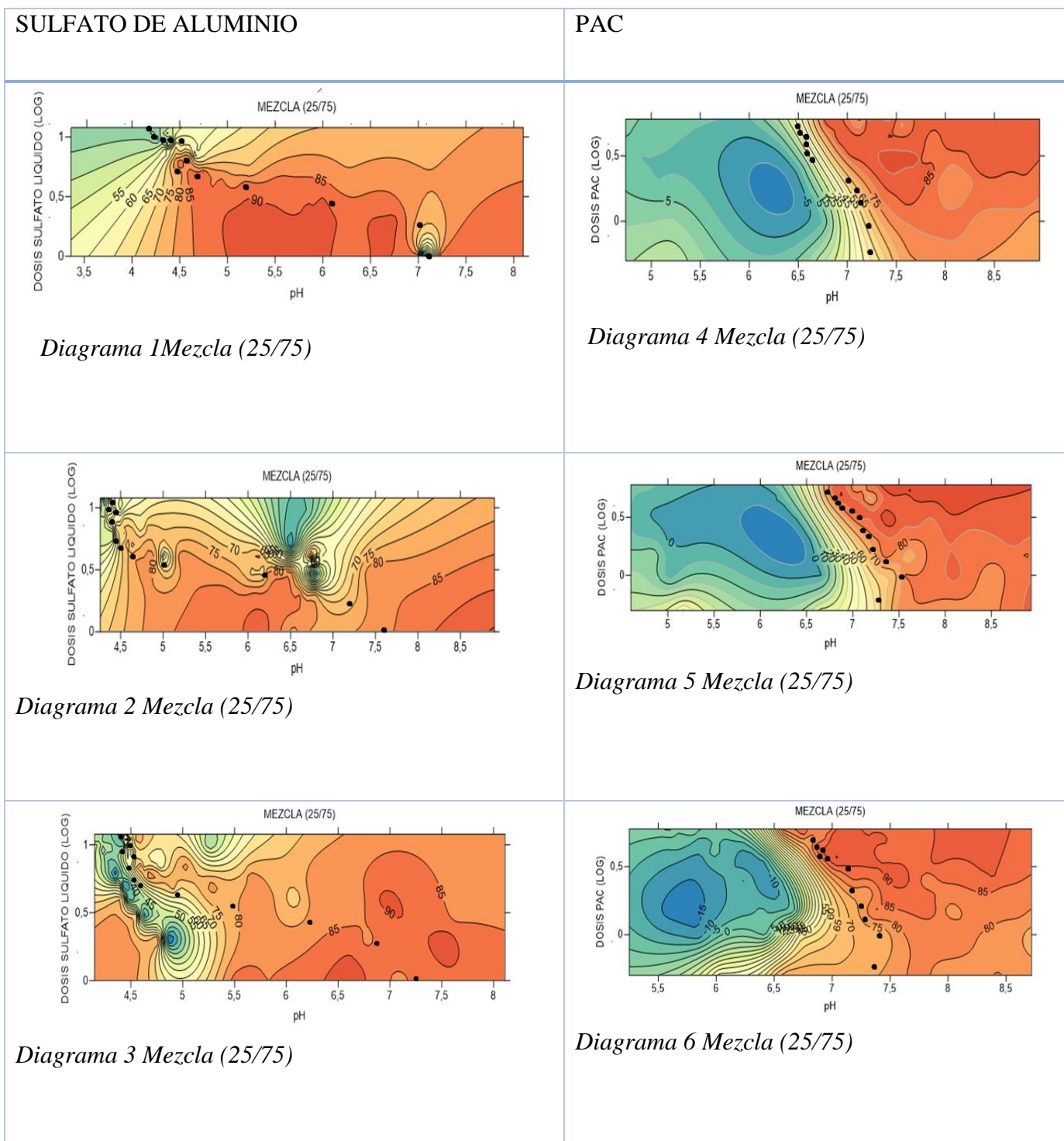
En esta fase se obtuvieron los diagramas de coagulación a cada mezcla (Embalse/Rio), efectuadas con dos tipos de agente coagulante comparándolos en tablas analizando su comportamiento; identificando los escenarios de mejor remoción o posible afectación en el proceso de tratamiento de la planta.

#### **Diagramas de ccoagulación de cada mezcla**

A continuación, se presentan los diagramas de coagulación, para la construcción de estos se tuvieron en cuenta los parámetros de pH, y logaritmo de las dosis de coagulante evidenciado en los parámetros iniciales ver anexo 3; para su análisis y mejor comprensión se realizó un compendio de los datos más significativos de remoción con respecto a su turbiedad inicial, mejor dosis presentados en la tabla 7.

#### **Diagramas de coagulación de la mezcla 1 embalse/rio (25/75)**

**Tabla 4** Diagramas de coagulación mezcla 1 (Autores)

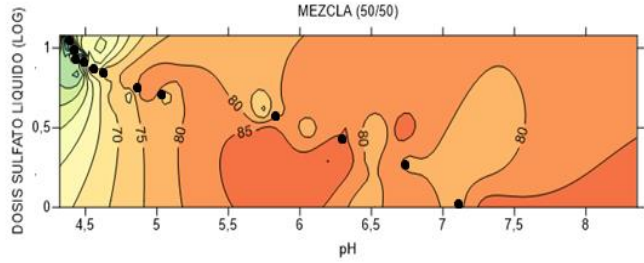
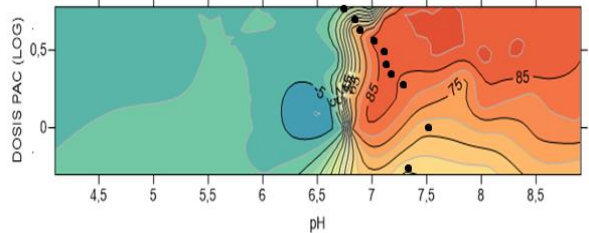
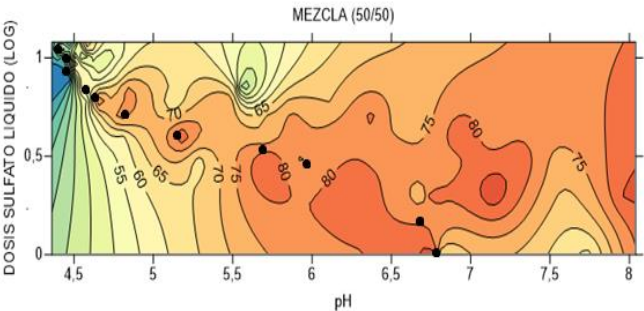
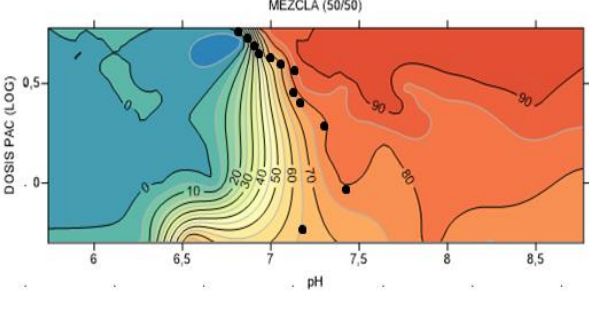
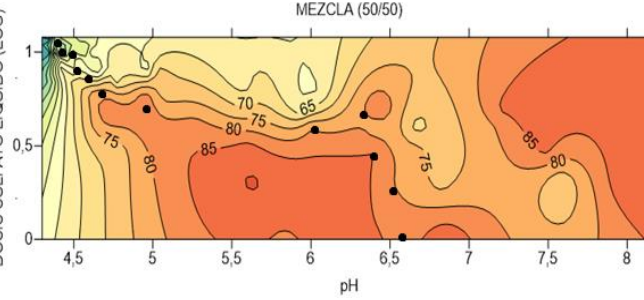
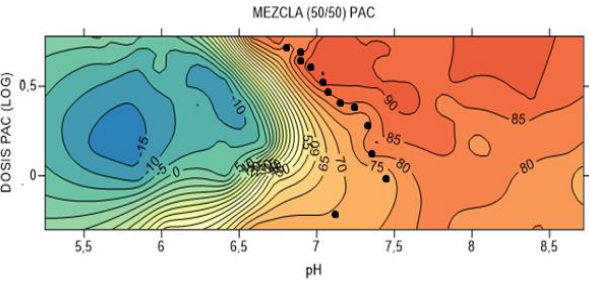


Fuente: Autores

**Diagramas de coagulación de la mezcla 2 embalse/rio (50/50)**



**Tabla 5** Diagramas de coagulación mezcla 2

SULFATO LIQUIDO	PAC
 <p>MEZCLA (50/50)</p> <p>DOSIS SULFATO LIQUIDO (LOG)</p> <p>pH</p> <p><i>Diagrama 7 Mezcla (50/50)</i></p>	 <p>MEZCLA (50/50)</p> <p>DOSIS PAC (LOG)</p> <p>pH</p> <p><i>Diagrama 10 Mezcla (50/50)</i></p>
 <p>MEZCLA (50/50)</p> <p>DOSIS SULFATO LIQUIDO (LOG)</p> <p>pH</p> <p><i>Diagrama 8 Mezcla (50/50)</i></p>	 <p>MEZCLA (50/50)</p> <p>DOSIS PAC (LOG)</p> <p>pH</p> <p><i>Diagrama 11 Mezcla (50/50)</i></p>
 <p>MEZCLA (50/50)</p> <p>DOSIS SULFATO LIQUIDO (LOG)</p> <p>pH</p> <p><i>Diagrama 9 Mezcla (50/50)</i></p>	 <p>MEZCLA (50/50) PAC</p> <p>DOSIS PAC (LOG)</p> <p>pH</p> <p><i>Diagrama 12 Mezcla (50/50)</i></p>

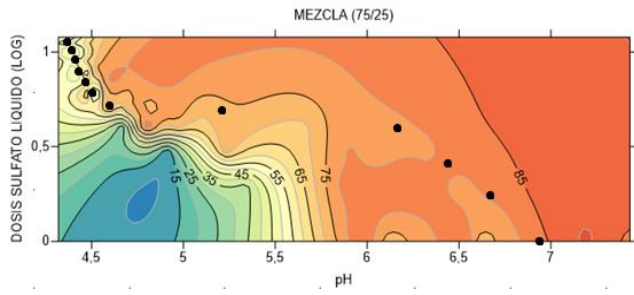
Fuente: Autores

**Diagramas de coagulación de la mezcla 3 embalse/rio (75/25)**

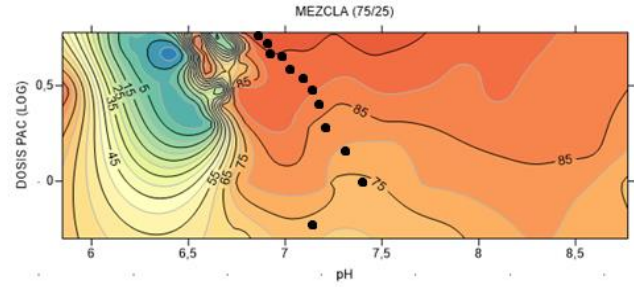
**Tabla 6** Diagramas de coagulación mezcla 3

**SULFATO LIQUIDO**

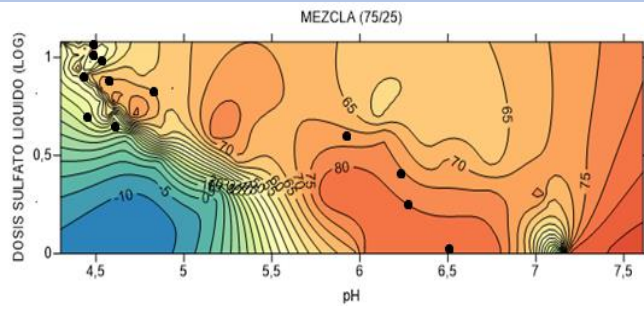
**PAC**



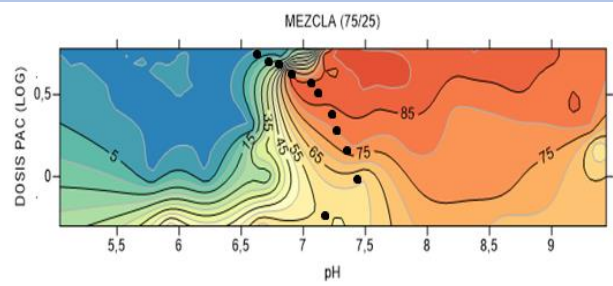
*Diagrama 13 Mezcla (75/25)*



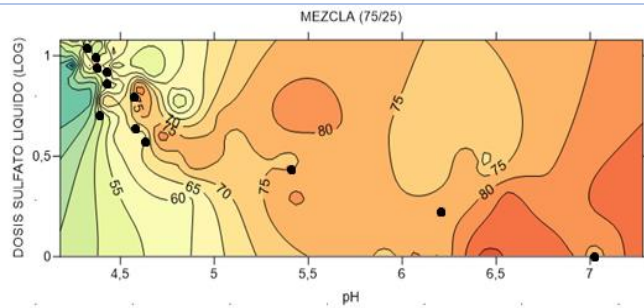
*Diagrama 16 Mezcla (75/25)*



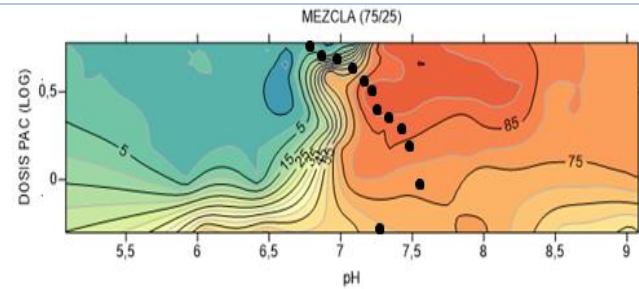
*Diagrama 14 Mezcla (75/25)*



*Diagrama 17 Mezcla (75/25)*



*Diagrama 15 Mezcla (75/25)*



*Diagrama 18 Mezcla (75/25)*

**Fuente:** Autores

En la siguiente tabla se muestran los datos más relevantes para comprender los diagramas mostrados anteriormente.

**Tabla 7** Datos significativos diagramas de coagulación

MEZCLA	COAGULANTE	DIAGRAMA	MEJOR DOSIS (mg/L)	TURB. INICIAL	MEJOR % REMOCION
(25/75)	SULF ATO	1	5	29,9	92,20%
		2	1	22,6	82,80%
		3	1	25,7	86,40%
	PAC	4	2,5	19	93,70%
		5	3,5	19	89,70%
		6	3	23,4	92,90%
(50/50)	SULF ATO	7	3	30,5	85,50%
		8	3	23,9	74,40%
		9	5	23,9	85,70%
	PAC	10	2,5	24,8	87,10%
		11	3	24,8	84,40%
		12	4,5	38,3	96,70%
(75/25)	SULF ATO	13	2	47,1	76,40%
		14	1	47,1	84,80%
		15	7	56,7	88,30%
	PAC	16	4,5	56,7	91,80%
		17	5	41	91,20%
		18	3	41	87,00%

Haciendo un consolidado de las diferentes mezcla evaluadas se pudo analizar un comportamiento similar, ha niveles bajos de pH la formación de floc se ve afectada proporcionalmente con la eficiencia de remoción, en consecuencia entra a una zona que se conoce como zona no activa en la cual ocurre el proceso de Re estabilización de los coloides ya que estos absorben en exceso agentes positivos hidrolizados de aluminio, ocurriendo así una polarización con un mayor porcentaje de carga positiva evitando la formación de los flóculos.

Por otra parte, en niveles de [pH > 6,0] el comportamiento de la zona de coagulación se vuelve más eficiente, en donde se encuentran las zonas optimas de coagulación, en donde

ocurre una estabilización de la polarización beneficiando indudablemente la unión de los coloides para una formación de floc más eficiente.

Por lo tanto, esta primera fase muestra que el mejor agente coagulante es el PAC el cual dio mayores porcentajes de remoción a dosis moderadas siendo de gran beneficio al tratamiento en su eficiencia al usar una masa de agua de embalse superior a la masa de agua del río surata.

En las tablas 8-10 que se presentan a continuación se comparó el uso de coagulantes mostrando la eficiencia de cada uno en remociones similares con respecto a su dosis máxima en mg/L notando la cantidad de producto necesario para la operación en planta en el momento que este empiece hacer el proceso de tratamiento con mezclas.

**Tabla 8** Variables diagramas de coagulación mezcla 1

VARIABLE	TIPO DE PROCESO	
	SULFATO DE ALUMINIO (NaOH HCL)	POLICLORURO DE ALUMINIO PAC (NaOH HCL)
VARIACIÓN pH (%)	1	1
REMOCIÓN TURBIEDAD (%)	92.2	92.9
DOSIS MAX (mg/L)	5	3

**Fuente:** Autores

Los resultados obtenidos en el estudio demuestran que en general, para el sistema de potabilización de agua usando PAC, como coagulante se observa una alteración mínima en el pH, con una variación irrelevante del 1% asumiendo que permanecerá prácticamente constante en todo el proceso.

Entre mayor sea el porcentaje de remoción de turbiedad señala la validez del sistema de clarificación. En la Tabla se observa que al utilizar PAC, se consiguen mayores porcentajes de remoción de turbiedad que los obtenidos con el sulfato de aluminio, usando menor

dosificación de coagulante PAC para obtener porcentajes de remoción similares, reconociendo su característica de mayor poder coagulante, garantizando que, en todo momento, la turbiedad del agua clarificada será menor que la del agua cruda, así mismo se observa que la dosis máxima de agente coagulante para sulfato de aluminio fue de 5 (mg/L) para obtener una eficiencia de remoción de aproximadamente el 92%, en cambio para obtener una eficiencia de remoción similar se usaron aproximadamente 3 (mg/L) de agente coagulante PAC .

**Tabla 9** Variables diagramas de coagulación mezcla 2

VARIABLE	TIPO DE PROCESO	
	SULFATO DE ALUMINIO (NaOH HCL)	POLICLORURO DE ALUMINIO PAC (NaOH HCL)
VARIACIÓN pH (%)	1	1
REMOCIÓN TURBIEDAD (%)	85.7	96.7
DOSIS MAX (mg/L)	5	4.5

**Fuente:** Autores

De acuerdo con los resultados arrojados en el estudio, se observa que para el sistema en general de potabilización de agua PAC, como agente coagulante presenta una menor variabilidad en el caso en el pH, con una variación irrelevante del 1%, asumiendo que permanecerá prácticamente constante en todo el proceso.

La eficacia de remoción de turbiedad que se observa al utilizar PAC, se datan mayores porcentajes de remoción que los conseguidos con el sulfato de aluminio, usando una dosis menor de coagulante PAC para obtener porcentajes de remoción similares, asegurando que, en todo momento, la turbiedad del agua tratada será menor que la del agua cruda, así mismo se observa que la dosis máxima de agente coagulante para sulfato de aluminio fue de 5 (mg/L) para obtener una eficiencia de remoción de aproximadamente el 85,7%, en cambio

para obtener una eficiencia de remoción similar se usaron aproximadamente 4.5 (mg/L) de agente coagulante PAC.

**Tabla 10** Variables diagramas de coagulación mezcla 3

VARIABLE	TIPO DE PROCESO	
	SULFATO DE ALUMINIO (NaOH HCL)	POLICLORURO DE ALUMINIO PAC (NaOH HCL)
VARIACIÓN pH (%)	1	1
REMOCIÓN TURBIEDAD (%)	88,3	87
DOSIS MAX (mg/L)	7	3

**Fuente:** Autores

Según los datos que se obtuvieron en el estudio, se difiere que el PAC y el sulfato de aluminio presentan una menor variabilidad en el pH, con una variación irrelevante del 1% asumiendo, que permanecerá prácticamente constante en todo el proceso.

La eficiencia de remoción de turbiedad que se observa, al utilizar PAC, donde se obtienen mayor eficacia de remoción de turbiedad que los alcanzados con el sulfato de aluminio, dejando en evidencia un porcentaje de 87% y 88,3% según corresponda. Es decir que usando menor concentración de coagulante PAC se pueden obtener porcentajes de remoción similares, verificando su característica de mayor poder coagulante, certificando que, en todo momento, la turbiedad del agua al finalizar el proceso va ser menor, así mismo se observa que la dosis máxima de agente coagulante para sulfato de aluminio fue de 7 (mg/L) para obtener una eficiencia de remoción de aproximadamente el 88.3%, en cambio para obtener una eficiencia de remoción similar se usaron aproximadamente 3 (mg/L) de agente coagulante PAC, donde se obtuvo 87% de eficiencia de remoción.

En terminación, si la planta de Bosconia piensa hacer mezclas se recomienda utilizar PAC o acondicionar la planta para el uso de este coagulante que se comporta mejor en el proceso

de la coagulación para estas condiciones asimismo este no altera de manera significativa el pH por lo que se puede decir que se mantiene sin mayor cambio.

### **FASE II Análisis de varianza de la calidad de agua de las mezclas realizadas entre la planta de Bosconia y el embalse de Bucaramanga**

En esta fase se compara las medias de las tres mezclas con respecto a cada parámetro de calidad, si son iguales o presentan diferencias entre ellas; analizando su tendencia absoluta  $F$  calculada con respecto a  $F$  teórica en el posible comportamiento de los parámetros en la planta de Bosconia.

#### **Registro de parámetros**

La tabla a continuación se construyó con los datos iniciales de cada parámetro de calidad sacando sus respectivas sumas de cuadrados y grados de libertad donde se expresará su análisis de varianza  $F_{calculado}$  para cada uno de los parámetros entre las tres mezclas ver anexo (4-10). Debido a que se tomó la misma cantidad de datos por cada parámetro fisicoquímico, se obtuvo el mismo valor  $F_{teórico}=3,68$  en el nivel de significancia  $\alpha = 0,05$ , para los valores de grados de libertad iguales a  $gl\ numerador=2$  y  $gl\ denominador=15$ .

**Tabla 11** Comparación de  $F_{calculada}$  y  $F_{teórica}$

Parámetros	$F_{calculada}$		$F_{teórica}$
pH	3,312541	<	3,68
Temperatura	0,3804084	<	3,68
Conductividad	0,3543612	<	3,68
Dureza	0,6672697	<	3,68
Color aparente	29,133749	>	3,68
Turbiedad	31,821367	>	3,68
Alcalinidad	17,073953	>	3,68

**Fuente:** Autores

Como se muestra a través de las tabla 10, se evidencia una tendencia absoluta  $F_{calculada} < F_{teórico}$  en la mayoría de parámetros de calidad evaluados (pH, temperatura, conductividad y dureza) lo cual permite aceptar la hipótesis nula  $H_0$  haciendo indicar que en estos parámetros fisicoquímicos no se presentara ninguna diferencia significativa en su calidad si se realiza cualquiera de las tres mezclas; pero en los parámetros de color aparente, alcalinidad y turbiedad se da una tendencia absoluta de  $F_{calculada} > F_{teórico}$  en la cual rechazamos la hipótesis nula lo que indicara que si existe una diferencia significativa de calidad de estos parámetros entre cada una de las mezclas esto posiblemente se da debido a que en algunos días que se tomaron las muestras se dieron fuertes lluvias lo cual pudo afectar severamente la turbiedad lo que conlleva a tener mayor cantidad de partículas suspendidas que pueden constar de arcillas, limos, o material orgánico; las cuales se ven reflejadas en el color por los mismos, haciendo que el agua pierda su transparencia natural siendo las principales fuentes de color los taninos, ácidos húmicos y humatos provenientes de la descomposición de la lignina. (Francisco J. Matus, 2000)

Se deduce que al trabajar mezclas con el embalse en la planta Bosconia como la tendencia de 75 embalse, 25 rio surata implica que la calidad de agua va a variar mucho en términos de turbiedad y color semejándose más a condiciones de operación de agua de embalse y al cambiar completamente los escenarios de operación se ve afectado el tratamiento en planta; las mejores condiciones de operación en ese caso es trabajar con PAC por lo tanto eso obliga de acuerdo al diseño de la planta que esta solo proyectado a trabajar con sulfato de aluminio líquido y solido a tener una contingencia de tener PAC en la operación de la planta.

### **Determinación masas de agua**

Teniendo en cuenta que la capacidad de la planta de Bosconia de 1980 L/s se realizan las mezclas estipuladas aplicando la ecuación 2 estipulada en metodología las entradas de masa de agua del embalse y rio quedarían:

**Tabla 12** Masas de agua de entrada a la planta

% Mezcla	Cantidad de agua
----------	------------------



	Embalse de Bucaramanga (L/s)	Rio Surata (L/s)
25/75	495	1485
50/50	990	990
75/25	1485	495

**Fuente:** Autores

En la tabla 11 se observa la cantidad de agua de entrada para la operación en planta para de las mezclas estipuladas en litros por segundo.

### **FASE III: Evaluación del proceso de floculación.**

En esta fase se observan los resultados de floculación de los dos coagulantes usados, con el fin de obtener el comportamiento del agua con la ecuación de Letterman de esta manera ver los gradientes de velocidad recomendables para la operación en planta.

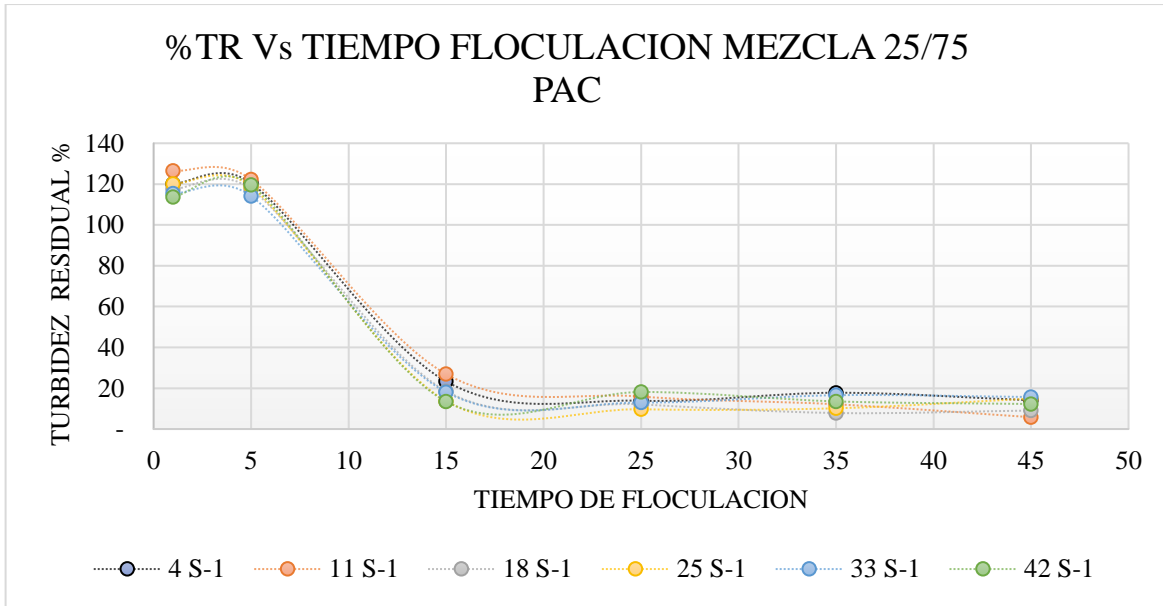
#### **Graficas de floculación por cada mezcla y tipo de coagulante**

Se presentan los gráficos de floculación los cuales se realizaron con el porcentaje de turbidez residual vs el tiempo de floculación, para la selección del mejor punto de remoción por cada tipo de coagulante para las mezclas (25/75; 50/50; 75/25) según los datos obtenidos (ver anexo 11-13)

#### **Floculación mezcla (25/75)**

- PAC

**Grafica 2** %Turbidez residual vs Tiempo de floculación mezcla 1 PAC

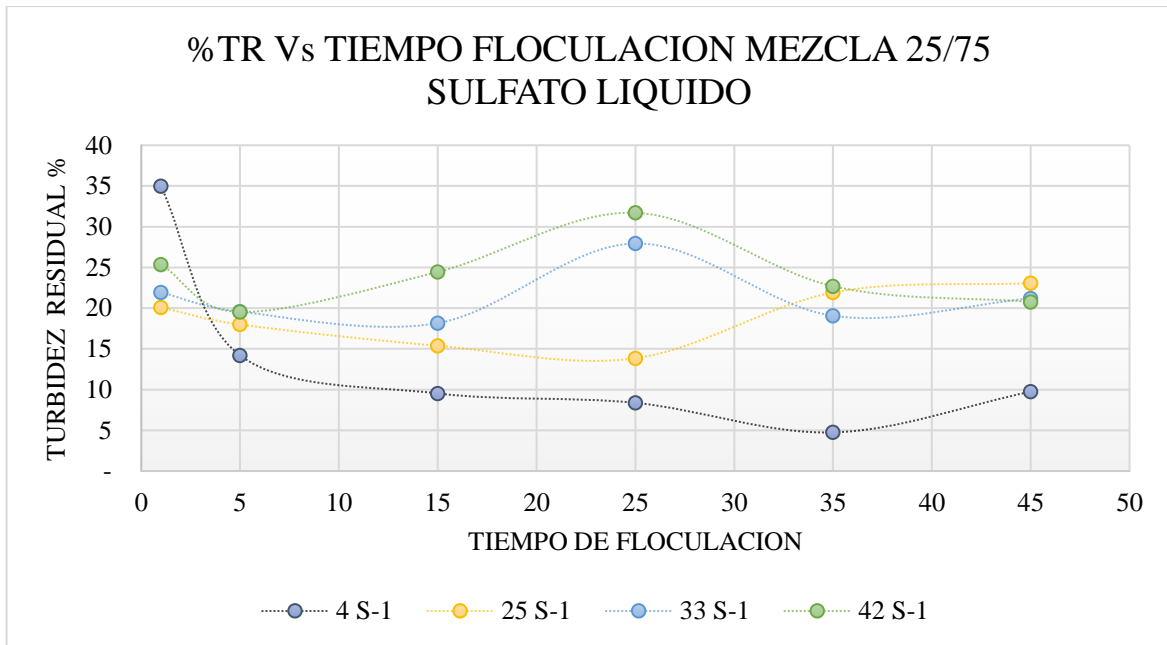


**Fuente:** Autores

Como se observa en la gráfica 2 los gradientes utilizados no presentan un efecto de cambio en el parámetro evaluado, comportándose similarmente indica que para la producción de floc con PAC en esta mezcla se puede hacer a diferentes gradientes requiriendo un tiempo de floculación mínimo de 15 minutos.

- Sulfato liquido

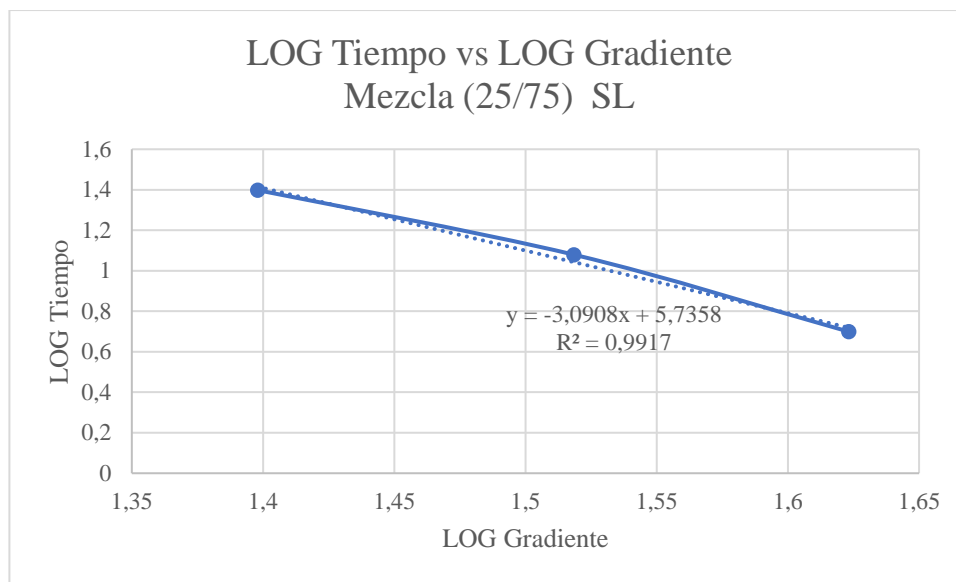
**Grafica 3** % Turbidez residual vs Tiempo de floculación mezcla 1 SL



**Fuente:** Autores

Como se observa en la gráfica 3 esta mezcla obtuvo un gran porcentaje de remoción; se eligió cuatro puntos óptimos para un tiempo de floculación de 5 minutos el gradiente 42 s-1, seguido de un tiempo de 12 minutos el gradiente 33 s-1, luego el gradiente 25 s-1 en un tiempo de floculación de 25 minutos todos con una remoción mayor al 80%.

**Grafica 4** LOG Gradiente vs LOG Tiempo de floculación



**Fuente:** Autores

A partir de la ecuación de la recta  $y = -3,0908x + 5,7358$  se planteó la ecuación de Letterman, la cual define el comportamiento del agua en estudio durante la fase de floculación para una dosis específica de sulfato de aluminio de 5mg/L. La ecuación puede mantenerse en uso al abarcar el rango de gradiente evaluado (4 s<sup>-1</sup> - 42s<sup>-1</sup>).

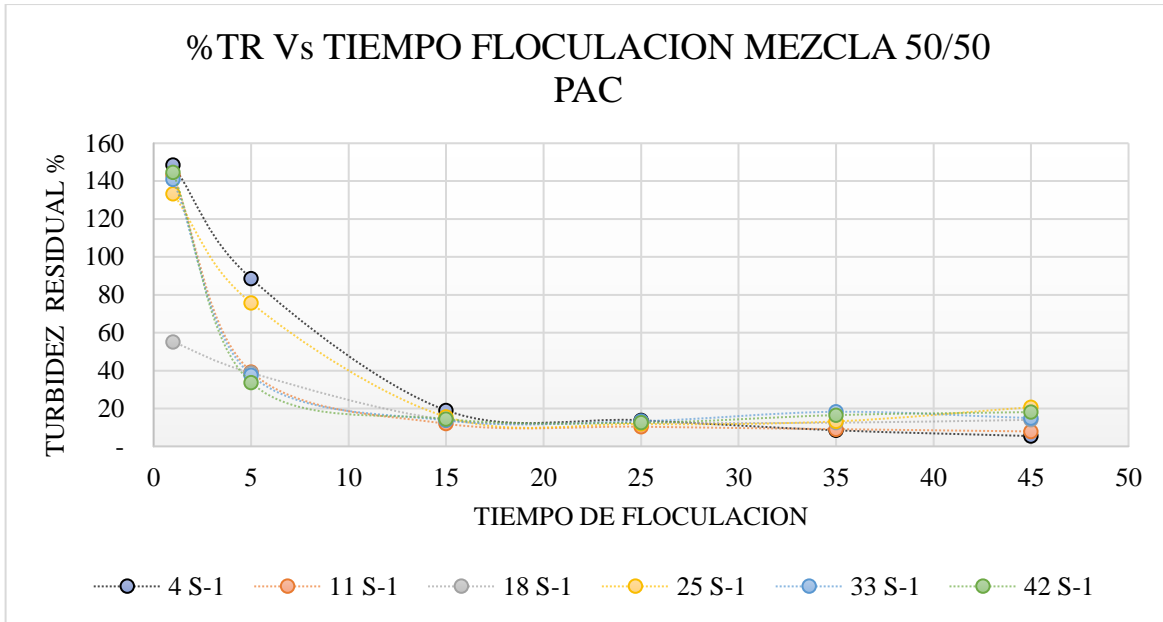
Ecuación de Letterman:

$$G^{3,0908}T = 544251,9$$

#### **Floculación mezcla (50/50)**

- PAC

**Grafica 5** %Turbidez residual vs Tiempo de floculación mezcla 2 PAC

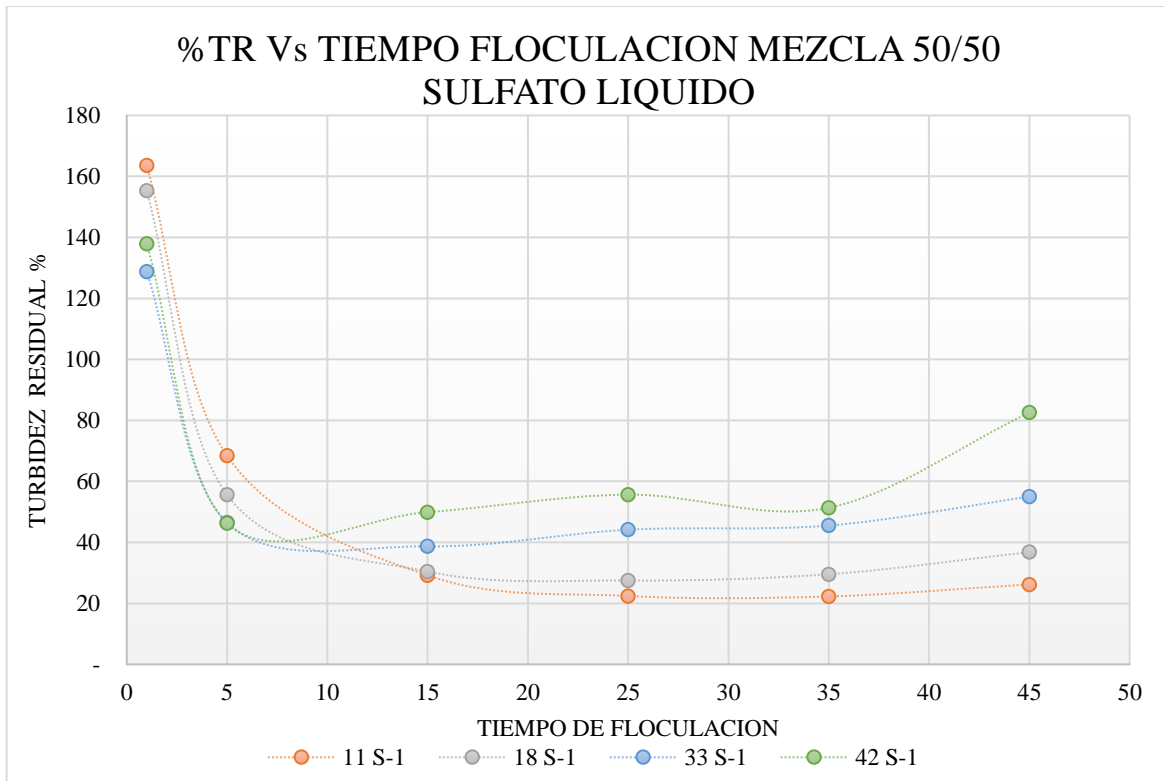


**Fuente:** Autores

Como se observa en la gráfica 5 los gradientes no muestran un efecto de cambio, comportándose semejantemente esto indica que para la formación de flóculos en esta mezcla usando PAC se puede hacer a diferentes gradientes requiriendo un tiempo de floculación de 15 minutos para obtener remociones mayores al 85%.

- Sulfato líquido

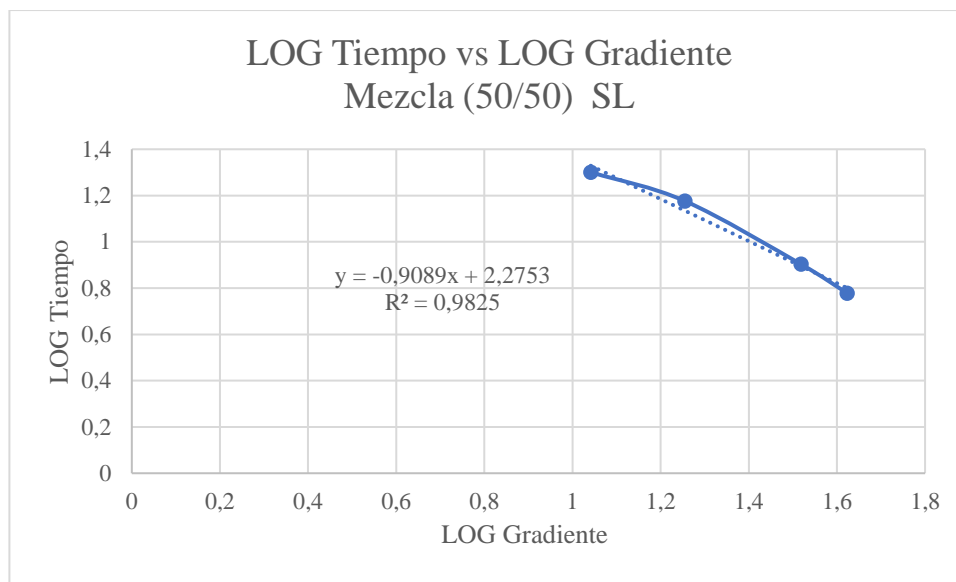
**Grafica 6** % Turbidez residual vs Tiempo de floculación mezcla 2 SL



**Fuentes:** Autores

Como se observa en la gráfica 6 en esta mezcla se obtuvo un comportamiento semejante al esperado, se eligiendo un punto óptimo para cada gradiente. En un tiempo de floculación de 20 minutos el gradiente de 11s-1, seguido del gradiente 18 s-1 con un tiempo de floculación de 15 minutos, también el gradiente 33 s-1 con un tiempo de 8 minutos, y el gradiente 42 s-1 finaliza con un tiempo de 5 minutos; evidenciando que a medida que aumentan los gradientes aumenta la turbidez residual como se denota el gradiente 42 s-1 de color verde, indicando que los gradiente altos no permiten la asociación continua y permanente de los floculos por ello sus porcentajes de turbidez residual se mantienen similares o no disminuyeron en menos del 50%.

**Grafica 7** LOG Gradiente vs LOG Tiempo de floculación



A partir de la ecuación de la recta  $y = -0,9089x + 2,2753$  se planteó la ecuación de Letterman, la cual define el comportamiento del agua en estudio durante la fase de floculación para una dosis específica de sulfato de aluminio de 3 mg/L. La ecuación puede mantenerse en uso al abarcar el rango de gradiente evaluado (4 s<sup>-1</sup> - 42s<sup>-1</sup>).

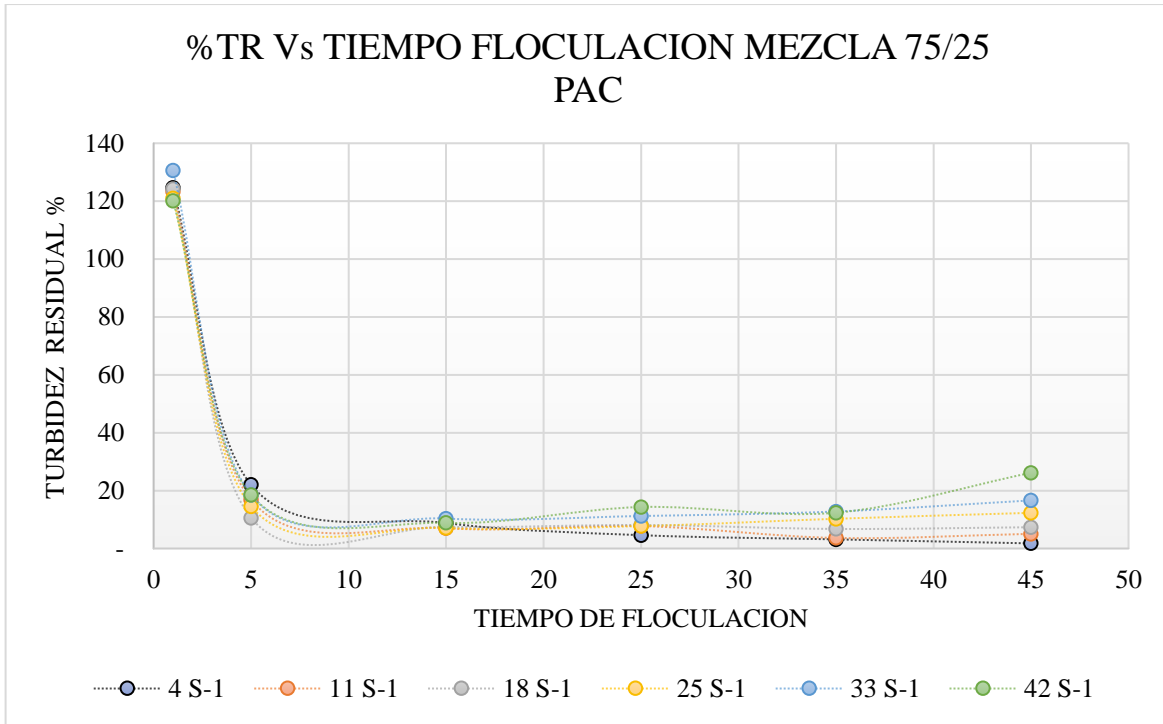
Ecuación de Letterman:

$$G^{0,9089}T = 188,49$$

### Floculación mezcla (75/25)

- PAC

**Grafica 8** %Turbidez residual vs Tiempo de floculación mezcla 3 PAC



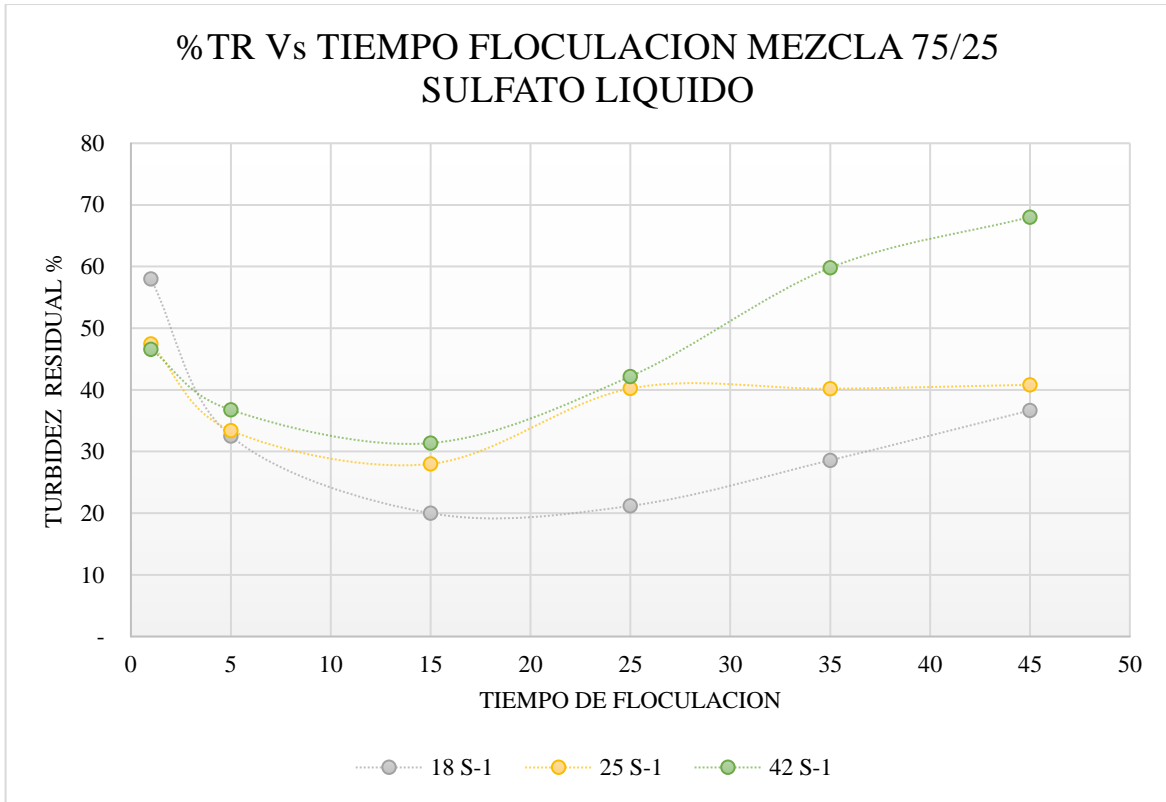
**Fuente:** Autores

Como se observa en la gráfica 8 los gradientes no presentan un efecto de cambio, esto indica que para la formación de flóculos en esta mezcla usando PAC como coagulante se puede hacer a diferentes gradientes requiriendo un tiempo de floculación de mínimo 5 minutos para obtener remociones mayores al 90%.

- Sulfato líquido



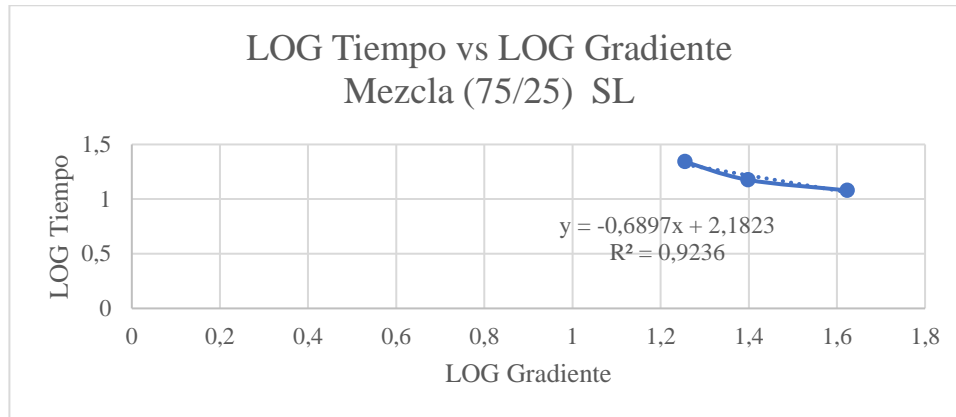
**Grafica 9** % Turbidez residual vs Tiempo de floculación mezcla 3 SL



**Fuente:** Autores

En la gráfica 9 se obtuvo los puntos óptimos para cada gradiente; para un tiempo de floculación de 22 minutos el gradiente de 18 s-1, seguido de un tiempo de 15 minutos el gradiente 25 s-1, finalizando con el gradiente 42 s-1 con un tiempo de 12 minutos presentando una remoción mayor al 80%; asimismo se debe tener en cuenta que para obtener porcentajes de remoción considerables se debe operar con gradientes bajos puesto que al aumentar los gradientes aumenta la turbidez residual como se observó en el comportamiento de las gráficas en las cuales se usó sulfato líquido como coagulante.

**Grafica 10** LOG Gradiente vs LOG Tiempo de floculación



**Fuente:** Autores

A partir de la ecuación de la recta  $y = -0,6897x + 2,1823$  se planteó la ecuación de Letterman, la cual define el comportamiento del agua en estudio durante la fase de floculación para una dosis específica de sulfato de aluminio de 1 mg/L. La ecuación puede mantenerse en uso al abarcar el rango de gradiente evaluado (4 s<sup>-1</sup> - 42s<sup>-1</sup>).

Ecuación de Letterman:

$$G^{0,6897} T = 152,15$$

En conclusión, Para la problemática que se puede presentar en la dosificación de las mezclas en la PTAP de Bosconia, es necesario tener en cuenta el uso de coagulante PAC como se denota en el estudio por su mayor concentración de alúmina este permite un mejor comportamiento en los procesos de potabilización, precipitando mejor, presentando un gradiente medio volviéndose constante permitiendo una operación en la planta sin mayor modificación.

## CAPITULO 6.

### CONCLUSIONES

- La evaluación de remoción de turbiedad en el proceso de coagulación entre los dos coagulantes utilizados (Sulfato de aluminio líquido y PAC), encontró que a medida que se da un uso mayor de la masa de agua del embalse de Bucaramanga se necesita una mayor cantidad de sulfato de aluminio para tener una remoción similar a la del PAC como se evidencia en la mezcla 3(75/25) obteniendo remoción de 88,3 % con una dosis de 7 mg/L a una de 87% con una dosis de 3mg/L; debido a la mayor concentración de % de alúmina que se encuentra en el coagulante PAC.
- Se evidencio que el PAC como coagulante permite en el proceso de floculación trabajar a diferentes gradientes debido a que no evidencia un mayor cambio entre ellos requiriendo un tiempo mínimo de floculación de 15 minutos en las mezclas de 25/75 y 50/50 y en la mezcla de 75/25 la cual cuenta con más masa de agua del embalse se necesita un tiempo de 5 minutos, dando un cambio mínimo en la operación del tratamiento en planta si se incluye este coagulante para trabajar con mezclas del embalse; por otro lado en el uso de Sulfato liquido como coagulante se denoto que a medida que las mezclas presentan mayor cantidad de agua del embalse es necesario disminuir los gradientes como se presenta en las mezclas 75/25 y 50/50 puesto que a gradientes altos no se dio una asociación de partículas adecuada.
- Se determina que, si existe un efecto en la planta Bosconia al trabajar con mezclas, por ello es necesario que la PTAP se proyecte a hacer modificación en los escenarios operación a tener una contingencia de coagulante PAC debido a que este presenta una mejor remoción en los procesos evaluados de esta manera no afectara el tratamiento de potabilización la hora de trabajar con agua del embalse.

## **CAPITULO 7.**

### **RECOMENDACIONES**

- Realizar estudios para el comportamiento del agua cuando el río Surata presente turbiedades más altas, para observar cómo cambian las condiciones al mezclarla con el agua del embalse de Bucaramanga en el tratamiento.
- Se recomienda hacer un estudio costo-beneficio sobre la inclusión del uso de PAC en la planta de tratamiento de Bosconia.
- Se propone realizar las modificaciones para el almacenamiento y uso del PAC al momento de realizar el recambio de agua por las mezclas estudiadas utilizándolo como agente coagulante debido a que menores dosis se obtienen mejores resultados de remoción.
- Debido a las bajas turbiedades que se presentaron en el proceso de floculación se recomienda aumentar los tiempos para observar de mejor manera el comportamiento de los gradientes.

## CAPITULO 8.

### LISTA DE REFERENCIAS

Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (2019). Fuentes de Agua. Disponible en <http://www.amb.com.co/frmInformacion.aspx?inf=33>

(s.f.).

Arboleda, J. (1992). *Teoría y practica de la purificación del agua*. Medellín: MCGRAW-HILL / INTERAMERICANA DE COLOMBIA.

B Bolto, & J. (2007). Organic polyelectrolytes in water treatment. *Science Direct*.

BOCHKAREV, G. K. (2003). Intensification of coagulation purification of highly colored waters. *Journal of Mining Science*.

Cardenas, A. (2000). Tratamiento de agua.

Cardenas, Y. (2000). TRATAMIENTO DE AGUA: COAGULACIÓN FLOCULACIÓN SEDEPAL. *Coagulación-Floculación*.

Derivados, S. y. (2016). *SULFATO DE ALUMINIO*.

E Reyes, M. C. (2016). EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO POR COAGULACIÓN PARA LAS AGUAS RESIDUALES DE LA CENTRAL TERMOELÉCTRICA DE CEMENTOS ARGOS ANTIOQUIA. *UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA – UNAD*.

FAO. (2013). *Afrontar la escasez de agua*. ROMA: ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA.

IDEAM. (2014). *ESTUDIO NACIONAL DEL AGUA*.




Isabel, C. d. (2012). Tratamiento de agua potable.

- MARTINEZ, N. (2000). *EL PROCESO DE OCUPACION EN LA CUENCA DEL EMBALSE LA MARIPOSA Y SUS EFECTOS DE DETERIORO EN EL EMBALSE Y SUS AGUAS*. CARACAS: TERRA NUEVA.
- MAVDT. (2007). *Características, instrumentos básicos y frecuencias*. RESOLUCIÓN 2115. COLOMBIA: MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO TERRITORIAL.
- MERTEL, B. (2010). Desinfección. En M. t. agua, *Capítulo 10*.
- Myron, R. (2005). *Tratamientos utilizados en potabilización de agua*”. Universidad Rafael Landívar.
- ONU. (2016). *OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE*. PNUD.
- ONU. (2017). *Informe Mundial sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas*.
- Perez, C. J. (1978). Laboratorio, Floculación. Programa Regional OPS/EHP/CEPIS. Mejoramiento de la calidad de agua. *CEPIS*.
- Perez, J. (1981). *Tratamientos de aguas*. Bogotá: Universidad Nacional.
- Rojas, J. (2002). *Purificación del Agua*. Bogotá: Escuela Colombiana de ingeniería.
- ROMERO, R. (1999). *Potabilización del Agua*. Alfaomega Grupo Editor SA.
- Sawyer, C. M. (2001). *Química para la ingeniería ambiental*.
- SUPERINTENDENCIA DELEGADA PARA ACUEDUCTO, A. (2018). *EVALUACION INTEGRAL DE PRESTADORES PROACTIVA DE TUNJA*. BOGOTA.
- VAN BENSCHOTEN, J. A. (1990). Chemical aspects of coagulation using aluminum salts: Hydrolytic reaction of alum and polyaluminum chloride. *Water Research*.
- Vargas, L. d. (2015). Floculación.
- WANG, Y. Z.-Z.-Y.-M.-Y. (2009). The effect of total hardness on the coagulation performance of aluminum salts with different Al species. *eparation and Purification Technology*.

## CAPITULO 9.

### ANEXOS

#### Anexo 1 Hoja de seguridad sulfato de aluminio liquido tipo B (Quinsa S.A)


Hoja de Seguridad <b>SULFATO DE ALUMINIO TIPO B LIQUIDO</b>													
<p>Preparado por Química Integrada S.A. según Norma Técnica Colombiana NTC 4435 de 1998-07-22</p> <p>No. NTC – 1692 : 8 Corrosivo</p> <p>No. ONU : UN 3264</p>  	<p><b>IDENTIFICACION NFPA</b></p>  <table><tr><td><b>Salud</b></td><td>Azul</td><td><b>1</b></td></tr><tr><td><b>Inflamabilidad</b></td><td>Rojo</td><td><b>0</b></td></tr><tr><td><b>Reactividad</b></td><td>Amarillo</td><td><b>0</b></td></tr><tr><td><b>Riesgo especial</b></td><td>Blanco</td><td></td></tr></table>	<b>Salud</b>	Azul	<b>1</b>	<b>Inflamabilidad</b>	Rojo	<b>0</b>	<b>Reactividad</b>	Amarillo	<b>0</b>	<b>Riesgo especial</b>	Blanco	
<b>Salud</b>	Azul	<b>1</b>											
<b>Inflamabilidad</b>	Rojo	<b>0</b>											
<b>Reactividad</b>	Amarillo	<b>0</b>											
<b>Riesgo especial</b>	Blanco												
<b>1. Identificación del producto y de la empresa</b>													
Producto	: SULFATO DE ALUMINIO TIPO B LIQUIDO												
Fabricante/distribuidor	: Química Integrada S.A. QUINSA												
Dirección	: KM. 34 Vía Neiva Bogotá												
Código postal y ciudad	: Neiva - Huila												
País	: Colombia												
Número de teléfono	: 098-8389038												
Telefax	: 098-8389224 / 8389327												
E-mail	: quinsa01@hotmail.com												
CISTEMA	: 01 – 8000 - 941414												
<b>2. Composición/información de los componentes</b>													
El producto es una sal inorgánica, compuesta por una mezcla de sulfatos de aluminio y férricos en presencia de diferentes minerales inertes e insolubles en agua.													
Contenido de Aluminio	: 3.8%												
Contenido de Hierro	: 0.9%												
Contenido de Sulfatos	: 22.6%												
<b>3. Identificación de peligros</b>													
En los ojos causa irritación. No es tóxico, puede causar irritación al contacto con la piel por tratarse de una sal ácida. Corrosivo. Si se ingiere puede ser fatal.													

<b>4. Primeros auxilios</b>
<p><b>Instrucciones generales</b> Facilitar siempre al médico la hoja de datos de seguridad.</p> <p><b>En caso de contacto con la piel</b> corrosivo, puede causar enrojecimiento, ardor y quemaduras Lavar la zona afectada inmediatamente con agua y jabón. Si persisten los síntomas de irritación, acudir al médico.</p> <p><b>En caso de contacto con los ojos</b> Lavar los ojos afectados inmediatamente con agua abundante durante 15 minutos. Tratamiento médico necesario.</p> <p><b>En caso de ingestión</b> No provocar el vómito. Requerir inmediatamente ayuda médica. Beber abundante agua</p>
<b>5. Medidas de lucha contra incendios</b>
<p>El producto no arde por sí mismo. Los restos del incendio así como el agua de extinción contaminada, deben eliminarse según las normas locales en vigor. Evite inhalar vapores desprendidos.</p>
<b>6. Medidas a tomar en caso de vertido accidental</b>
<p>Ventilar el área del derrame. Usar los elementos de protección personal. Aislar el área de riesgo y eliminar posibles puntos de ignición para evitar fuego. Mantenga el personal no protegido fuera del área. Si es posible eliminar la fuga, contener y tratar de recuperar el líquido. Neutralizar la zona afectada con un alcalinizante y absorber con un material inerte (arena seca, tierra), colocar en un contenedor para desperdicio químico. Se debe rociar cal sobre los residuos que queden después de recoger el material derramado, para evitar acidificación del suelo cuando haya corrientes de agua.</p>
<b>7. Manipulación y almacenamiento</b>
<p>Almacenar en tanques o contenedores cerrados en material plástico o fibra de vidrio, ubicados en lugares frescos, ventilados y secos, con buen drenaje. Los recipientes vacíos con residuos del producto pueden ser riesgosos. El contacto de la sustancia con la superficie la torna resbalosa. Evitar vertimientos a los cursos de agua.</p>
<b>8. Control de exposición y medidas de protección personal</b>
<p>Utilizar visor de acetato, monogafas de seguridad o careta. Manténgase lavajos en el botiquín. Usar guantes largos de caucho o nitrilo, petos o delantal industrial, botas de caucho. La ropa debe ser impermeable.</p>



<b>9. Propiedades físicas y químicas</b>	
<b>FÓRMULA QUÍMICA</b>	: $Al_2(SO_4)_3 \cdot 14.3 H_2O$
<b>APARIENCIA</b>	: Líquido vino tinto, oscuro.
<b>OLOR</b>	: Característico
<b>DENSIDAD</b>	: 1.325 g/ml a 25 °C
<b>VISCOSIDAD</b>	: 35 C.P. a 25 °C
<b>PUNTO DE EBULLICIÓN</b>	: 100 °C a 760 mm Hg.
<b>PUNTO DE FUSIÓN</b>	: < - 4 °C
<b>pH 1%</b>	: 3.0
<b>SOLUBILIDAD</b>	: Soluble en agua
<b>10. Estabilidad y reactividad</b>	
El producto es estable en condiciones normales de almacenamiento.	
<b>11. Información toxicológica</b>	
No es tóxico, puede causar irritación al contacto con la piel por tratarse de una sal ácida. Si se ingiere puede ser fatal. El producto puede ser irritante en las mucosas, pero no letal.	
<b>12. Información ecológica</b>	
El producto aporta aluminio al suelo, que es un inconveniente en suelos con fines agrícolas. Es tóxico para los peces en una concentración superior a 6.5 g/m <sup>3</sup> No contribuye a la DQO en los cursos de agua.	
<b>13. Eliminación de residuos</b>	
El producto no es un desecho peligroso.	
<b>14. Información relativa al transporte</b>	
El material no es peligroso en caso de accidente. Mientras se transporte en un empaque original, el producto no libera material fino al ambiente.	
<b>15. Información Reglamentaria</b>	
La utilización de este producto no es sujeta de controles específicos.	
<b>16. Información Adicional</b>	
El producto se ha clasificado de baja reactividad, no inflamable e inofensivo para la salud. La dilución en agua no es peligrosa. El producto disuelto en agua puede oxidar el hierro metálico.	
<b>Responsabilidad</b> La información contenida en esta Hoja de seguridad ha sido preparada por el equipo técnico de Química Integrada S.A. con el objeto de proporcionar información para el manejo seguro del producto.  Es difícil anticiparse a la utilización de este producto y por lo tanto la información aquí contenida debe ser tomada como una orientación y aplicarla en el contexto apropiado.	

**Anexo 2** Hoja de seguridad policloruro de aluminio PAC (Quinsa S.A)

<b>Hoja de Seguridad</b> <b>POLICLORURO DE ALUMINIO</b>													
<p>Preparado por Química Integrada S.A. según Norma Técnica Colombiana NTC 4435 de 1998-07-22</p> <div style="text-align: center;">  <p><b>CORROSIVO</b> 8</p> </div> <p>IDENTIFICACION U.N : 3264 <span style="border: 1px solid black; padding: 2px 10px;"><b>UN 3264</b></span></p>	<p style="text-align: center;"><b>IDENTIFICACION NFPA</b></p> <div style="text-align: center;">  </div> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 15%;"><b>Salud</b></td> <td style="width: 55%;">Azul</td> <td style="width: 10%; text-align: center;"><span style="background-color: blue; color: white; padding: 2px;">1</span></td> </tr> <tr> <td><b>Inflamabilidad</b></td> <td>Rojo</td> <td style="text-align: center;"><span style="background-color: red; color: white; padding: 2px;">0</span></td> </tr> <tr> <td><b>Reactividad</b></td> <td>Amarillo</td> <td style="text-align: center;"><span style="background-color: yellow; color: black; padding: 2px;">0</span></td> </tr> <tr> <td><b>Riesgo especial</b></td> <td>Bianco</td> <td></td> </tr> </table>	<b>Salud</b>	Azul	<span style="background-color: blue; color: white; padding: 2px;">1</span>	<b>Inflamabilidad</b>	Rojo	<span style="background-color: red; color: white; padding: 2px;">0</span>	<b>Reactividad</b>	Amarillo	<span style="background-color: yellow; color: black; padding: 2px;">0</span>	<b>Riesgo especial</b>	Bianco	
<b>Salud</b>	Azul	<span style="background-color: blue; color: white; padding: 2px;">1</span>											
<b>Inflamabilidad</b>	Rojo	<span style="background-color: red; color: white; padding: 2px;">0</span>											
<b>Reactividad</b>	Amarillo	<span style="background-color: yellow; color: black; padding: 2px;">0</span>											
<b>Riesgo especial</b>	Bianco												
<b>1. Identificación del producto y de la empresa</b>													
Producto	: POLICLORURO DE ALUMINIO												
Sinónimos	: PAC, Hidroxicloruro de Aluminio, Cloruro de Polialuminio												
Fabricante/distribuidor	: Química Integrada S.A. QUINSA												
Dirección	: KM. 34 Vía Neiva Bogotá												
Código postal y ciudad	: Neiva - Huila												
País	: Colombia												
Número de teléfono	: 098-8389038												
Telefax	: 098-8389224 / 8389327												
E-mail	: quinsa01@hotmail.com												
CISTEMA	: 01 – 8000 - 941414												
<b>2. Composición/información de los componentes</b>													
El producto es un polímero inorgánico													
Contenido de Alúmina	: 22.0%												
Contenido de Acidez	: 11.5%												
<b>3. Identificación de peligros</b>													
<p>En los ojos causa irritación.</p> <p>No es tóxico, puede causar irritación al contacto con la piel por tratarse de una sal ácida. Corrosivo. Si se ingiere puede ser fatal.</p>													

#### 4. Primeros auxilios

##### Instrucciones generales

Facilitar siempre al médico la hoja de datos de seguridad.

##### En caso de contacto con la piel

corrosivo, puede causar enrojecimiento, ardor y quemaduras

Lavar la zona afectada inmediatamente con agua y jabón.

Si persisten los síntomas de irritación, acudir al médico.

##### En caso de contacto con los ojos

Lavar los ojos afectados inmediatamente con agua abundante durante 15 minutos.

Tratamiento médico necesario.

##### En caso de ingestión

No provocar el vómito.

Requerir inmediatamente ayuda médica.

Beber abundante agua

#### 5. Medidas de lucha contra incendios

El producto no arde por sí mismo.

Los restos del incendio así como el agua de extinción contaminada, deben eliminarse según las normas locales en vigor.

Evite inhalar vapores desprendidos.

#### 6. Medidas a tomar en caso de vertido accidental

Ventilar el área del derrame. Usar los elementos de protección personal. Aislar el área de riesgo y eliminar posibles puntos de ignición para evitar fuego. Mantenga el personal no protegido fuera del área. Si es posible eliminar la fuga, contener y tratar de recuperar el líquido. Neutralizar la zona afectada con un alcalinizante y absorber con un material inerte (arena seca, tierra), colocar en un contenedor para desperdicio químico.

Se debe rociar cal sobre los residuos que queden después de recoger el material derramado, para evitar acidificación del suelo cuando haya corrientes de agua.

#### 7. Manipulación y almacenamiento

Almacenar en tanques o contenedores cerrados en material plástico o fibra de vidrio, ubicados en lugares frescos, ventilados y secos, con buen drenaje. Los recipientes vacíos con residuos del producto pueden ser riesgosos. El contacto de la sustancia con la superficie la torna resbalosa.

Evitar vertimientos a los cursos de agua.

#### 8. Control de exposición y medidas de protección personal

Utilizar visor de acetato, monogafas de seguridad o careta. Manténgase lavaojos en el botiquín.

Usar guantes largos de caucho o nitrilo, petos o delantal industrial, botas de caucho. La ropa debe ser impermeable.

<b>9. Propiedades físicas y químicas</b>	
<b>FÓRMULA QUÍMICA</b>	: $Al_2(OH)_5Cl$
<b>APARIENCIA</b>	: Líquido Ámbar, Transparente
<b>OLOR</b>	: Característico
<b>DENSIDAD</b>	: 1.325 – 1.330 g/ml a 25 °C
<b>VISCOSIDAD</b>	: 60 C.P. a 25 °C
<b>PUNTO DE EBULLICIÓN</b>	: 100 °C a 760 mm Hg.
<b>PUNTO DE FUSIÓN</b>	: < - 3 °C
<b>pH 1%</b>	: 4.6 +/- 0.5
<b>SOLUBILIDAD</b>	: Soluble en agua
<b>10. Estabilidad y reactividad</b>	
El producto es estable en condiciones normales de almacenamiento y manipulación.	
<b>11. Información toxicológica</b>	
No es tóxico, puede causar irritación al contacto con la piel por tratarse de una sal ácida. Si se ingiere puede ser fatal. El producto puede ser irritante en las mucosas, pero no letal.	
<b>12. Información ecológica</b>	
El producto aporta aluminio al suelo, que es un inconveniente en suelos con fines agrícolas. Es toxico para los peces en una concentración superior a 6.5 g/m3 No contribuye a la DQO en los cursos de agua. Prohibido	
<b>13. Eliminación de residuos</b>	
El producto no es un desecho peligroso.	
<b>14. Información relativa al transporte</b>	
El material no es peligroso en caso de accidente. Mientras se transporte en un empaque bien sellado, el producto no libera vapores al ambiente.	
<b>15. Información Reglamentaria</b>	
La utilización de este producto no es sujeta de controles específicos.	
<b>16. Información Adicional</b>	
El producto se ha clasificado de baja reactividad, no inflamable e inofensivo para la salud. La dilución en agua no es peligrosa. El producto disuelto en agua puede oxidar el hierro metálico.	
<b>Responsabilidad</b> La información contenida en esta Hoja de seguridad ha sido preparada por el equipo técnico de Química Integrada S.A. con el objeto de proporcionar información para el manejo seguro del producto.  Es difícil anticiparse a la utilización de este producto y por lo tanto la información aquí contenida debe ser tomada como una orientación y aplicarla en el contexto apropiado.	

### Anexo 3 Parámetros iniciales muestras de coagulación

	pH	TURBIEDAD	COLOR	E/R	CONDUCTIVIDAD	TEMPERATURA (°C)	ALCALINIDAD (mg/L)	DUREZA (mg/L)	O.D. (mg/L)
1	7,99	29,9	283	25/75	141,3	21,5	80,2	222,2	8,36
2	8,4	22,6	219	25/75	156,8	23,2	87,54	152	8,29
3	7,4	25,7	241	25/75	163,4	23	89,08	121,6	8,28
4	7,35	30,5	291	50/50	160,8	22	89,5	162,6	8,38
5	7,65	23,9	235	50/50	291	21,5	91,22	105,4	8,35
6	7,65	23,9	235	50/50	291	21,5	91,22	105,4	8,35
7	7,78	47,1	475	75/25	221	21,1	96,2	119,4	8,12
8	7,78	47,1	475	75/25	221	21,1	96,2	119,4	8,12
9	7,73	56,7	558	75/25	204	21,3	93,26	145	8,14
10	7,73	56,7	558	75/25	204	21,3	93,26	145	8,14
11	7,56	41	395	75/25	320	21,9	99,78	115,2	8,18
12	7,56	41	395	75/25	320	21,9	99,78	115,2	8,18
13	7,49	24,8	252	50/50	173,9	21,2	89,14	140,2	-
14	7,49	24,8	252	50/50	173,9	21,2	89,14	140,2	-
15	7,84	19	201	25/75	177,8	20,9	89,32	121,6	-
16	7,84	19	201	25/75	177,8	20,9	89,32	121,6	-
17	7,49	38,3	406	50/50	271	21,5	88,6	113,8	-
18	7,59	23,4	226	25/75	436,4	21	89,18	121,6	-

### Anexo 4 Datos recogidos para pH; medias y totales (Autores)

Datos de pH mezclas (R/E)		
M1(25/75)	M2(50/50)	M3(75/25)
7,99	7,35	7,78
8,4	7,65	7,78
7,4	7,65	7,73
7,84	7,49	7,73
7,84	7,49	7,56
7,59	7,49	7,56

Totales y medias para pH				
pH	M1	M2	M3	Total

Media	7,843333333	7,52	7,69	
N° datos	6	6	6	
y.	47,06	45,12	46,14	
Media gen				7,684444444
N° datos				18
Y..				138,32

fuentes de variación	Grados de libertad (gl)	Suma de cuadrados (SC)	Varianza o cuadrados medios (CM)	f-calculada
Tratamientos	2	0,31391111	0,15695556	3,31254104
Error residual	15	0,71073333	0,35536667	
Total	17	1,02464444		

**Anexo 5** Datos recogidos para temperatura; medias y totales (Autores)

Datos de temperatura mezclas (R/E)		
M1(25/75)	M2(50/50)	M3(75/25)
21,5	22	21,1
23,2	21,5	21,1
23	21,5	21,3
20,9	21,2	21,3
20,9	21,2	21,9
21	21,5	21,9

Totales y medias para temperatura				
Temperatura	M1	M2	M3	Total
Media	21,75	21,48333333	21,43333333	
N° datos	6	6	6	
y.	130,5	128,9	128,6	
Media gen				21,55555556
N° datos				18
Y..				388

fuentes de variación	Grados de libertad (gl)	Suma de cuadrados (SC)	Varianza o cuadrados medios (CM)	f-calculada
Tratamientos	2	0,34777778	0,17388889	0,38040836
Error residual	15	6,85666667	3,42833333	
Total	17	7,20444444		

**Anexo 6** Datos recogidos para color; medias y totales (Autores)

Datos de color mezclas (R/E)		
M1(25/75)	M2(50/50)	M3(75/25)
283	291	475
219	235	475
241	235	558
201	252	558
201	252	395
226	406	395

Totales y medias para color				
Color	M1	M2	M3	Total
Media	228,5	278,5	476	
N° datos	6	6	6	
y.	1371	1671	2856	
Media gen				327,666667
N° datos				18
Y..				5898

fuentes de variación	Grados de libertad (gl)	Suma de cuadrados (SC)	Varianza o cuadrados medios (CM)	f-calculada
Tratamientos	2	205525	102762,5	29,1337485
Error residual	15	52909	26454,5	
Total	17	258434		

**Anexo 7** Datos recogidos para conductividad; medias y totales (Autores)

Datos de conductividad mezclas (R/E)		
M1(25/75)	M2(50/50)	M3(75/25)
141,3	160,8	221
156,8	291	221
163,4	291	204
177,8	173,9	204
177,8	173,9	320



436,4	271	320
-------	-----	-----

Totales y medias para conductividad				
Conductividad	M1	M2	M3	Total
Media	208,9166667	226,9333333	248,3333333	
Nº datos	6	6	6	
y.	1253,5	1361,6	1490	
Media gen				228,0611111
Nº datos				18
Y..				4105,1

fuentes de variación	Grados de libertad (gl)	Suma de cuadrados (SC)	Varianza o cuadrados medios (CM)	f-calculada
Tratamientos	2	4672,46778	2336,23389	0,35436121
Error residual	15	98892,055	49446,0275	
Total	17	103564,523		

**Anexo 8** Datos recogidos para alcalinidad; medias y totales (Autores)

Datos de alcalinidad mezclas (R/E)		
M1(25/75)	M2(50/50)	M3(75/25)
80,2	89,5	96,2
87,54	91,22	96,2
89,04	91,22	93,26

89,32	89,14	93,26
89,32	89,14	99,78
89,18	88,6	99,78

Totales y medias para alcalinidad				
Alcalinidad	M1	M2	M3	Total
Media	87,43333333	89,80333333	96,41333333	
Nº datos	6	6	6	
y.	524,6	538,82	578,48	
Media gen				91,2166667
Nº datos				18
Y..				1641,9

fuentes de variación	Grados de libertad (gl)	Suma de cuadrados (SC)	Varianza o cuadrados medios (CM)	f-calculada
Tratamientos	2	259,8988	129,9494	17,0739529
Error residual	15	114,1646	57,0823	
Total	17	374,0634		

**Anexo 9** Datos recogidos para dureza; medias y totales (Autores)

Datos de dureza mezclas (R/E)		
M1(25/75)	M2(50/50)	M3(75/25)
222,2	162,6	119,4
152	105,4	119,4

121,6	105,4	145
121,6	140,2	145
121,6	140,2	115,2
121,6	112,8	115,2

Totales y medias para dureza				
Dureza	M1	M2	M3	Total
Media	143,4333333	127,7666667	126,5333333	
Nº datos	6	6	6	
Y.	860,6	766,6	759,2	
Media gen				132,577778
Nº datos				18
Y..				2386,4

fuentes de variación	Grados de libertad (gl)	Suma de cuadrados (SC)	Varianza o cuadrados medios (CM)	f-calculada
Tratamientos	2	1065,15111	532,575556	0,66726973
Error residual	15	11972,12	5986,06	
Total	17	13037,2711		

**Anexo 10** Datos recogidos para turbiedad; medias y totales (Autores)

Datos de turbiedad mezclas (R/E)		
M1(25/75)	M2(50/50)	M3(75/25)

29,9	30,5	47,1
22,6	23,9	47,1
25,7	23,9	56,7
19	24,8	56,7
19	24,8	41
23,4	38,3	41

Totales y medias para turbiedad				
Turbiedad	M1	M2	M3	Total
Media	23,26666667	27,7	48,26666667	
N° datos	6	6	6	
Y.	139,6	166,2	289,6	
Media gen				33,0777778
N° datos				18
Y..				595,4

fuentes de variación	Grados de libertad (gl)	Suma de cuadrados (SC)	Varianza o cuadrados medios (CM)	f-calculada
Tratamientos	2	2135,28444	1067,64222	31,8213671
Error residual	15	503,266667	251,633333	
Total	17	2638,55111		

**Anexo 11** Datos de turbidez final recogidos en la etapa de floculación mezcla 1 (25/75)

(Autores)

PAC MEZCLA 25/75							
		TIEMPO DE FLOCULACION					
GRADIENTE (S-1)	RPM	1	5	15	25	35	45
4	10	120	121	23	14	18	14
11	20	126	122	27	16	12	6
18	30	118	118	19	12	8	9
25	40	120	119	14	10	10	15
33	50	115	114	18	13	17	16
42	60	114	120	13	18	14	12

SULFATO DE ALUMINIO MEZCLA 25/75							
		TIEMPO DE FLOCULACION					
GRADIENTE (S-1)	RPM	1	5	15	25	35	45
4	10	35	14	10	8	5	10
11	20	25	11	12	14	11	9
18	30	20	12	19	11	16	14
25	40	20	18	15	14	22	23
33	50	22	20	18	28	19	21
42	60	25	20	24	32	23	21

**Anexo 12** Datos de turbidez final recogidos en la etapa de floculación mezcla 2 (50/50)

(Autores)

PAC MEZCLA 50/50							
		TIEMPO DE FLOCULACION					
GRADIENTE (S-1)	RPM	1	5	15	25	35	45
4	10	148	89	19	14	8	5
11	20	143	39	12	10	9	8
18	30	55	39	14	13	13	14
25	40	133	76	16	12	13	21
33	50	141	38	14	13	18	15
42	60	145	34	14	13	17	18

SULFATO DE ALUMINIO MEZCLA 50/50							
		TIEMPO DE FLOCULACION					
GRADIENTE (S-1)	RPM	1	5	15	25	35	45
4	10	165	121	36	18	24	12
11	20	164	68	29	22	22	26
18	30	155	56	30	28	30	37
25	40	153	58	37	38	52	49
33	50	129	47	39	44	46	55
42	60	138	46	50	56	51	83

**Anexo 13** Datos de turbidez final recogidos en la etapa de floculación mezcla 3 (75/25)

(Autores)

PAC MEZCLA 75/25							
------------------	--	--	--	--	--	--	--

		TIEMPO DE FLOCULACION					
GRADIENTE (S-1)	RPM	1	5	15	25	35	45
4	10	125	22	9	5	3	2
11	20	123	17	7	8	4	5
18	30	124	11	7	8	7	7
25	40	121	15	7	8	10	12
33	50	131	19	10	11	13	17
42	60	120	18	9	14	12	26

SULFATO DE ALUMINIO MEZCLA 75/25							
		TIEMPO DE FLOCULACION					
GRADIENTE (S-1)	RPM	1	5	15	25	35	45
4	10	87	35	16	17	15	17
11	20	69	29	17	28	19	22
18	30	58	33	20	21	29	37
25	40	47	33	28	40	40	41
33	50	56	48	41	41	31	34
42	60	47	37	31	42	60	68