

**EVALUACION DEL COMPORTAMIENTO DE LA COAGULACION-
FLOCULACION PARA LA CALIDAD DE AGUA DEL EMBALSE DE
BUCARAMANGA EN TRES ALTURAS DE LAMINA DE AGUA**

María Alejandra Murcia Blanco

Juan Camilo Naranjo Martínez

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA- SECCIONAL
BUCARAMANGA

ESCUELA DE INGENIERÍAS

FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL

BUCARAMANGA

2019

**EVALUACION DEL COMPORTAMIENTO DE LA COAGULACION-
FLOCULACION PARA LA CALIDAD DE AGUA DEL EMBALSE DE
BUCARAMANGA EN TRES ALTURAS DE LAMINA DE AGUA**

María Alejandra Murcia Blanco

Juan Camilo Naranjo Martínez

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

INGENIERO(A) AMBIENTAL

Director MS c. Álvaro Andrés Cajigas Cerón

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA – SECCIONAL BUCARAMANGA

ESCUELA DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL

BUCARAMANGA

2019

Agradecimientos

A mi compañero Juan Camilo Naranjo por su compañía, entusiasmo y por esa gran disciplina adquirida a lo largo de los años, reflejada en el apoyo incondicional en el presente proyecto, a Mariela Blanco mi madre por sus consejos, su compañía y su dedicación a la familia, a Tulio Murcia mi padre por sus alientos de seguir adelante en busca de los sueños planteados, a Paula Murcia mi hermana por demostrarme lo fuerte y lo lejos que puede llegar una mujer inteligente como lo es ella, a Alejandro Murcia mi hermano por acudir en momentos de dificultad y por ser esa persona carismática de la familia, a Haydé Quiroga mi madrina por su gran e indispensable voluntad y constante apoyo, a Elizabeth Blanco mi tía por su preocupación, amor y su inquebrantable enseñanza de Fe, a Gonzalo Ariza mi mejor amigo por permanecer en la sencillez y formación de una gran amistad, a todas las personas que llegaron de una u otra manera a entregarme un granito de arena que se fue edificando en el transcurso de mi carrera profesional. Finalmente, a mi director de proyecto Álvaro Cajigas por su aceptación, dedicación y compromiso adquirido en el presente proyecto, a todo el personal de la planta Bosconia y del embalse de Bucaramanga por su acogida, enseñanza, paciencia y tiempo entregado.

María Alejandra Murcia Blanco

Agradecimientos

A mi compañera Alejandra Murcia gracias por su dedicación, su voluntad, su apoyo completo y su magnífica entrega hacia el proyecto realizado, a mi familia por sus consejos, su paciencia y su interés en mi bienestar, a mí mismo por mi responsabilidad y dedicación, al profe y director Álvaro Cajigas por su guía y su tiempo, a todo el personal de la Planta Bosconia y del embalse Bucaramanga por su bienvenida, su ayuda y hospitalidad, a Naidú por cada colaboración brindada hacia nosotros, a mis evaluadoras por sus correcciones hechas para que el proyecto fuese mejor.

Juan Camilo Naranjo Martínez

Tabla de Contenidos

Introducción.....	10
Capítulo 1 Objetivos.....	11
Objetivo general	11
Objetivos específicos	11
Capítulo 2 Marco teórico	12
Generalidades de un embalse	12
Ventajas de abastecimiento de agua por embalse.....	14
Desventajas de abastecimiento de agua por embalse.....	14
Generalidades de la planta Angelinos	14
Proceso de tratabilidad de agua potable	15
Prueba de jarras.....	15
Mecanismos de desestabilización de coloides en la coagulación.....	16
Coagulación por barrido.....	16
Compresión a doble capa.....	16
Absorción neutralización de cargas.....	16
Adsorción y puente.....	16
Variabilidad en los parámetros fisicoquímicos de un embalse.....	17
Dureza.....	17
Alcalinidad.....	17
Conductividad.....	17
pH.....	17
Turbidez.....	18
Color aparente.....	18
Oxígeno disuelto.....	18
Temperatura.....	18
Diagramas de coagulación para turbiedades bajas.....	20
Floculación y ecuaciones aplicadas.....	20

Capítulo 3 Metodología	22
Evaluación la variabilidad de la calidad de agua del embalse de Bucaramanga entres alturas de lámina de agua.....	22
Determinación de la zona de coagulación óptima de tres tipos de coagulante para la calidad de agua en estudio.....	23
Establecimiento la relación optima gradiente-tiempo de floculación para la calidad de agua en estudio.....	26
Capítulo 4 Resultados y discusión	27
Análisis de varianza (ANOVA) para cada parámetro fisicoquímico en las tres alturas de lámina de agua (Compuertas).....	27
Determinación la zona de coagulación óptima de tres tipos de coagulante para la calidad de agua en estudio.....	30
Delimitación de la relación optima gradiente-tiempo de floculación para la calidad de agua en estudio.....	47
Capítulo 5 Conclusiones.....	51
Capítulo 6 Recomendaciones	52
Capítulo 7 Bibliografía	53
Capítulo 8 Anexos.....	58

Lista de tablas y gráficas

Tabla 1. Parámetros fisicoquímicos iniciales y equipos de medición.....	23
Tabla 2: Distribución de la Dosis de coagulante.....	24
Tabla 3: Determinación del gradiente y tiempo óptimo de floculación.....	26
Tabla 4: Análisis de varianza para pH.....	27
Tabla 4: Análisis de varianza para Temperatura.....	27
Tabla 6: Análisis de varianza para Color Aparente.....	28
Tabla 7: Análisis de varianza para Oxígeno Disuelto.....	28
Tabla 8: Análisis de varianza para Conductividad.....	28
Tabla 9: Análisis de varianza para Alcalinidad.....	29
Tabla 10: Análisis de varianza para Dureza.....	29
Tabla 11: Análisis de varianza para Turbidez.....	29
Tabla 12: Zona de coagulación vs Lámina de agua.....	46
Tabla 13: Porcentaje de turbidez residual para las relaciones Gradiente-Tiempo evaluadas.....	46
Grafica 1: %Turbidez residual vs Revoluciones por minuto.....	48
Grafica 2: LOG Gradiente vs LOG Tiempo de floculación.....	49
Tabla 14: Ka y Kb para las parejas óptimas.....	50

Lista de Figuras

Figura 1: Diagrama de coagulación Sulfato de Aluminio liquido compuerta 1.....	31
Figura 2: Diagrama de Color Aparente Sulfato de Aluminio liquido compuerta 1.....	31
Figura 3: Diagrama de coagulación Sulfato de Aluminio Granular compuerta 1.....	32
Figura 4: Diagrama de Color Aparente Sulfato de Aluminio Granular compuerta 1.....	33
Figura 5: Diagrama de coagulación PAC compuerta 1.....	34
Figura 6: Diagrama de Color Aparente PAC compuerta 1.....	34
Figura 7: Diagrama de coagulación Sulfato de Aluminio liquido compuerta 2.....	36
Figura 8: Diagrama de Color Aparente Sulfato de Aluminio liquido compuerta 2.....	36
Figura 9: Diagrama de coagulación Sulfato de Aluminio Granular compuerta 2.....	37
Figura 10: Diagrama de Color Aparente Sulfato de Aluminio Granular compuerta 2.....	38
Figura 11: Diagrama de coagulación PAC compuerta 2.....	39
Figura 12: Diagrama de Color Aparente PAC compuerta 2.....	39
Figura 13: Diagrama de coagulación Sulfato de Aluminio liquido compuerta 3.....	41
Figura 14: Diagrama de Color Aparente Sulfato de Aluminio liquido compuerta 3.....	41
Figura 15: Diagrama de coagulación Sulfato de Aluminio Granular compuerta 3.....	42
Figura 16: Diagrama de coagulación Sulfato de Aluminio Granular compuerta 3.....	43
Figura 17: Diagrama de coagulación PAC compuerta 3.....	44
Figura 18: Diagrama de Color Aparente PAC compuerta 3.....	45

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: EVALUACION DEL COMPORTAMIENTO DE LA COAGULACION-FLOCULACION PARA LA CALIDAD DE AGUA DEL EMBALSE DE BUCARAMANGA EN TRES ALTURAS DE LAMINA DE AGUA

AUTOR(ES): María Alejandra Murcia Blanco
Juan Camilo Naranjo Martínez

PROGRAMA: Facultad de Ingeniería Ambiental

DIRECTOR(A): Álvaro Andrés Cajigas Cerón

RESUMEN

La ciudad de Bucaramanga ha presentado gran demanda de agua potable, por lo tanto, el acueducto metropolitano de Bucaramanga decidió construir el embalse de Bucaramanga con el fin de suministrar dicha demanda por medio de un proyecto denominado planta Los Angelinos. El presente estudio tuvo como finalidad la evaluación del comportamiento de coagulación-floculación para la calidad de agua del embalse de Bucaramanga en 3 alturas de lámina de agua (compuertas) por medio de 3 diferentes fases, la primera fase comprendió el análisis de varianza (ANOVA) del agua en el embalse a través de las 3 compuertas, permitiendo registrar la variabilidad de los parámetros fisicoquímicos durante el tiempo de estudio; la segunda fase se trabajó con 3 coagulantes, sulfato de aluminio líquido, sulfato de aluminio granular y policloruro de aluminio (PAC), posibles productos a trabajar en Los Angelinos, se evaluó el efecto de los coagulantes y la modificación de pH en la calidad de agua en estudio, con el fin de encontrar aquel que demostrara un mayor rango de operación entre dosis de coagulante vs pH y mayor porcentaje de remoción en las curvas de nivel, por medio de diagramas de coagulación, demostrando allí la zona de coagulación y la tercera fase, se estimó la ecuación de Letterman que describiría el comportamiento del agua durante la etapa de floculación. Se obtuvo un 95% de similitud entre los parámetros fisicoquímicos del agua del embalse a través de sus 3 alturas, posteriormente, el producto que determinó una zona de coagulación óptima fue el PAC, finalmente se halló la ecuación $G=0,4772T=65,0429$. Se recomienda que la planta Los Angelinos trabaje con PAC, con gradientes menores a 50 s⁻¹ para generar remoción mayor al 50% y 23 s⁻¹ para una óptima remoción (85%) y seguir generando estudios sobre la calidad de agua del embalse.

PALABRAS CLAVE:

coagulación, Floculación, lámina de agua, ANOVA, fisicoquímico, coagulante

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: EVALUATION OF THE COAGULATION-FLOCCULATION BEHAVIOR PROCESSES BETWEEN 3 WATER HEIGHTS FOR THE BUCARAMANGA'S RESERVOIR WATER QUALITY

AUTHOR(S): María Alejandra Murcia Blanco
Juan Camilo Naranjo Martínez

FACULTY: Facultad de Ingeniería Ambiental

DIRECTOR: Álvaro Andrés Cajigas Cerón

ABSTRACT

The city of Bucaramanga has presented great demand of drinking water, thus, the Bucaramanga's metropolitan aqueduct decided to build the Bucaramanga's reservoir, in order to supply that demand by a project named Los Angelinos treatment plant. The purpose of this study was to evaluate the behavior of the coagulation-flocculation processes between 3 water heights (gates) for the Bucaramanga's reservoir water quality by 3 different phases, first phase comprased the analysis of variance (ANOVA) in the water for the 3 gates , allowing to register the phsycochemical parameters variability during the study time, in the second phase, 3 coagulants were worked, liquid aluminum sulfate, granular aluminum sulfate, aluminum polychloride (PAC), possible products to work in Los Angelinos, the effect of the coagulant and the pH-modification were evaluated in the water quality, in order to find that which demonstrated a wider range for coagulant dosage vs pH and a higher percentage of removal in the level curves, by coagulation diagrams, demonstrating there the coagulation zone,, in the third phase, it was estimated the Letterman equation that describes the water behavior during flocculation. Results show a 95% of similarity between phsycochemical parameters throught the 3 water heights, later, the product that showed an optimum coagulation zone was PAC, finally it was found the equation $G=0,4772T= 65,0429$. It is recommended for the Angelinos plant works with PAC, with speed gradiants smaller than $50s^{-1}$ for 50% turbidity removal and $23s^{-1}$ for an optimum percentage of removal (85%), to the plant to keeps generating studies about the reservoir water quality behavior.

KEYWORDS:

coagulation, flocculation, water height, ANOVA, phsycochemical, coagulant

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

Introducción

La regulación del caudal del río de Tona y la demanda de agua potable para ciertas localidades de la ciudad de Bucaramanga durante extensos periodos de sequía, ha implicado que el acueducto lleve a cabo la construcción del embalse de Bucaramanga, el cual provisionará el abastecimiento de aquella necesidad, para ello, actualmente se gestiona la construcción de una PTAP, (planta de tratamiento de agua potable) llamada Los Angelinos, que lleva un 20% de su construcción total. [1]

El dimensionamiento y proyección del progreso en la construcción de la planta Los Angelinos se basó en el diseño de PTAP similares de la zona. Debido a que el embalse de Bucaramanga finalizaba su construcción, no contaba con el volumen de agua necesario para su llenado y así proveer información sobre la calidad del agua. Actualmente el embalse de Bucaramanga cuenta con el volumen de agua requerido por su capacidad de diseño y puede brindar el primer estudio de operación para la PTAP Los Angelinos con base en condiciones reales del comportamiento del agua. [2]

Se realizó el estudio de variabilidad del agua cruda en las etapas de coagulación floculación para el embalse de Bucaramanga en sus tres alturas de lámina de agua, para ello, se analizó la influencia de tres coagulantes en la calidad del agua, evaluando los efectos de la dosis de coagulante y la modificación de pH mediante diagramas de coagulación y la determinación de los parámetros óptimos gradiente - tiempo en la etapa de floculación.

Capítulo 1

Objetivos

Objetivo general

Evaluar el comportamiento de la coagulación-floculación para la calidad de agua del embalse de Bucaramanga en tres alturas de lámina de agua.

Objetivos específicos

- Evaluar la variabilidad de la calidad de agua del embalse de Bucaramanga entres alturas de lámina de agua
- Determinar la zona de coagulación óptima de tres tipos de coagulante para la calidad de agua en estudio
- Establecer la relación optima gradiente-tiempo de floculación para la calidad de agua en estudio

Capítulo 2

Marco teórico

Generalidades de un embalse

Un embalse es un reservorio de agua formado por la edificación de una represa sobre el lecho de un río, la cual cierra en parte o totalmente su cauce. Se construyen para regular el caudal de un río, almacenando el agua de los periodos húmedos o lluviosos con el fin de utilizarlos en los periodos más secos, es usada también en la generación de energía eléctrica, el riego de cultivos, en el abastecimiento de agua potable para consumo humano, para el uso industrial, para permitir la navegación, diluir contaminantes, contener y atenuar los caudales extremos de las crecidas, crear espacios de esparcimiento y deportes acuáticos. [IDEAM, 2012]

Los embalses son reservorios de agua utilizados para satisfacer necesidades del medio ambiente y la sociedad. Sin embargo, estos sistemas están expuestos a la degradación ambiental, siendo la eutrofización uno de los problemas más comunes a producir impactos ecológicos, sanitarios y económicos, significativamente negativos a escala regional y local [Ibars. 2003]. Si bien, la eutrofización es parte de un proceso natural de envejecimiento de los lagos y embalses, que ocurre en forma lenta e independiente de la actividad del hombre la creciente urbanización, el desarrollo agrícola y energético, aceleran este proceso, acortando la vida útil del cuerpo de agua. Todo conlleva a que en las reservas de agua se produzcan una serie de cambios como aumento de la turbidez, mayor concentración de biomasa, plantas acuáticas y temperatura afectando de forma significativa la calidad del agua [Bonansea, Ledesma, Rodríguez, Sánchez. 2012], puesto que constituyen una discontinuidad en la dinámica fluvial. Por este motivo, el agua al salir de un embalse presenta características físicas, químicas y biológicas diferentes a las que poseía aguas arriba del mismo. En particular se ha modificado un parámetro de gran importancia en la dinámica de las comunidades fluviales y en la calidad del agua en los embalses: la temperatura [Bonansea, Ledesma, Rodríguez, Sánchez. 2012]

La característica más destacable de los embalses es la estratificación vertical del agua. Las aguas responden a los cambios climáticos, sobre todo a los cambios de temperatura, lo que determina la estacionalidad de la dinámica de estos ecosistemas; el perfil de un embalse, en general, cambia con los meses. Las variaciones más altas de temperatura se encuentran en época de verano y primavera mientras los más bajos se determinan en invierno y otoño lo que demuestra una tendencia estacional a lo largo del tiempo [Val, Niñerola, Armengol, Dolz]

Una de las principales características que se deben medir en un cuerpo de agua con posibles problemas de eutrofización es la determinación de macronutrientes como fósforo, nitrógeno, potasio, además de color, turbidez, temperatura, grado de transparencia y pH, pues estos son variables que se modifican en un embalse cuando ocurre eutrofización [De Vargas. 2008]. Es interesante establecer la relación entre el nivel eutrófico y la variabilidad climática (épocas de lluvias y sequía) y los usos del suelo de la cuenca, donde se observa como varía la temperatura y por consiguiente el oxígeno disuelto. También se puede obtener la relación existente entre la eutrofización, las características morfométricas de la cuenca (área, longitud, ancho, perímetro,

pendiente de ladera) y la carga de nutrientes que recibe el embalse. Para conocer el nivel de eutrofización de un agua determinada se suele medir el contenido de clorofila de algas en la columna de agua y este valor se combina con los parámetros mencionados anteriormente que a partir de los análisis se pueden planificar esfuerzos para mantener la calidad del agua [National Academy of Science. 2007].

Los crecimientos masivos de algas y cianobacterias que se producen por eutrofización pueden ocasionar mortandades de animales y producir malestares gastrointestinales en los seres humanos, debido a la producción de Cianotoxinas [Romero M. 2016]. De esta manera, conocer las concentraciones existentes de este compuesto en el agua, así como la profundidad máxima en la cual las comunidades algales pueden subsistir, son de suma importancia en el control y gestión de lagos y embalses [Castrillón, Giraldo. 2012]

Las dificultades que presenta un embalse son desbordamiento por un caudal mayor al soportado, sequía por condiciones climatológicas adversas, rupturas o fallas en la estructura de cimentación de la represa y eutrofización, esta última dificultad se da con mayor frecuencia y representa una alteración inherente a la construcción y a la explotación del mismo, especialmente en zonas semiáridas, con temporadas de sequía y lluvia marcadas y días soleados. La susceptibilidad de un embalse a la eutrofia se da por la carga orgánica que recibe en poco tiempo y que debe procesar y por la retención de la misma en la superficie de la cuenca y la lámina de agua. [Arboleda. 2000].

A nivel nacional se realizó un estudio en cooperación con la Universidad de Antioquia con el objetivo de analizar el comportamiento de embalses en Antioquia, se afirma que los ciclos de calentamiento y de pérdida de calor durante el día, son efecto de la temperatura de los ríos tributarios, que generan unas condiciones de estratificación diferentes a las que se encuentra en la literatura [Romero. A. 2002]. La observación de varios embalses de Empresas Públicas de Medellín ha permitido el estudio de los procesos físicos y la determinación de la dinámica de nutrientes en dichos embalses. Esto, basado en mediciones de campo y modelamiento matemático. Cada embalse se visita tres veces al año y se hace una medición detallada de perfiles de temperatura, salinidad y conductividad. El estudio tiene claridad sobre las distintas dinámicas de los embalses según las variaciones climáticas, los últimos dos años han sido muy lluviosos, han provocado que los embalses estén altos, con alta carga de sedimentos; eso tiene implicaciones en cuanto a la geomorfología del embalse. Ahora que se presenta época de sequía, se reducen los niveles de agua en los embalses, siendo un poco más claras [Pérez J. 2006].

El embalse de Bucaramanga es abastecido por el río Tona, el cual nace a más de 3800 m.s.n.m. entre los páramos de Pescadero y San Turban, [Uribe J., 2013] el agua cruda por ello es de calidad estable y confiable, sin presentar altas cargas de sedimentos [amb, 2016] abarca la construcción de una presa de tipo enrocada de concreto de 103 metros de altura que almacena un volumen de 17 millones de metros cúbicos de agua, regula un caudal de bombeo de 3200 litros por segundo y cuenta con 2.6 km de tubería de aducción. Posee 3 compuertas ubicados a diferentes alturas de lámina de agua, la compuerta número 1, también llamada toma de fondo, la compuerta número 2 o toma de medio y finalmente la compuerta número 3 o toma superficial, cada compuerta permite el curso del agua a la llave de toma de muestra y control. El tipo de agua que presenta es de baja concentración de coloides y con altos valores de alcalinidad, condiciones idóneas para la formación inmediata de precipitado y coagulación por barrido. [Chulluncuy C. 2011]

La función del embalse es proveer agua cruda proveniente del río Tona a la planta de tratamiento de agua potable Los Angelinos y apoyar el caudal suministrado de la planta Bosconia.

Ventajas de abastecimiento de agua por embalses

El represamiento de agua en embalses para consumo humano es el método de abastecimiento más usado en el país, al ser una fuente de suministro de agua confiable que se puede manejar con cierto grado de facilidad. Los embalses resultan de gran utilidad para satisfacer la demanda en épocas de sequía, ya que al captar agua lluvia y los caudales de exceso de los afluentes, permite concentrar grandes cantidades de agua que pueden ser usadas tiempo después, tanto en el ámbito de consumo humano como en diferentes actividades de producción agraria. La sedimentación natural que ocurre dentro de un embalse profiere a esta, agua superficial clara y con pocas partículas sólidas flotantes. [Lozano W. 2015]

Desventajas de abastecimiento de agua por embalses

Un embalse al ser un cuerpo de agua a cielo abierto está sujeto a las condiciones climáticas, una de ellas es la radiación solar, que trae consigo el aumento en la temperatura y ocasiona la evaporación del agua superficial, en ciertas regiones la evaporación es la responsable de la pérdida del nivel de agua en los embalses en un 20%.

Una desventaja prominente en la creación de embalses es la interrupción del ciclo de vida de las especies acuáticas que deben viajar corriente abajo para reproducirse y desovar, además de cambiar el caudal de los afluentes y efluentes causando un impacto directo en los ecosistemas dependientes de la cantidad específica de agua que poseía antes de la construcción de la represa.

Finalmente, el comportamiento de un embalse hace que sea un sedimentador natural, por lo que en el transcurso del tiempo grandes cantidades de sedimentos se forman en el fondo reduciendo la capacidad de almacenamiento de agua, evitando la salida de sedimentos y generando la necesidad de limpiar el embalse y retirar los lodos y materia orgánica. [ANIQ. 2018]

Generalidades de la planta Angelinos

El desarrollo de la estación de tratamiento de agua potable Los Angelinos está enfocada en atender el consumo de los municipios de Bucaramanga, Floridablanca y Girón. La planta tendrá una capacidad de tratamiento de 51.8 millones de litros por día y suministrará agua potable a una población de 350.000 habitantes. Angelinos se encuentra ubicada en los límites de la ciudad de Bucaramanga, Santander, y su total financiación se llevará a cabo por cuenta del Acueducto Municipal de Bucaramanga [1].

Proceso de tratabilidad de agua potable

Durante la historia de la humanidad, diferentes civilizaciones han llevado a cabo procesos para purificar el agua, en el continente asiático cerca de 4000 a.C. se hervía el agua y se dejaba exponer a la radiación solar, luego se utilizaba una barra metálica caliente y se dejaba enfriar en recipientes porosos. El antiguo Egipto se cree que fue la primera civilización en usar aluminio para tratar el agua, ya que los egipcios notaron que el aluminio permitía a las partículas sedimentarse y clarificar el agua que luego beberían. [17]

El proceso de potabilización como tal ha logrado una mejoría notable a lo largo del tiempo, hoy en día se utiliza alrededor del mundo un tipo de tratamiento convencional para la clarificación del agua, a través de cinco diferentes etapas, las cuales son:

- Coagulación
- Floculación
- Sedimentación
- Filtración
- Desinfección

Imagen 1: Proceso convencional de tratamiento de agua potable



Fuente: (Romero, 1999)

La clarificación del agua permite la eliminación de sólidos suspendidos, junto con organismos patógenos que se encuentran unidos a los sólidos, también permite realizar la correlación de características fisicoquímicas que hacen que el agua no sea apta para consumo humano. [17]

Prueba de jarras

También llamada ensayo de jarras, es un proceso sencillo, unitario y principal prueba para determinar la dosis de coagulante que será usado en una planta de tratamiento de agua potable (PTAP) o de purificación de aguas, son simulaciones a escala laboratorio que recrean las etapas de operación de una planta convencional (coagulación, floculación, sedimentación). [18]

Mecanismos de desestabilización de coloides en la coagulación

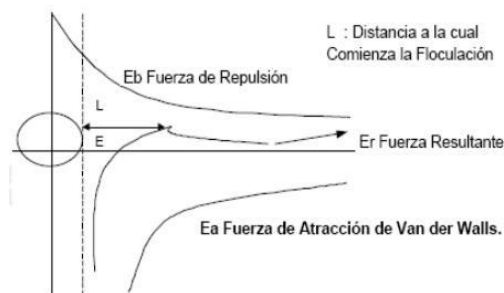
Coagulación por barrido

Esta se presenta cuando el agua tiene pocos sedimentos y posee baja turbidez (agua clara), por lo tanto, la cantidad de partículas coloidales es pequeña, las partículas son aglomeradas usando una sobresaturación de sulfato de aluminio u otro producto de coagulación. [19]

Compresión a doble capa

A partir de la incorporación de iones de carga diferente a los coloides se genera una capa difusa comprimida que disminuye 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" [20].

Imagen 2: Sistema de compresión a doble capa



Fuente: Ruiz E. 2012

Absorción y Neutralización de cargas

Los coloides con carga negativa atraen a los iones de carga positiva que se encuentran dentro de la solución coagulante y forman una capa adherente al coloide [20].

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. [20]

Variabilidad de los parámetros fisicoquímicos en un embalse

Dureza

La dureza equivale a la sumatoria de varias concentraciones de minerales presentes en un cuerpo de agua, generalmente sales de magnesio y de carbonato de calcio (CaCO_3). La Organización Mundial de la Salud ha organizado la dureza del agua cruda presente en ríos, embalses y demás fuentes de abastecimiento humano en 4 diferentes escalas: muy duras (>180 mg/L CaCO_3), duras (120 a 180 mg/L CaCO_3), moderadamente duras (60 a 120 mg/L CaCO_3), blandas (<60 mg/L CaCO_3). [21]

Alcalinidad

Es la capacidad que tienen las bases de neutralizar ácidos en el agua, a su vez representa la habilidad que tiene un cuerpo de agua en resistir cambios en su pH natural. Primordialmente los elementos buffer presentes son bicarbonatos, carbonatos y en algunos casos hidróxidos. Aguas con baja alcalinidad (<20 mg/L) son muy susceptibles a cambios de pH, por el contrario, cuando se presenta alta alcalinidad (>200 mg/L) la dificultad para alterar condiciones como pH es más elevada. Generalmente el rango normal de alcalinidad para embalses y ríos se encuentra entre 100 a 200 mg/L. [22]

Conductividad

Es la capacidad que tiene el agua de transportar corrientes eléctricas, es alterada por diferentes compuestos, como materia inorgánica disuelta, algunos elementos con iones negativos, generalmente aumentan la conductividad en cuerpos de agua, por otra parte, compuestos orgánicos disueltos como grasas o alcoholes reducen la conductividad. La temperatura es un factor que afecta directamente la capacidad del agua de conducir cargas eléctricas, entre más elevada sea esta, mas conductividad presentará el cuerpo acuoso. Bajas concentraciones de conductividad (<50 $\mu\text{hos/cm}$) o muy altas concentraciones (>500 $\mu\text{hos/cm}$) representan un hábitat de difícil supervivencia para ciertas especies de peces e invertebrados, el rango normal de conductividad en agua cruda varía entre 50 a 500 $\mu\text{hos/cm}$. [23]

pH

El pH es una medición de la actividad del ion hidrogeno (H^+). Generalmente un agua con pH menor a 7 es considerada ácida, así como mayor a 7 básica. El rango establecido de ph para embalses alimentados por ríos es de 6,5 a 8,5. [24]

Turbidez

Es la propiedad óptica causante que la luz sea absorbida o dispersada en una muestra en vez de atravesar directamente en forma de líneas. [25]. Rangos de turbidez menor a 2 NTU son considerados mínimos al estar dentro de los lineamientos que ha establecido la Organización Mundial de la Salud, rangos bajos y medios pueden considerarse de 10 a 100 NTU, respectivamente, dependiendo de la cercanía que tenga un dato a los extremos del rango, unidades mayores a 100 NTU son consideradas como altas [26]. los sedimentos presentes en masas de agua pueden quedar atrapados en las tuberías de aducción, por lo que tendrán incidencia directa en la turbidez medida para el control de la calidad de agua [27].

Color Aparente

Es la medición de color en agua cuando esta posee materia suspendida o flotante, describe el aspecto del agua sin haber removido turbidez [28]. Cuerpos de agua con grandes concentraciones de color aparente deben alcanzar valores mayores a 25 mg/L PtCo, por el contrario, para ser considerado como agua con bajo color, la concentración no debe exceder 5 mg/L PtCo [29].

Oxígeno disuelto

Es provocado por la aireación que reciben las cascadas y caídas de agua durante el tiempo que están en contacto con el aire, así como el oxígeno disuelto en agua producido por las plantas y algas en el proceso de fotosíntesis. Factores como la temperatura alteran de forma inmediata al oxígeno disuelto, una temperatura elevada crea un ambiente de estrés y alto consumo de oxígeno por los organismos acuáticos presentes, de igual forma sobrepoblación de plantas u otros seres vivos pueden reducir drásticamente el oxígeno al ser necesario para su propio metabolismo. Valores < 3mg/L son escasos para albergar vida en general, de 3 a 5mg/L puede aún presentarse vida acuática, pero sería por poco tiempo (12-24h) y bajo condiciones de estrés, 6mg/L es el mínimo disponible para que algunas especies puedan sobrevivir, valores >7mg/L permiten la sostenibilidad de las especies vivas y de la reproducción y crecimiento de más individuos, valores >9mg/L permiten gran abundancia de vida acuática. [30]

Temperatura

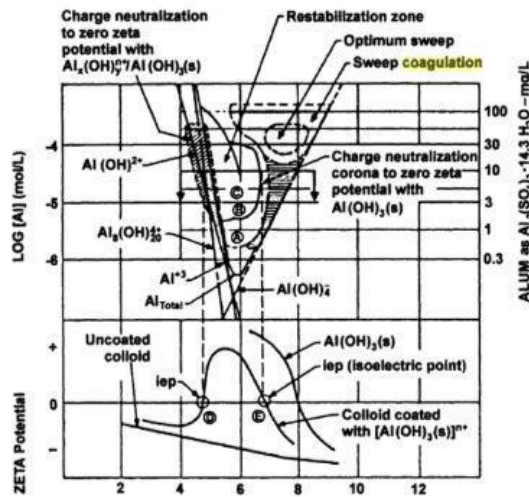
Es una propiedad física del agua que expresa la calidez o frialdad de sí misma, también es conocida como la energía térmica presente en un lugar. Para las bacterias el rango de temperatura es mucho mayor de 10 a 35°C y su actividad metabólica podrá continuar, pero en general para plantas y peces la temperatura debe estar entre 20 a 25°C, este rango permite un adecuado desarrollo de toda especie acuática y mantiene el oxígeno disuelto en suficientes concentraciones para la actividad metabólica de las especies, temperaturas menores a 20°C son dañinas para plantas, especialmente para las de origen tropical, así mismo temperaturas mayores a 30° reducen drásticamente el oxígeno disuelto, ya que el aumento en la energía cinética dispara el metabolismo de los seres vivos. [31]

Diagramas de coagulación para turbiedades bajas

Durante el diseño de un diagrama de coagulación es de suma importancia el control sobre factores como pH y la alcalinidad, la remoción de turbidez se ve afectada por la variación de dichos parámetros fisicoquímicos. El pH determina el rango de efecto que un coagulante agregado puede tener, además de permitir altas remociones de turbidez cuando el espacio de operación tanto del pH como del coagulante se mantienen en sincronía. La alcalinidad controla la variación de pH y determina si es necesario el uso de ácidos o bases para alterar el pH inicial del agua, así mismo los cationes divalentes afectan directamente y en gran medida las dosis de coagulante requerida para la remoción de turbidez, frecuentemente los cationes divalentes modifican el rango de acción del pH en términos de remoción efectiva, además de disminuir la dosificación de coagulante necesaria.

[32]. Existen ciertas recomendaciones a seguir para la elaboración de diagramas de coagulación en embalses de baja turbidez, las más destacables son el uso de bajas dosis de coagulantes, entre 1mg/L a 20mg/L y la alteración de pH a través de rangos amplios, constantemente establecidos entre 4 y 10 unidades. [33]

Imagen 3: Diagrama de coagulación teórico



Fuente: Faust&Aly, 19

Floculación y ecuaciones aplicadas

Es un proceso de mezcla lenta que tiene como objetivo aumentar el tamaño de partículas microscópicas a formaciones visibles en suspensión llamados “floculos”, las colisiones entre las pequeñas partículas producto de la agitación a baja velocidad junto con la adición de agentes coagulantes son los que permiten el acercamiento entre sedimentos [34], además, la interacción electroestática que surge entre los floculos y los agentes de coagulación-floculación permite medir la proximidad o repulsión que tendrán dos partículas, dicho mecanismo está definido como potencial Z [35].

El proceso de floculación puede ser dividido en dos tipos, pericinético y ortocinético, la floculación pericinética se basa en el movimiento Browniano de las partículas, de carácter aleatorio causado por el rápido e inesperado bombardeo de las moléculas en el agua, la floculación ortocinética se logra a partir del movimiento y colisión de las partículas por medio de un agitador o granel, los cambios en la velocidad de movimiento son identificados por un gradiente de velocidad G (S^{-1}) [36].

Modelos matemáticos se han usado para describir el movimiento cinético durante la floculación, con el propósito de evaluar el desempeño en los fenómenos de asociación y ruptura de floculos, estos fenómenos pueden ser representados por coeficientes (K_a y K_b , respectivamente) que generalizan los mecanismos de combinación y transporte en la floculación [37]. La asociación en la dinámica de los floculos dependerá de la frecuencia de colisión entre partículas y la eficiente desestabilización de sólidos en coagulación [38], en el caso de la ruptura, la literatura sugiere que dependerá netamente de la turbidez en el agua, ya que, si hay bajas turbiedades, el tamaño del floc será menor [39], aunque algunos autores consideran que la ruptura se trata de una constante por completo experimental [40].

Argaman y Kaufman propusieron un modelo para definir el comportamiento de la floculación ortocinética, donde se involucran los fenómenos de asociación y ruptura, principales causantes de los cambios en las concentraciones de las partículas sedimentables durante la floculación [41], la ecuación que define esta hipótesis es la siguiente:

$$\frac{dN_o}{dt} = -f(K_a - K_b) \quad)$$

Fuente: Argaman&Kaufman. (1970)

Andrew Villegas y Letterman denotaron que para obtener óptimas condiciones durante la floculación con respecto al gradiente de velocidad y el tiempo de floculación era idóneo seguir el siguiente modelo matemático [42]:

$$G^n T = K$$

Fuente: Villegas&Letterman. (1976)

Di Bernardo expuso una forma de encontrar los coeficientes de asociación y ruptura usando los datos obtenidos a partir de ensayos de jarras [43], la ecuación es la siguiente:

$$(G_{\text{opt}} - G_{\text{min}})^n T = K$$

Fuente: Di Bernardo (1989).

Es de gran importancia para el diseño u operación dentro de los parámetros de la floculación el gradiente de velocidad (G) el cual define la variación de la velocidad de las partículas en el espacio [44], el modelo matemático que propone el seguimiento a dicho comportamiento es el siguiente:

$$G = \sqrt{\frac{P}{v \cdot \mu}}$$

Fuente: Camp & Stain

Un estudio para el proceso de floculación en sistemas continuos de cámaras en serie mostró la posibilidad de analizar el movimiento de las partículas durante la asociación y ruptura, utilizando el modelo de Argaman&Kaufman para la descripción de la cinética clásica arrojó que la variación en el número de cámaras de 1 a 5 y velocidades de gradiente de 20 a 60 S^{-1} pueden optimizar el proceso de floculación en un 50 a 90% [45].

Moore Caux determinó la delimitación de parámetros que actúan durante la floculación a través de modelos matemáticos, estos, fueron usados para evaluar las dimensiones dentro del proceso de mezcla lenta con respecto al gradiente de velocidad, tiempo de retención y velocidad de movimiento, proveyendo opciones de diseño para diferentes valores de velocidad en canales de la mano con diferentes características de floculos y para diferentes anchos de canales en relación con las profundidades de flujo [46].

Capítulo 3

Metodología

El estudio del presente proyecto se ejecutó en el laboratorio de la PTAP de Bosconia, haciendo uso de sus equipos de medición y reactivos, siendo esto suministrado y apoyado por el amb a excepción del equipo de jarras, suministrado por la UPB. El proyecto contó con tres fases de procesos para cumplir los objetivos planteados, las cuales fueron realizadas para tres diferentes alturas de lámina de agua (compuerta 1, compuerta 2 y compuerta 3), además se hizo uso de tres coagulantes para la fase 2 y fase 3 como sulfato de aluminio líquido tipo B, sulfato de aluminio granular tipo B y policloruro de aluminio PAC (ver ficha técnica, Anexos).

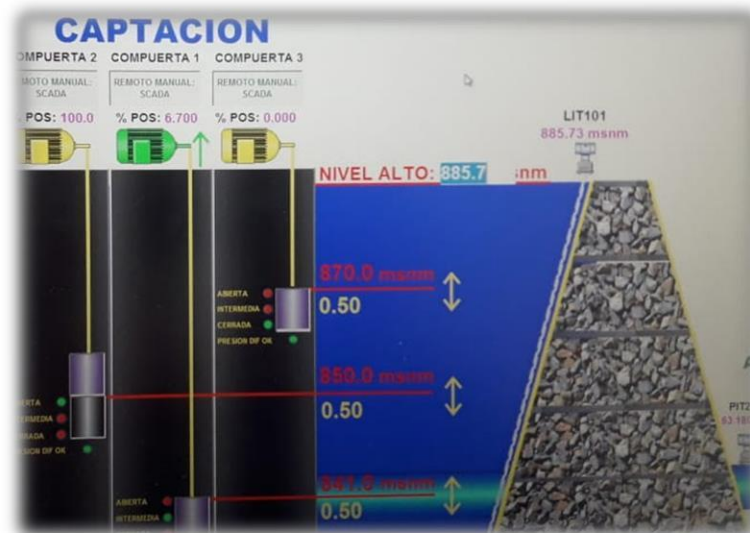
Fase 1: Evaluar la variabilidad de la calidad de agua del embalse de Bucaramanga en tres alturas de lámina de agua

La fase 1 consistió en evaluar la calidad de agua del embalse de Bucaramanga con duración de nueve semanas, dos veces por semana mediante la realización de toma de muestras para las tres compuertas, las cuales se registraron bajo parámetros físico-químicos y posteriormente se desarrolló el análisis estadístico (ANOVA) con que se determinó la variabilidad de la calidad de agua.

- **Toma de muestra**

Se realizó la toma de muestra por cada día de estudio establecido, con la totalidad de 100 L/día por cada una de las tres compuertas como muestra la **Imagen 4**.

Imagen 4: Alturas de lámina de agua



Fuente: amb

La **Imagen 4** muestra un esquema del embalse y las diferentes láminas de agua; la compuerta 2 ubicada a una altura de 850 m.s.n.m, la compuerta 1 ubicada a una altura de 841 m.s.n.m y por último la compuerta 3 ubicada a una altura de 870 m.s.n.m. Dichas compuertas están conectadas a una tubería de aducción que se usó como toma de muestras y corresponden a la futura captación de la PTAP Los Angelinos.

- **Registro de parámetros fisicoquímicos iniciales**

Las muestras fueron llevadas a la PTAP Bosconia dónde se realizó mezcla homogénea del agua a tratar y de allí se tomaron 300 ml de muestra para proceder a la medición de los parámetros fisicoquímicos enunciados en la **tabla 1**.

Tabla 1. Parámetros fisicoquímicos iniciales y equipos de medición

Parámetro	Equipo	Método	Frecuencia
pH	Phmetro / PB-04	Electrométrico	2 veces/semana
Turbidez	Turbidimetro TL2300	Nefelómetros electrónicos	2 veces/semana
Color Aparente	Espectrofotómetro DR 2800	2120B	2 veces/semana
Conductividad	Conductimetro Cond 3151	Electrométrico	2 veces/semana
Oxígeno Disuelto	Multiparámetro HQ40d	Electrométrico	2 veces/semana
Alcalinidad	876 Dosimat plus	XDOS	2 veces/semana
Dureza	876 Dosimat plus	XDOS	2 veces/semana

Fuente: Autores

Para la evaluación de la variabilidad de cada uno de los parámetros fisicoquímicos como datos iniciales registrados en las tres columnas de lámina de agua del embalse de Bucaramanga se escogió el método estadístico ANOVA (analysis of variance), su importancia yace en permitir la comprobación de cambios significativos entre dos o más variables.

La variable Fteorico en el ANOVA se escogió según la tabla de FISHER para distribución F, teniendo como nivel de significancia $\alpha= 0,05$ y con grados de libertad para numerador y denominador hallados respectivamente en totales y medias. (Ver Anexos 4 - 11).

Fase 2: Determinación de la zona de coagulación óptima de tres tipos de coagulante para la calidad de agua en estudio

La fase dos del proyecto tuvo como finalidad realizar la evaluación detallada del comportamiento respecto a la modificación del pH, dosis y tipo de coagulante en el agua del embalse de Bucaramanga, mediante el desarrollo de prueba de jarras se obtuvieron los datos necesarios para la construcción de los diagramas de coagulación.

- **Rango de dosis por tipo de coagulante**

El rango de dosificación por coagulante se determinó acorde al volumen de coagulante necesario en la preparación de la solución madre a dosificar, hallado a partir de la ecuación 1

$$\rho_1 * c_1 * v_1 = \rho_2 * c_2 * v_2 \text{ (Ecuación 1)}$$

ρ_1 : la densidad del coagulante implementado

c_1 : la concentración de alúmina del coagulante

v_1 : el volumen desconocido de coagulante a suministrar en la solución

ρ_2 : como la densidad del agua

c_2 : la concentración de solución madre en el agua cruda escogida al 1% para las tres compuertas

v_2 : el volumen requerido de solución madre a dosificar durante el día de operación.

A continuación, se hallaron las dosis de coagulante por medio de la ecuación 2, que finalmente se usó en la prueba de jarras

$$v_1 * c_1 = v_2 * c_2 \text{ (Ecuación 2)}$$

v_1 el volumen de dosis por coagulante a encontrar

c_1 la concentración de la solución madre

v_2 el volumen de agua cruda por jarra siendo este 1 litro

c_2 la concentración de alúmina que contiene cada coagulante.

La distribución de las dosis de coagulante en base alúmina agregado es la misma para las tres compuertas como se muestra en la **tabla 2**. La dosis de coagulante se adicionó casi inmediatamente iniciada la mezcla rápida.

Tabla 2: Distribución de la Dosis de coagulante

Tipos de coagulante	Dosis de coagulante (mg/L) en base de Alúmina (Al ₂ O ₃)											
	0,3	0,6	0,9	1,2	1,5	1,8	2,1	2,4	2,7	3	3,3	3,6
Sulfato de Aluminio Líquido	0,3	0,6	0,9	1,2	1,5	1,8	2,1	2,4	2,7	3	3,3	3,6
Sulfato de Aluminio Granular	0,4	0,8	1,2	1,6	2	2,4	2,8	3,2	3,6	4	4,4	4,8
PAC	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2	2,2	2,4

Fuente: Autores

- **Manejo de los Equipos de jarras**

Imagen 5: Equipo de jarras Phipps & Bird



Fuente: Autores

Los equipos fueron programados siguiendo instrucciones del manual de operación proveniente de fábrica, siendo así, en mezcla rápida con tiempo de 1 minuto y 300 RPM, para mezcla lenta con tiempo de 15 minutos y 30 RPM, finalizando con 15 minutos para sedimentación a 0 RPM. Dicha programación se realizó para cada día de operación en la fase dos (nueve días), en total se trabajó con dos equipos de jarras, para un total de 12 jarras por prueba, completando 7 pruebas por día de la fase dos.

cada jarra fue llenada con volumen de 1 litro debido a la concentración trabajada por coagulante del 1%. El proceso llevado a cabo luego de haber programado los equipos de jarras fue la modificación de pH, agregando 3 ml de ácido clorhídrico y 1ml de hidróxido de sodio para reducir o aumentar respectivamente 0,5 unidades el pH inicial, los valores tomados sin alteración fueron marcados como línea de tendencia (blanco), de esta forma el rango de operación abarcó desde 6 hasta 9 unidades de pH. Culminado el minuto de la etapa de mezcla rápida, se tomó el pH de cada prueba, para un total de 12 datos por ensayo, este proceso se repitió hasta obtener 12 datos por pH en el rango anteriormente mencionado, de 6 a 9 unidades. Posteriormente se midió la turbidez final y el color aparente, asimismo 12 datos por cada ensayo, finalizando con 84 datos totales de cada parámetro para la construcción requerida de diagramas de coagulación y diagramas de color aparente.

- **Construcción Diagramas de coagulación y Diagramas de color aparente**

Se utilizó el software Surfer 13 versión estudiantes para el diseño de cada diagrama, estos fueron elaborados a partir de las dosis de coagulante mostradas en la **tabla 2** y los resultados finales de pH, turbidez y color aparente, se realizó un diagrama por cada coagulante en cada compuerta, en totalidad fueron realizados 9 diagramas de coagulación y 9 diagramas de color aparente con el fin de mostrar las curvas de nivel representativas sobre la mayor remoción de turbidez final.

Fase 3: Establecimiento de la relación óptima gradiente-tiempo de floculación para la calidad de agua en estudio

En la fase número 3 se dió cumplimiento al último objetivo planteado, el proceso de evaluación se realizó utilizando el mismo volumen de agua cruda (1L) anteriormente usado en los equipos de jarras de la fase anterior, así mismo, se usó la dosis óptima de PAC para la compuerta 2 con la misma velocidad de mezcla rápida 300RPM empleada a lo largo del estudio. Se escogió únicamente el coagulante PAC, por presentar curvas de mayor remoción de turbidez final a dosis menores en comparación de los demás coagulantes, demostrando más afinidad con el tipo de agua que tiene el embalse de Bucaramanga y la compuerta 2 por ser ese punto medio en compartir las aguas de la compuerta 1 y 3 teniendo como base que no hay diferencias significativas en los parámetros físico-químicos.

- **Variación de gradientes de velocidad y tiempos de floculación**

Se emplearon 6 diferentes RPM (5, 15, 30, 40, 60 y 70 RPM) para mezcla lenta, cada uno evaluado en los siguientes tiempos (1, 10, 20, 30, 40, 50, y 60 minutos), culminado cada tiempo de floculación, se retiraban las jarras para proceder a la etapa de sedimentación con duración de 15 minutos, es decir, transcurrido 1 minuto de floculación, se retiró la primera jarra para dar paso a la sedimentación y así dejar que las demás jarras cumplieran con los tiempos establecidos de floculación, finalmente se tomó la turbidez final para establecer la construcción de graficas de floculación y determinar la relación gradiente-tiempo óptimo. El formato utilizado en la recopilación de datos es apreciable en la **tabla 3**.

Tabla 3: Determinación del gradiente y tiempo óptimo de floculación.

Revoluciones por Minuto		Tiempo de floculación (Minutos)						
RPM	Gradiente (s-1)	1	10	20	30	40	50	60
5	3							
15	10							
30	23							
40	30							
60	52							
70	61							

Fuente: Autores

- **Construcción de graficas representativas y aplicación de modelos matemáticos**

Se graficó el porcentaje de turbidez removida vs gradientes de floculación para cada tiempo de mezcla lenta, su respectiva linealización aplicando logaritmo al tiempo de floculación y al gradiente de velocidad, a partir de la gráfica linealizada se determinó la ecuación de la recta y la ecuación de Letterman correspondiente, los K_a y K_b para cada relación gradiente-tiempo óptimo fueron hallados usando el software Engineering Equation Solver (EES 32).

Resultados y Discusión

Análisis de varianza (ANOVA) para cada parámetro fisicoquímico en las tres alturas de lámina de agua (Compuertas)

Debido al número equitativo de datos por cada parámetro fisicoquímico, estos compartieron el mismo valor de $F_{teorico} = 8,70$ en el nivel de significancia $\alpha: 0,05$, así como los grados de libertad: 15 para el denominador y 3 para el numerador. Posteriormente se expresa el análisis de varianza respectivo por cada parámetro fisicoquímico entre las tres láminas de agua.

Para el parámetro pH se obtuvo que $F_{calculada} = 1,2649357 < F_{teorico} = 8,70$. A continuación se presenta su respectiva **tabla 4**

Tabla 4: Análisis de varianza para pH

Fuente de variacion	Grados de libertad (gl)	Suma de Cuadrados (SC)	Varianza o Cuadrados Medios (CM)	F calculada
Tratamientos	3	0,0745333	0,0372666	1,2649357
Error Residual	15	0,4419195	0,0294613	
Total	17	0,5164528		

Fuente: Autores.

Para el parámetro Temperatura se obtuvo que $F_{calculada} = 6,61790017 < F_{teorico} = 8,70$. A continuación se presenta su respectiva **tabla 5**

Tabla 5: Análisis de varianza para Temperatura

Fuente de variación	Grados de libertad (gl)	Suma de Cuadrados (SC)	Varianza o Cuadrados Medios (CM)	F calculada
Tratamiento	3	0,85444444	0,42722222	6,61790017
Error residual	15	0,96833333	0,06455556	
Total	17	1,82277778		

Fuente: Autores

Para el parámetro Color Aparente se obtuvo que $F_{calculada}=8,16417533 < F_{teorico}= 8,70$. A continuación se presenta su respectiva **tabla 6**

Tabla 6: Análisis de varianza para Color Aparente

Fuente de variación	Grados de libertad (gl)	Suma de Cuadrados (SC)	Varianza o Cuadrados Medios (CM)	F calculada
Tratamiento	3	21543,4444	10771,7222	8,16417533
Error residual	15	19790,8333	1319,38889	
Total	17	41334,2778		

Fuente: Autores

Para el parámetro Oxígeno Disuelto se obtuvo que $F_{calculada}=0,48300935 < F_{teorico}= 8,70$. A continuación se presenta su respectiva **tabla 7**

Tabla 7: Análisis de varianza para Oxígeno Disuelto

Fuente de variación	Grados de libertad (gl)	Suma de Cuadrados (SC)	Varianza o Cuadrados Medios (CM)	F calculada
Tratamiento	3	0,0217	0,01085	0,48300935
Error residual	15	0,33695	0,02246333	
Total	17	0,35865		

Fuente: Autores

Para el parámetro Conductividad se obtuvo que $F_{calculada}=0,75638448 < F_{teorico}= 8,70$. A continuación se presenta su respectiva **tabla 8**

Tabla 8: Análisis de varianza para Conductividad

Fuente de variación	Grados de libertad (gl)	Suma de Cuadrados (SC)	Varianza o Cuadrados Medios (CM)	F calculada
Tratamiento	3	76	38	0,75638448
Error residual	15	753,585	50,239	
Total	17	829,585		

Fuente: Autores

Para el parámetro Alcalinidad se obtuvo que $F_{calculada}=8,36785074 < F_{teorico}= 8,70$. A continuación se presenta su respectiva **tabla 9**

Tabla 9: Análisis de varianza Alcalinidad

Fuente de variación	Grados de libertad (gl)	Suma de Cuadrados (SC)	Varianza o Cuadrados Medios (CM)	F calculada
Tratamiento	3	15049,2754	7524,63772	8,36785074
Error residual	15	13488,4774	899,231828	
Total	17	28537,7529		

Fuente: Autores

Para el parámetro Dureza se obtuvo que $F_{calculada}=1,83039789 < F_{teorico}= 8,70$. A continuación se presenta su respectiva **tabla 10**

Tabla 10: Análisis de varianza Dureza

Fuente de variación	Grados de libertad (gl)	Suma de Cuadrados (SC)	Varianza o Cuadrados Medios (CM)	F calculada
Tratamiento	3	10505,1725	5252,58624	1,83039789
Error residual	15	43044,6264	2869,64176	
Total	17	53549,7989		

Fuente: Autores

Para el parámetro Turbidez se obtuvo que $F_{calculada}=5,52697684 < F_{teorico}= 8,70$. A continuación se presenta su respectiva **tabla 11**

Tabla 11: Análisis de varianza Turbidez

Fuente de variación	Grados de libertad (gl)	Suma de Cuadrados (SC)	Varianza o Cuadrados Medios (CM)	F calculada
Tratamiento	3	39,7364333	19,8682167	5,52697684
Error residual	15	53,9215667	3,59477111	
Total	17	93,658		

Fuente: Autores

Como se puede apreciar a través de las **tablas4-11** mostradas anteriormente, se presentó para cada parámetro sin excepción la tendencia absoluta $F_{calculada} < F_{teorico}$, por lo tanto, se acepta la hipótesis nula H_0 , el modelo estadístico demuestra que hay un 95% de similitud en los datos obtenidos de cada parámetro fisicoquímico entre las tres alturas de lámina de agua, debido a la buena calidad y bajas cargas de sedimentos en el caudal del río Tona, el embalse de Bucaramanga tendrá condiciones similares, puesto que el estado del agua de un río y el cuerpo de agua que es abastecido por este, presentarán semejanzas en el comportamiento de los parámetros fisicoquímicos [47]. Las tuberías de muestreo y aducción tienen una incidencia directa en la variabilidad de la turbidez, ya que ciertos sedimentos pueden quedar adheridos en ellas al transcurrir desde la bocatoma hasta el punto de muestra [48].

La posibilidad de repetición para las fases evaluadas seguidamente es rechazada debido a la aceptación de la hipótesis $H_0: C_1 = C_2 = C_3$, la variabilidad en el comportamiento del agua entre las tres compuertas se mantiene sin cambios significativos, por ende, no es necesaria la repetición del proceso.

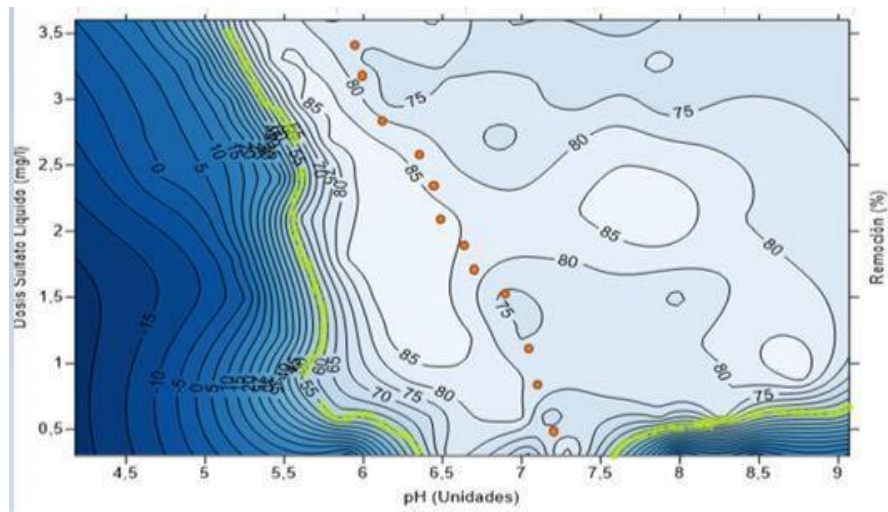
Sé destaca durante el tiempo de estudio, la presencia de dos periodos climáticos, sequía y lluvia, aun así, no se evidencian cambios en el comportamiento del agua del embalse de Bucaramanga.

Determinación la zona de coagulación óptima de tres tipos de coagulante para la calidad de agua en estudio

A continuación, se presentan los diagramas de coagulación por cada coagulante en las tres alturas de lámina de agua, en estos, se relacionan parámetros tales como: tipo de coagulante, dosis de coagulante aplicado (mg/L), pH y porcentaje de remoción representado por las curvas de nivel, la línea de tendencia naranja representa los datos obtenidos sin modificación de pH, el área delimitada por la línea verde representa la zona de coagulación donde se generaron datos de turbidez final menores o iguales a 10NTU siendo este, el máximo recomendado para entrar a la fase de filtración en un tratamiento convencional de agua potable. Se realizaron diagramas de color por cada coagulante y para cada altura de lámina de agua, con el propósito de verificar que las zonas de mayor remoción coinciden con las zonas de menor presencia de color aparente.

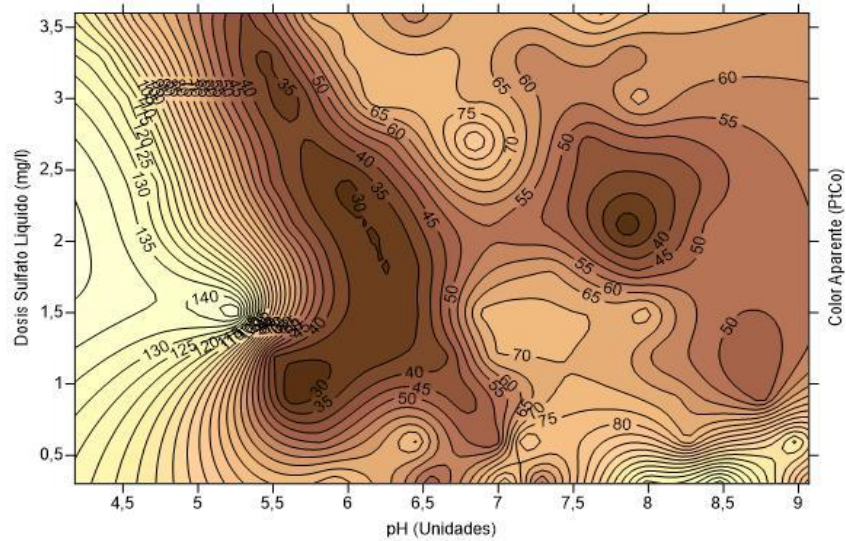
Seguidamente, son presentados los diagramas de coagulación y color para la altura de lámina de agua fondo o compuerta 1

Figura 1: Diagrama de coagulación Sulfato de Aluminio liquido compuerta 1



Fuente: Autores

Figura 2: Diagrama de color Sulfato de Aluminio liquido compuerta 1

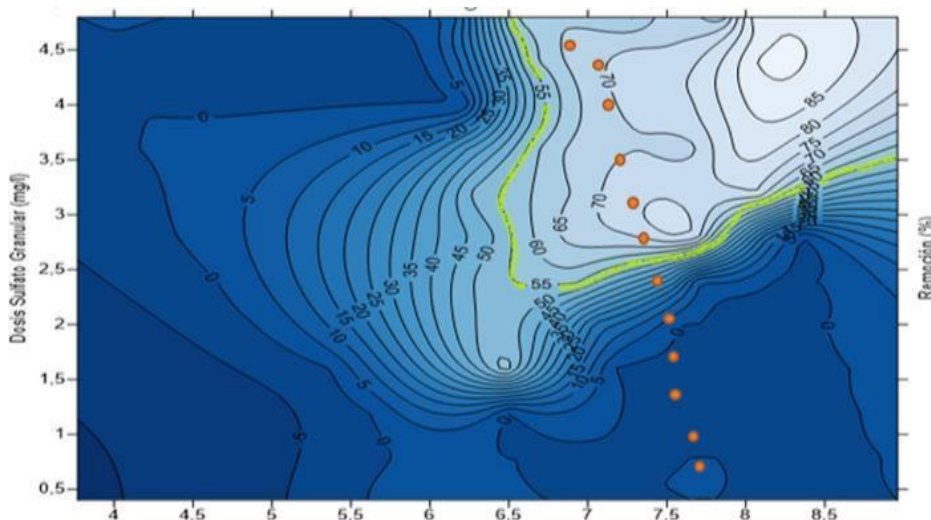


Fuente: Autores

La **figura 1** expone el comportamiento del agua en relación a diferentes dosis de sulfato de aluminio líquido y a su vez a la modificación del pH inicial, la turbidez final de 10 NTU fue obtenida con un porcentaje de remoción de 55%, área delimitada por la línea verde, esta representaría la zona de adsorción-neutralización (zona de coagulación óptima) debido a la formación de floculos generados de forma casi inmediata [49], cabe resaltar que fue posible alcanzar la mayor curva de remoción del 85% sin alterar el pH, con dosis de 2,1 mg/L, así mismo, porcentajes de remoción del 70% al 85% fueron obtenidos por medio de la modificación del pH. Los valores de pH inferiores a 5,5 representan la zona no activa, debido a esto, el volumen agregado de dosis de coagulante es irrelevante, tanto grandes como pequeñas dosis tuvieron un porcentaje de remoción menor al 50% de turbidez.

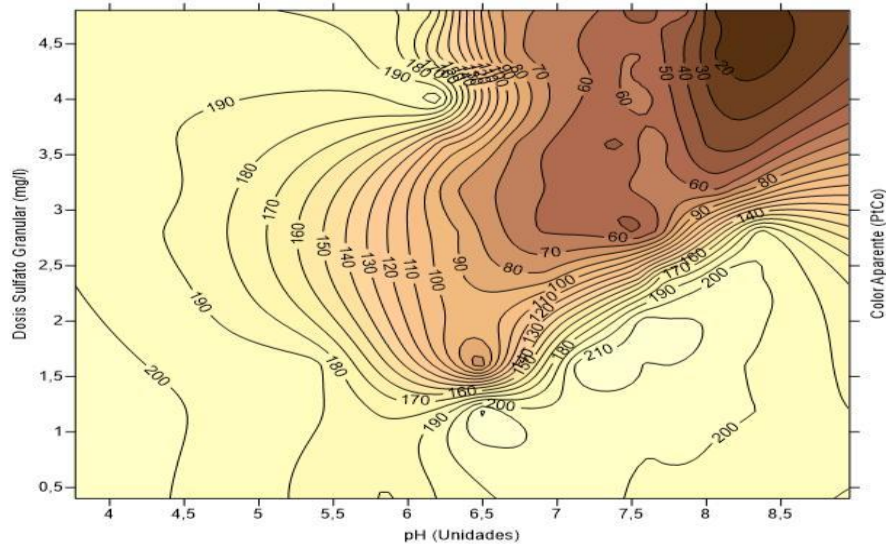
La **figura 2** representa la remoción de color aparente a diferentes dosis de sulfato de aluminio líquido y a su vez a la modificación del pH inicial, las curvas de nivel con un tono de color oscuro representan los menores valores obtenidos de color aparente. Se evidencia la concordancia entre los valores bajos de color aparente en la figura 2 y los altos valores del porcentaje de remoción de turbidez en la figura 1, la zona de mayor remoción del 85% fue así mismo la zona de menor color aparente (30 unidades de PtCo), este evento se refleja a su vez en los valores más altos de color aparente donde el porcentaje de remoción es más bajo.

Figura 3: Diagrama de coagulación Sulfato de Aluminio granular compuerta 1



Fuente: Autores

Figura 4: Diagrama de color Sulfato de Aluminio compuerta 1

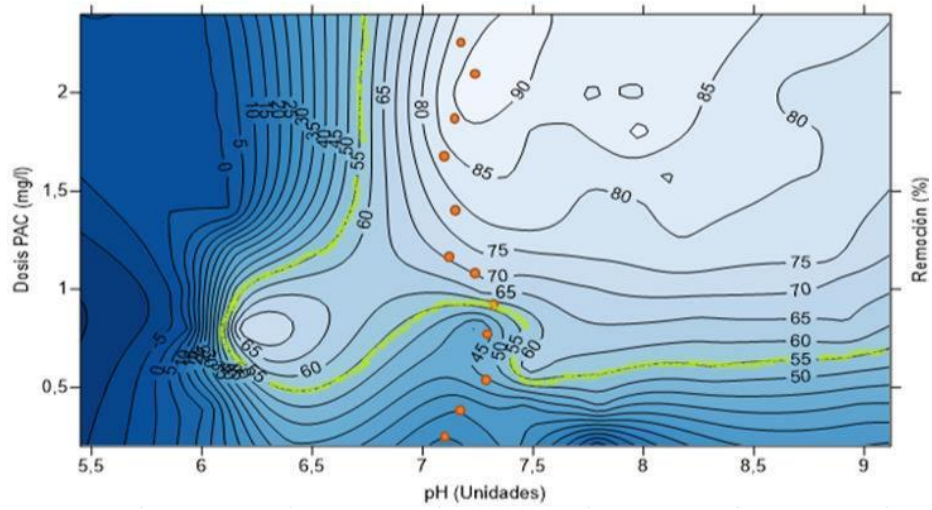


Fuente: Autores

La **figura 3** expone el comportamiento del agua en relación a diferentes dosis de sulfato de aluminio granular y a su vez a la modificación del pH inicial, la turbidez final de 10NTU fue obtenida a partir de la curva de 55% de remoción, el área delimitada por la línea verde representa la zona de barrido formada a partir del arrastre, atrapamiento y precipitación de floculos en altos volúmenes de coagulante agregado [50]. La mayor remoción obtenida sin alterar el pH fue de 70% y se logró con dosis a partir de 2,8mg/L, para conseguir el 85% de remoción se debe llevar al pH inicial hasta valores mayores a 8 y es necesario utilizar dosis altas de coagulante (4 a 4,8mg/L), característica propia de la coagulación por barrido. Los valores de pH inferiores a 5,5 representan la zona no activa, debido a esto, el volumen agregado de dosis de coagulante es irrelevante, tanto grandes como pequeñas dosis tuvieron un porcentaje de remoción menor al 20% de turbidez.

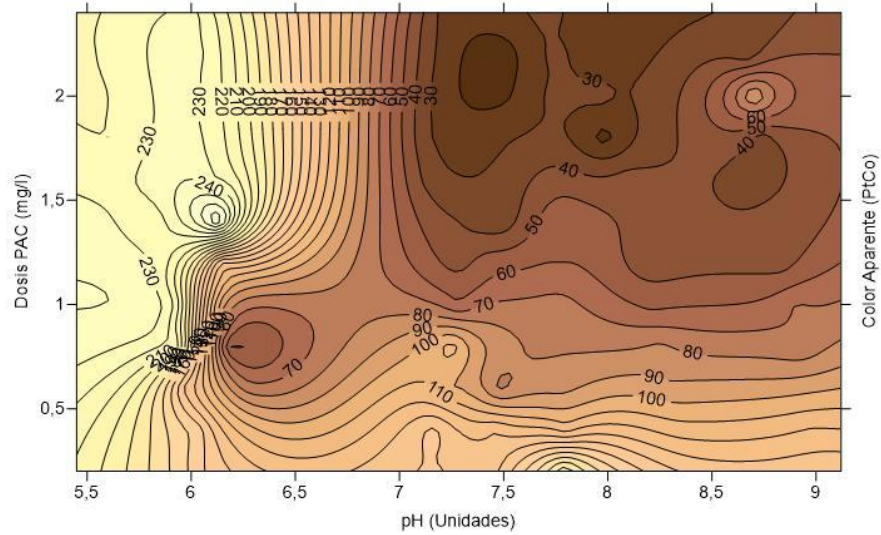
La **figura 4** representa la remoción de color aparente a diferentes dosis de sulfato de aluminio granular y a su vez a la modificación del pH inicial, las curvas de nivel con un tono de color oscuro representan los menores valores obtenidos de color aparente. Se repite la condición de concordancia entre los valores bajos de color aparente visibles en la figura # y los altos valores de porcentaje de remoción de turbidez de la figura #, la zona de mayor remoción del 85% fue a su vez la zona de menor color aparente (20 unidades PtCo), este comportamiento se refleja así mismo en los valores más altos de color aparente donde el porcentaje de remoción es menor.

Figura 5: Diagrama de coagulación PAC compuerta 1



Fuente: Autores

Figura 6: Diagrama de color PAC compuerta 1



Fuente: Autores

La **figura 5** expone el comportamiento del agua en relación a diferentes dosis de sulfato de aluminio granular y a su vez a la modificación del pH inicial, la turbidez final de 10 NTU fue obtenida a partir de la curva de 55% de remoción, el área delimitada por la línea verde, esta representaría la zona de adsorción-neutralización (zona de coagulación óptima) debido a la formación de floculos generados de forma casi inmediata, es importante resaltar que fue posible alcanzar la mayor curva de remoción del 90% sin alterar el pH, con dosis de 2,0 mg/L y alterando el pH se obtuvieron porcentajes de remoción entre el 60 y 85%, menores al porcentaje obtenido en el primer caso. Es necesario utilizar dosis altas del polímero PAC para conseguir remociones significativas, manteniendo el pH entre 7 y 9, ya que a valores más bajos el porcentaje de remoción se reduce. Valores de pH inferiores a 6 representan la zona no activa, debido a esto, el volumen agregado de dosis de coagulante es irrelevante, tanto grandes como pequeñas dosis tuvieron un porcentaje de remoción nulo.

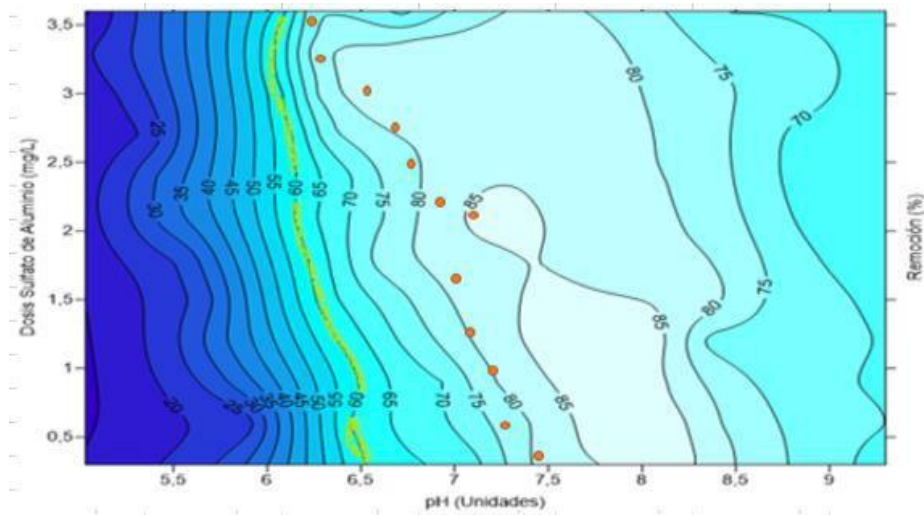
La **figura 6** representa la remoción de color aparente a diferentes dosis de sulfato de aluminio granular y a su vez a la modificación del pH inicial, las curvas de nivel con un tono de color oscuro representan los menores valores obtenidos de color aparente. Es evidente la concordancia entre los valores más bajos de color aparente visibles en la figura # y los mayores porcentajes de remoción de turbidez apreciables en la figura #, la zona de mayor remoción del 90% fue así mismo la zona de menor color aparente obtenido (30 unidades PtCo), esta similitud se refleja a su vez en los valores más altos de color aparente donde el porcentaje de remoción es más bajo.

Comparación de los tres coagulantes para la compuerta 1

El porcentaje de remoción mínimo para asegurar 10 NTU de turbidez final fue alcanzado por los tres coagulantes en la compuerta 1, sin embargo, se presentaron diferencias en lo que conlleva al comportamiento del coagulante en el agua, basándose en rango de operación (pH-dosis) y remoción máxima el producto PAC se destacó como el más adecuado para usar en esta altura de lámina de agua. A partir de dosis mayores a 0,5mg/L y de valores de pH mayores a 6, el PAC remueve 60% de la turbidez inicial, para el sulfato de aluminio líquido, el rango de operación fue el mismo, probablemente por la solubilidad del 100% que tienen ambos coagulantes en el agua, a diferencia del sulfato de aluminio granular que presentó un rango de trabajo mucho menor, siendo necesarias dosis de coagulante mayores a 2,5gm/L y valores de pH mayores a 7 para poder asegurar el mismo porcentaje de remoción, 60%. En cuanto a remoción máxima el PAC alcanzó curvas de remoción de 90% en un rango manejable de ph-dosis, por el contrario, el sulfato de aluminio líquido y granular lograron remociones máximas de 85%

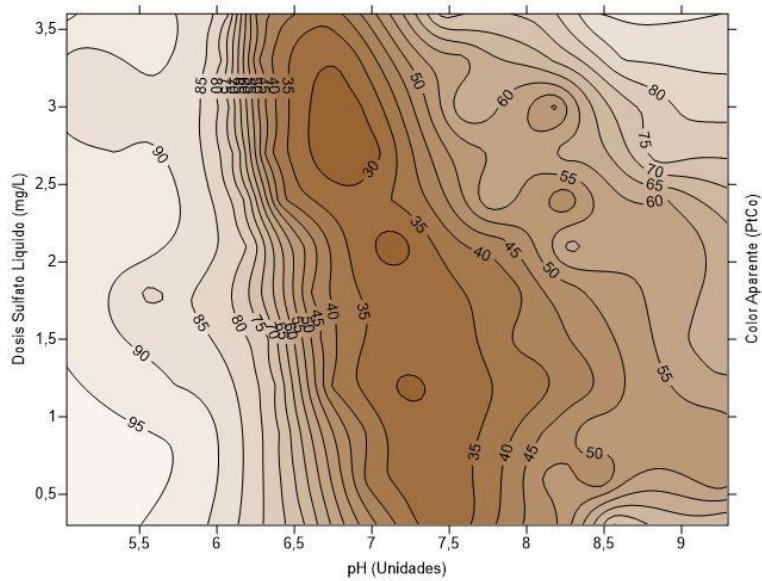
A continuación, se presentan los diagramas de coagulación por cada coagulante en la altura de lámina de agua o compuerta 2

Figura 7: Diagrama de coagulación Sulfato de Aluminio liquido compuerta 2



Fuente: Autores

Figura 8: Diagrama de color Sulfato de Aluminio liquido compuerta 2

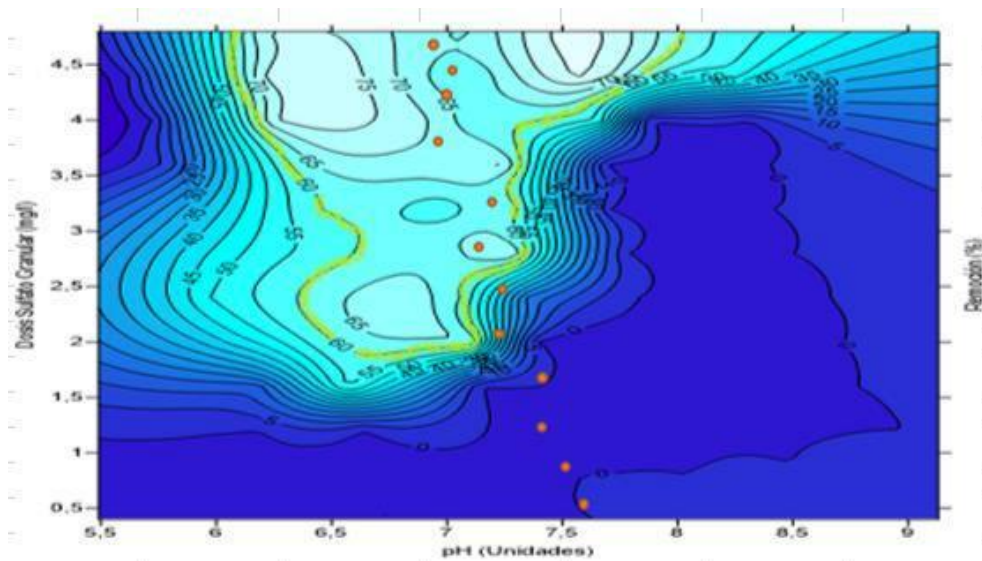


Fuente: Autores

La **figura 7** expone el comportamiento del agua en relación a diferentes dosis de sulfato de aluminio líquido y a su vez a la modificación del pH inicial, la turbidez final de 10 NTU fue obtenida a partir de la curva de 60% de remoción, el área delimitada por la línea verde, esta representaría la zona de adsorción-neutralización (zona de coagulación óptima) debido a la formación de floculos generados de forma casi inmediata, el mayor porcentaje de remoción de 85% se obtuvo sin alterar el pH, la remoción de turbidez se ve afectada al reducir el pH a menos de 6 unidades, tan solo se obtuvo 50% de turbidez residual, al incrementar el pH a valores mayores a 8, las curvas de remoción se ven afectadas, reduciendo el porcentaje de turbidez residual hasta un 15% del valor óptimo , La dosis de coagulante debe permanecer en un rango bajo de 1 a 2mg/L ya que dosis de mayor volumen reducen el porcentaje de remoción.

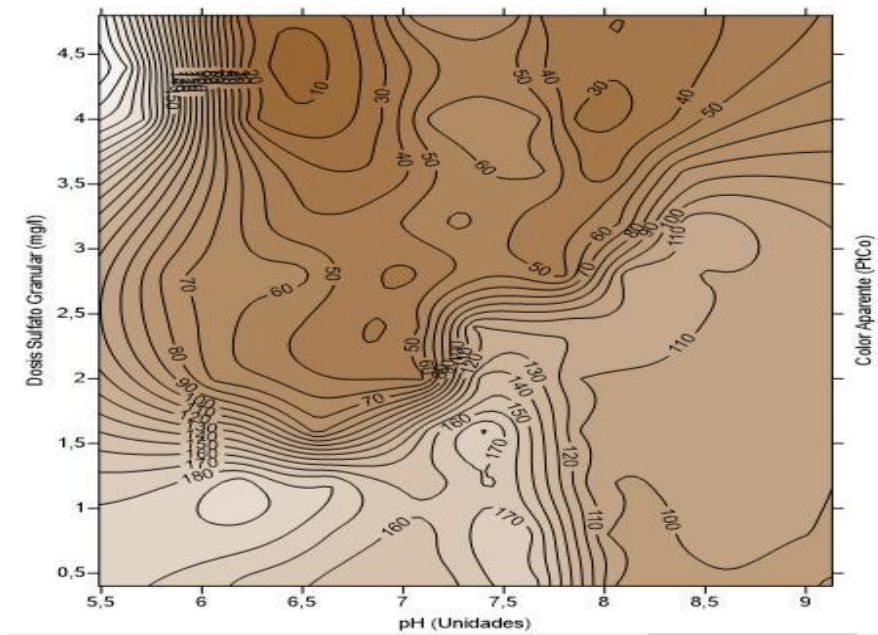
La **figura 8** representa la remoción de color aparente a diferentes dosis de sulfato de aluminio líquido y a su vez a la modificación del pH inicial, las curvas de nivel con un tono de color oscuro representan los menores valores obtenidos de color aparente. Es evidente la concordancia entre los valores más bajos de color aparente visibles en la figura # y los mayores porcentajes de remoción de turbidez apreciables en la figura #, la zona de mayor remoción del 85% fue así mismo la zona de menor color aparente obtenido (35 unidades PtCo), esta similitud se refleja a su vez en los valores más altos de color aparente donde el porcentaje de remoción es más bajo.

Figura 9: Diagrama de coagulación Sulfato de Aluminio granular compuerta 2



Fuente: Autores

Figura 10: Diagrama de color Sulfato de Aluminio granular compuerta 2

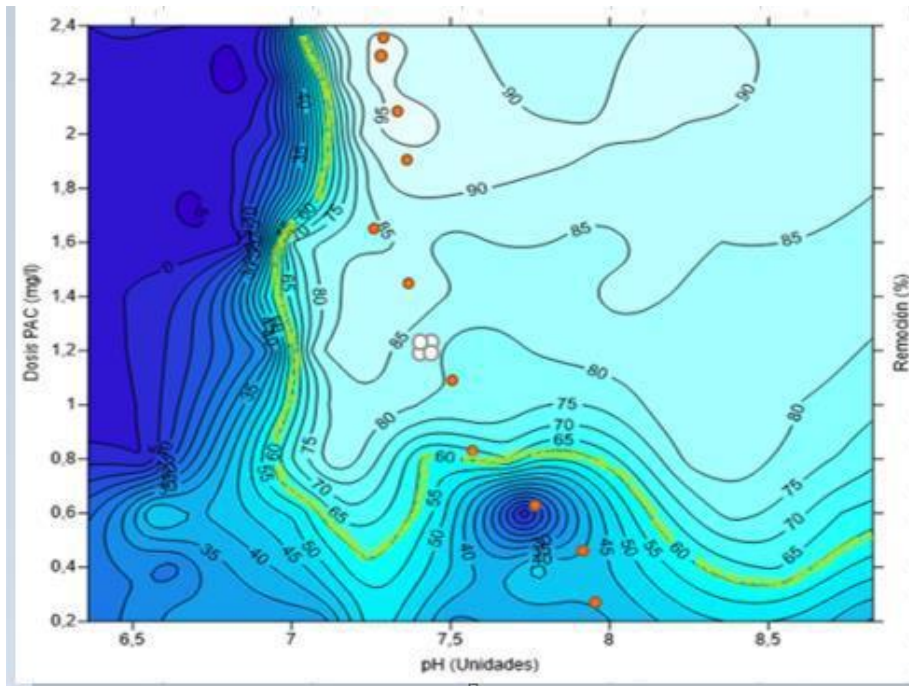


Fuente: Autores

La **figura 9** expone el comportamiento del agua en relación a diferentes dosis de sulfato de aluminio granular y a su vez a la modificación del pH inicial, la turbidez final de 10 NTU fue obtenida a partir de la curva de 60% de remoción, el área delimitada por la línea verde representa la zona de barrido, donde volúmenes altos de coagulante agregado arrastran y aglutinan los floculos, el mayor porcentaje de remoción se consigue reduciendo el pH inicial a un rango de 6,5 a 7, es necesario usar dosis altas de sulfato granular para permitir la precipitación de coagulante-floculos, al dejar sin alteración el pH, el porcentaje de remoción disminuye, evento que de igual forma se presenta para valores mayores a 8. Para valores de pH inferiores a 7,5 la dosis debe permanecer mayor a 2mg/L y para valores superiores a 7,5 la dosis debe ser la más alta, para el caso en estudio de 4 a 4,8mg/L de coagulante agregado.

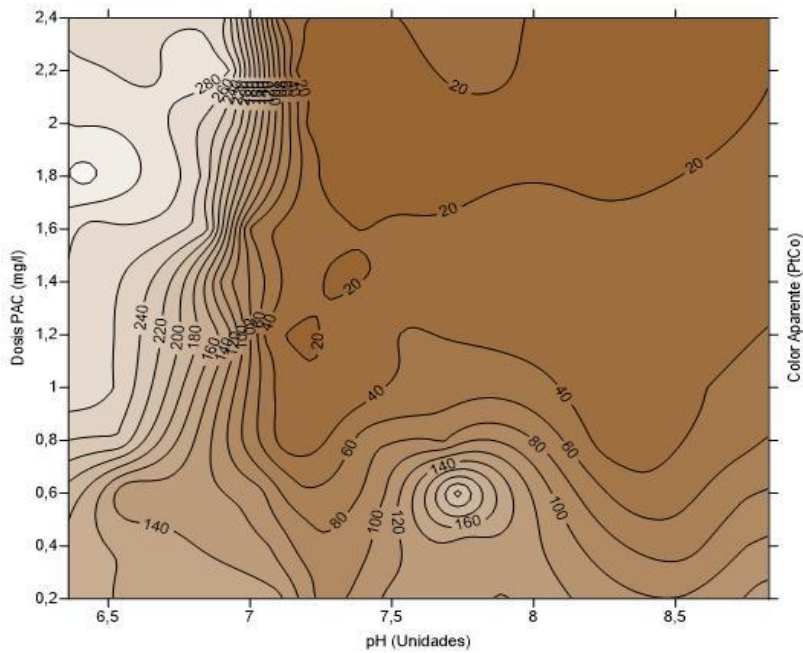
La **figura 10** representa la remoción de color aparente a diferentes dosis de sulfato de aluminio líquido y a su vez a la modificación del pH inicial, las curvas de nivel con un tono de color oscuro representan los menores valores obtenidos de color aparente. La similitud es evidente entre los valores más bajos de color aparente visibles en la figura # y los mayores porcentajes de remoción de turbidez apreciables en la figura #, la zona de mayor remoción del 75% fue así mismo la zona de menor color aparente obtenido (10 unidades PtCo), esta similitud se refleja a su vez en los valores más altos de color aparente donde el porcentaje de remoción es más bajo, el comportamiento de las curvas de remoción en el área delimitada por la línea verde sigue el mismo patrón que la concentración de tonalidades en la figura # de color aparente.

Figura 11: Diagrama de coagulación PAC compuerta 2



Fuente: Autores

Figura 12: Diagrama de color PAC compuerta 2



Fuente: Autores

La **figura 11** expone el comportamiento del agua en relación a diferentes dosis de sulfato de aluminio granular y a su vez a la modificación del pH inicial, la turbidez final de 10 NTU fue obtenida a partir de la curva de 60% de remoción, el área delimitada por la línea verde representa la zona de coagulación óptima en donde se presentó adsorción-neutralización, la reacción del coagulante con los floculos fue casi inmediata, la curva de mayor remoción fue de 95% sin alterar el pH, con dosis de coagulante agregado de 2mg/L, para el caso en estudio entre más alta fue la dosis aplicada mayor remoción se logró apreciar, valores modificados de pH a partir de 8 obtuvieron porcentajes de remoción máximos de 90%, de la misma forma, las dosis altas de coagulante agregado denotaron mayor capacidad para remover floculos. La zona sin remoción o zona no activa se presentó para dosis altas en valores de pH menores a 7, donde el porcentaje de remoción fue inferior al 20%.

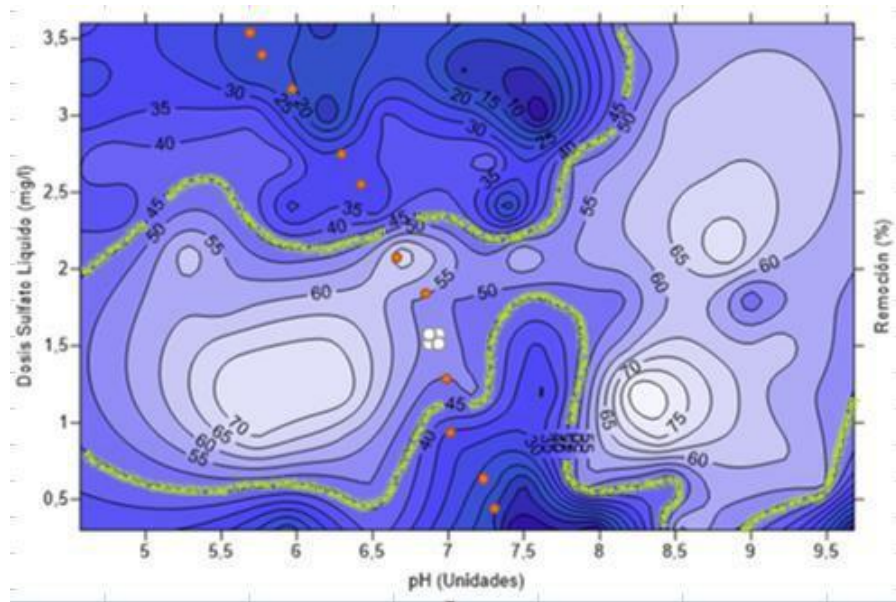
La **figura 12** representa la remoción de color aparente a diferentes dosis de sulfato de aluminio líquido y a su vez a la modificación del pH inicial, las curvas de nivel con un tono de color oscuro representan los menores valores obtenidos de color aparente. La concordancia es evidente al observar el comportamiento entre los valores más bajos de color aparente visibles en la figura # y los mayores porcentajes de remoción de turbidez apreciables en la figura #, las zonas de mayor remoción como la del 95% y 90%, fueron así mismo las zonas de menor color aparente obtenido (20 unidades PtCo), esta similitud se refleja a su vez en los valores más altos de color aparente donde el porcentaje de remoción de turbidez es más bajo, el comportamiento de las curvas de remoción en el área delimitada por la línea verde sigue el mismo patrón que la concentración de tonalidades en la figura # de color aparente.

Comparación de los tres coagulantes para la compuerta 2

El porcentaje de remoción mínimo para asegurar 10 NTU de turbidez final fue alcanzado por los tres coagulantes en la compuerta 2, sin embargo, se presentaron diferencias en lo que conlleva al comportamiento del coagulante en el agua, basándose en el rango de operación (pH-dosis) y remoción máxima, el coagulante PAC se destacó como el más adecuado para usar en esta altura de lámina de agua. A partir de dosis mayores a 0,6mg/L y de valores de pH mayores a 7, el PAC remueve 60% de la turbidez inicial, para el sulfato de aluminio líquido, el rango de operación fue mucho mayor, obteniendo porcentajes de remoción de 70% con el pH inicial del agua y dosis mayores a 0,5mg/L, a diferencia del sulfato de aluminio granular que presentó un rango de trabajo mucho menor, siendo necesarias dosis de coagulante mayores a 2,5gm/L y valores de pH menores a 7,5 para poder asegurar el mismo porcentaje de remoción, 60%. En cuanto a remoción máxima el PAC alcanzó curvas de remoción de 95% en un rango manejable de pH-dosis, por el contrario, el sulfato de aluminio líquido alcanzó curvas de remoción de 90% en un rango corto de trabajo y granular lograron remociones máximas de 75% con las mayores dosis agregadas.

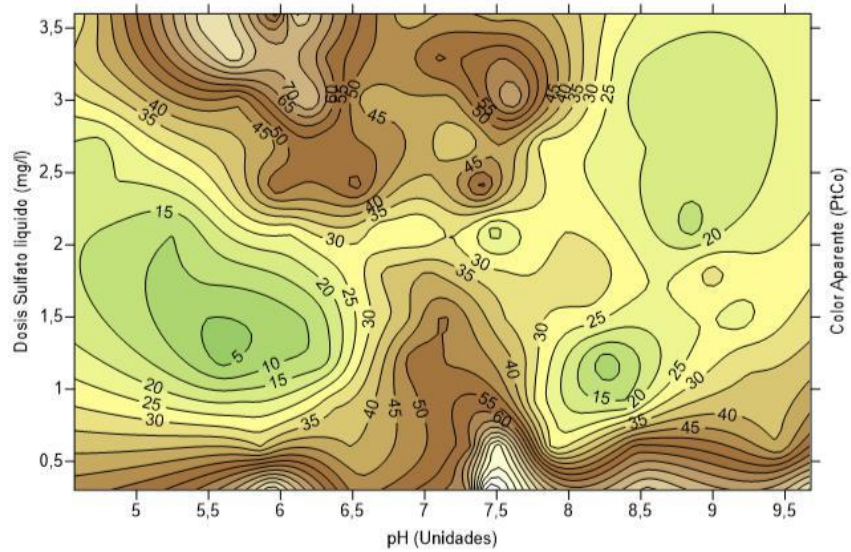
A continuación, se presenta los diagramas de coagulación por cada coagulante en la altura de lámina de agua o compuerta 3

Figura 13: Diagrama de coagulación Sulfato de Aluminio Liquido compuerta 3



Fuente: Autores

Figura 14: Diagrama de color Sulfato de Aluminio liquido compuerta 3

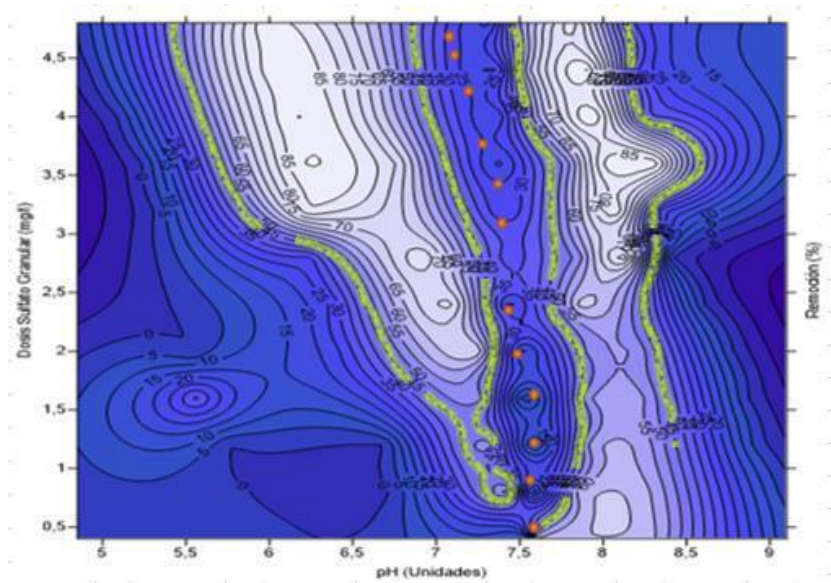


Fuente: Autores

La **figura 13** expone el comportamiento del agua en relación a diferentes dosis de sulfato de aluminio líquido y a su vez a la modificación del pH inicial, la turbidez final de 10 NTU fue obtenida a partir de la curva de 45% de remoción, el área delimitada por la línea verde representa la zona de coagulación óptima, donde se presentó la curva de mayor remoción fue de 75%, se logró obtener llevando el pH hasta 8,5 y manteniendo el rango de la dosis de coagulante superior a 0,5mg/L e inferior a 1,5mg/L, así mismo, curvas de remoción hasta del 70% fueron obtenidas reduciendo el pH, en un medio ácido, se presentó mayor rango de trabajo de 5,5 a 6,5, manteniendo el mismo volumen de dosis agregada en pH de 8,5; la mayor curva de remoción sin alterar el pH fue de 60%, porcentaje que aun así, asegura la remoción final de 10 NTU. El área que no se encuentra delimitada se caracterizó por presentar porcentajes de remoción bajos especialmente en dosis altas de coagulante agregado para valores de pH menores a 8 donde la remoción no superó el 20% de turbidez final.

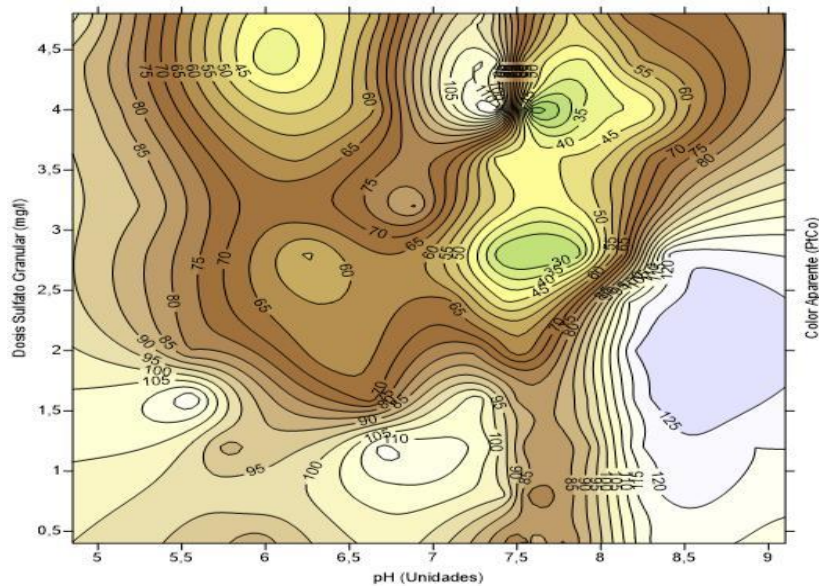
La **figura 14** representa la remoción de color aparente a diferentes dosis de sulfato de aluminio líquido y a su vez a la modificación del pH inicial, las curvas de nivel con un tono de color oscuro representan los menores valores obtenidos de color aparente. El comportamiento entre los valores más bajos de color aparente visibles en la figura # concuerda con los mayores porcentajes de remoción de turbidez apreciables en la figura #, denotando la similitud entre los resultados obtenidos, tal como se aprecia en las zonas de mayor remoción como las del 70% y 65% donde fueron obtenidas las zonas de menor color aparente (5 y 10 unidades PtCo), esta similitud se refleja a su vez en los valores más altos de color aparente donde el porcentaje de remoción de turbidez es más bajo, el comportamiento de las curvas de remoción en el área delimitada por la línea verde sigue el mismo patrón que la concentración de tonalidades en la figura # de color aparente.

Figura 15: Diagrama de coagulación Sulfato de Aluminio Granular compuerta 3



Fuente: Autores

Figura 16: Diagrama de color Sulfato de Aluminio granular compuerta 3

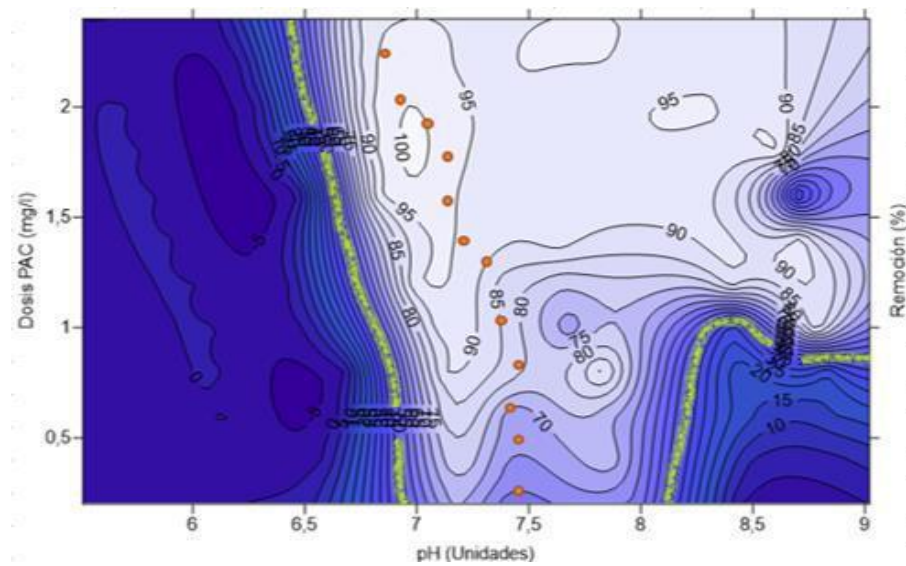


Fuente: Autores

La **figura 15** expone el comportamiento del agua en relación a diferentes dosis de sulfato de aluminio líquido y a su vez a la modificación del pH inicial, la turbidez final de 10 NTU fue obtenida a partir de la curva de 45% de remoción, el área delimitada por la línea verde evidencia la zona de coagulación óptima, caracterizada por la presencia de coagulación por dos capas, donde son visibles dos áreas diferentes con porcentajes de remoción similares y un área de no remoción entre ellas, a la que se le conoce como zona de reestabilización, los coloides se repelen entre sí por su carga negativa natural, seguidamente son precipitados por el coagulante agregado [20]. Las curvas de mayor remoción de 85% se obtiene al acidificar y alcalinizar el medio acuoso en valores de pH entre 6-6,5 y 8-8,5; hay que resaltar que el primer rango de pH mencionado ofrece un rango de trabajo más amplio al tratarse de dosis agregada, ya que volúmenes de coagúlate de 3,5 a 4,8mg/L presentaron el mismo porcentaje de remoción, por el contrario, en pH de 8 a 8,5 la dosis agregada debe ser exacta si se desea obtener el mismo porcentaje de remoción. Se observó que las curvas de menor remoción se presentaron a través del pH sin modificación, además, se presentó el mismo comportamiento para valores de pH menores a 7 y mayores a 8,5 con dosis bajas de coagulante agregado.

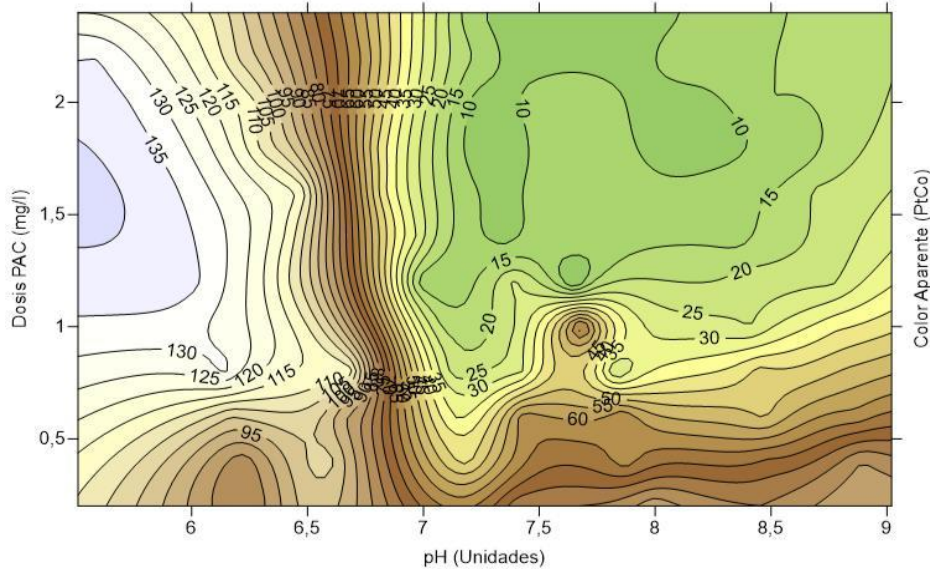
La **figura 16** representa la remoción de color aparente a diferentes dosis de sulfato de aluminio líquido y a su vez a la modificación del pH inicial, las curvas de nivel con un tono de color oscuro representan los menores valores obtenidos de color aparente. El comportamiento entre los valores más bajos de color aparente visibles en la figura # concuerda con los mayores porcentajes de remoción de turbidez apreciables en la figura #, denotando la similitud entre los resultados obtenidos, tal como se aprecia en la zona de mayor remoción del 85% donde también fueron obtenidas las zonas de menor color aparente (35 y 45 unidades PtCo), esta similitud se presenta de la misma forma para ambas figuras en la zona de restitución intermedia a las zonas de coagulación óptimas, donde el color aparente aumenta al acercarse a la línea de tendencia sin modificación de pH.

Figura 17: Diagrama de coagulación PAC compuerta 3



Fuente: Autores

Figura 18: Diagrama de color PAC compuerta 3



Fuente: Autores

La **figura 17** expone el comportamiento del agua en relación a diferentes dosis de sulfato de aluminio líquido y a su vez a la modificación del pH inicial, la turbidez final de 10 NTU fue obtenida a partir de la curva de 45% de remoción, el área delimitada por la línea verde representa la zona de coagulación óptima caracterizada por coagulación de absorción-neutralización, donde el PAC reacciona de forma inmediata con el agua, precipitando los floculos; la curva de mayor remoción fue de 95%, se presentó sin alterar el pH y con dosis agregadas mayores a 1,5mg/L, el rango de trabajo para la óptima remoción de turbidez es amplio, al mantener en pH mayor a 7 y la dosis agregada mayor a 1mg/L es posible obtener del 70 al 95% de remoción. Valores de pH menores a 7 impidieron el efecto de remoción causado por el coagulante, el volumen de dosis agregado resulta indiferente ya que la remoción final tiene como máximo 5%, esta área representa la zona no activa.

La **figura 18** representa la remoción de color aparente a diferentes dosis de sulfato de aluminio líquido y a su vez a la modificación del pH inicial, las curvas de nivel con un tono de color oscuro representan los menores valores obtenidos de color aparente. El comportamiento entre los valores más bajos de color aparente visibles en la figura # concuerda con los mayores porcentajes de remoción de turbidez apreciables en la figura #, denotando la similitud entre los resultados obtenidos, tal como se aprecia en la zona de mayor remoción del 95% donde también fueron obtenidas las zonas de menor color aparente (10 y 15 unidades PtCo), el mismo comportamiento se presenta para los valores de color aparente más altos donde el porcentaje de remoción de turbidez es menor.

Comparación de los tres coagulantes para la compuerta 3

El porcentaje de remoción mínimo para asegurar 10 NTU de turbidez final fue alcanzado por los tres coagulantes en la compuerta 3, sin embargo, se presentaron diferencias en lo que conlleva al comportamiento del coagulante en el agua, basándose en el rango de operación (pH-dosis) y remoción máxima, el coagulante PAC se destacó como el más adecuado para usar en esta altura de lámina de agua. A partir de dosis mayores a 0,2mg/L y de valores de pH sin modificación, el PAC remueve 45% de la turbidez inicial, conforme la dosis agregada aumenta su volumen y se mantiene en el rango de pH natural del agua, el porcentaje de remoción es mayor, para el sulfato de aluminio líquido, el rango de operación estuvo dividido en dos zonas, la primera con rango de operación limitado por dosis de coagulante de 1 a 2mg/L y valores de pH menores a 7, la segunda con dosis mayores a 0,3mg/L alcalinos mayores a 8, el sulfato de aluminio granular que presentó un rango de trabajo similar al sulfato líquido, el rango de operación se dividió en dos zonas diferentes, la primera con un rango limitado de pH entre 6 y 7,5 y dosis mayores a 1mg/L, la segunda con rango de pH aún más limitado, entre 8 a 8,5 y dosis mayores a 0,4mg/L, al diferencia entre ambos coagulantes de sulfato resultó en la necesaria alteración de pH que se debió realizar para que el sulfato granular pudiera actuar en el agua, por otra parte el sulfato líquido no requirió de modificación de pH para lograr la curva de remoción mínima de 45%. En cuanto a remoción máxima el PAC alcanzó curvas de remoción de 100% en un rango manejable de pH-dosis, por el contrario, el sulfato de aluminio líquido alcanzó curvas de remoción de 75% y el sulfato de aluminio granular curvas de 85%, a partir de la modificación del pH inicial del agua. En la **tabla 12** se muestra la comparación de cada coagulante y cada lámina de agua o compuerta (C1, C2, C3).

Tabla 12: Zona de coagulación vs lámina de agua

Zona de Coagulación				
		Sulfato Líquido	Sulfato Granular	PAC
C 1	Mecanismo de desestabilización	Adsorción neutralización	Barrido	Adsorción neutralización
	Dosis Optima	2,1 mg/L	2,8mg/L	2mg/L
	Rango de pH	6,5-8-5	7-8,5	6,5-9
C 2	Mecanismo de desestabilización	Adsorción neutralización	Barrido	Adsorción neutralización
	Dosis Optima	2,1mg/L	2,8mg/L	2,1mg/L
	Rango de pH	6,5-9	6,5-8,5	7-8,5mg/L
C 3	Mecanismo de desestabilización	Adsorción neutralización	A dos capas	Adsorción neutralización
	Dosis Optima	2,1mg/L	2,8mg/L	2,1mg/L
	Rango de pH	6-8,5	6-7,5;8-8,5	7-8,5

Fuente: Autores

Delimitación de la relación óptima gradiente-tiempo de floculación para la calidad de agua en estudio

En esta fase número 3, se realizó la variación en la relación gradiente de velocidad y tiempo de floculación con el propósito de hallar los puntos o parejas gradiente-tiempo que presenten mayor remoción de la turbidez final. A continuación, se muestra la **tabla 13** con los gradientes y tiempos evaluados, así como el porcentaje de turbidez residual que se obtuvo en cada relación

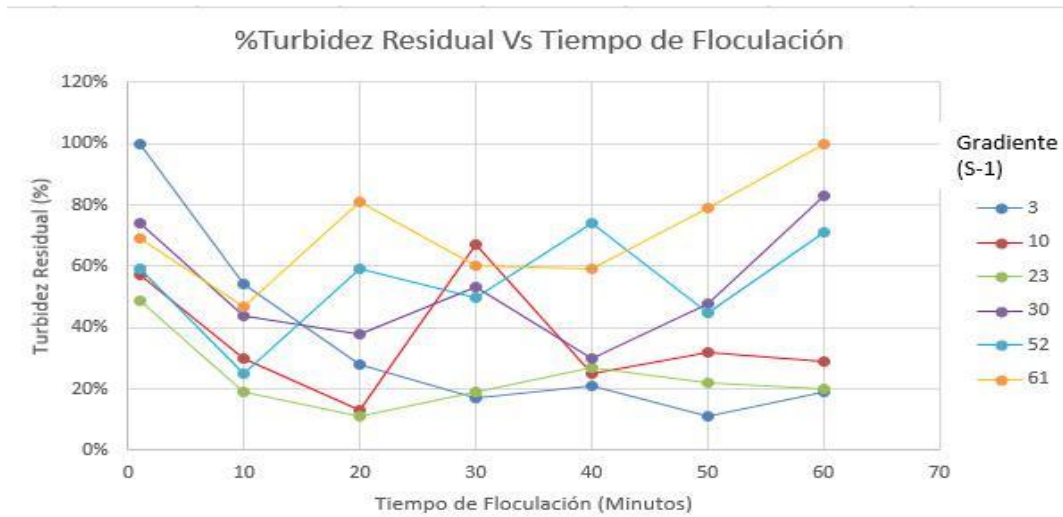
Tabla 13: Porcentaje de turbidez residual para las relaciones Gradiente-Tiempo evaluadas

Gradiente (s-1)	RPM	Tiempo de Floculación (min)						
		1	10	20	30	40	50	60
3	5	100%	54%	28%	17%	21%	11%	19%
10	15	57%	30%	13%	67%	25%	32%	29%
23	30	49%	19%	11%	19%	27%	22%	20%
30	40	74%	44%	38%	53%	30%	48%	83%
52	60	59%	25%	59%	50%	74%	45%	71%
61	70	69%	47%	81%	60%	59%	79%	100%

Fuente: Autores

La turbidez inicial del agua fue de 18,4 NTU, los datos resaltados en color verde representan los porcentajes menores de turbidez residual, es importante resaltar que la remoción fue mayor al 85% únicamente en los gradientes- tiempos resaltados en la tabla, así mismo, se demuestra que, a gradientes altos, mayor es el porcentaje de turbidez residual, además de que el tiempo de floculación en dichos gradientes no influye significativamente en la remoción. En la **gráfica 1** es posible visualizar los puntos de menor turbidez residual para cada pareja gradiente-tiempo.

Grafica 1: %Turbidez residual vs Tiempo de Floculación



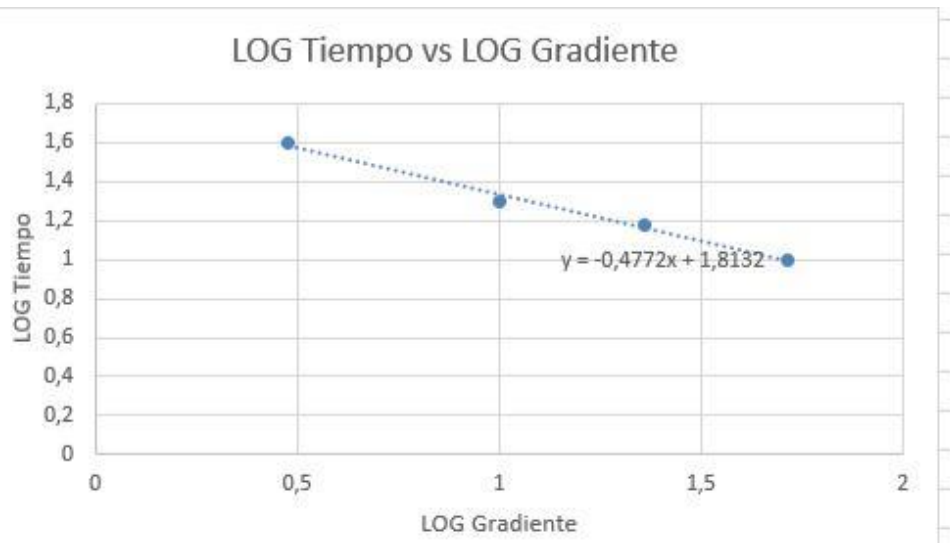
Fuente: Autores

La línea color verde presenta 2 parejas óptimas, gradiente de 10 s^{-1} y tiempo de floculación de 20 minutos, gradiente de 23 s^{-1} y tiempo de floculación de 20 minutos, la línea naranja presenta 1 pareja óptima, gradiente de 3 s^{-1} y 40 minutos, debido a la baja turbidez que posee el embalse de Bucaramanga, fue necesaria la operación con gradientes menores a 50 s^{-1} para obtener porcentajes de remoción considerables, gradientes mayores a 50 s^{-1} no permitieron la asociación continua y permanente de los floculos, por lo que los porcentajes de turbidez residual permanecieron constantes o se redujeron en menos del 50%.

Diseño de la Ecuación de Letterman y constantes de asociación y ruptura

El planteamiento de la ecuación de Letterman se realizó a partir de la linealización de la **gráfica 1**, como se muestra a continuación

Gráfica 2: LOG Gradiente vs LOG Tiempo de floculación



Fuente: Autores

A partir de la ecuación de la recta $y = -0,4772x + 1,8132$ se planteó la ecuación de Letterman (**ecuación 1**), la cual define el comportamiento del agua en estudio durante la fase de floculación para una dosis específica de Policloruro de aluminio (PAC) de 2mg/L. La ecuación puede mantenerse en uso al abarcar el rango de gradiente evaluado [$3s^{-1}$ - $52s^{-1}$]

$$G^{-0,4772} T = 65,0429 \text{ (Ecuación 1)}$$

La **tabla 14** relaciona las parejas óptimas de floculación con sus respectivas constantes de asociación (K_a) y ruptura (K_b)

Tabla 14: K_a y K_b para las parejas óptimas

Parejas Óptimas Gradiente-Tiempo					
G (s-1)	T (Minutos)	LOG G	LOG T	K_a	K_b
3	40	0,477121255	1,602059991	$5,14 \times 10^{-4}$	$3,28 \times 10^{-8}$
10	20	1	1,301029996	$5,42 \times 10^{-4}$	$6,9 \times 10^{-9}$
23	15	1,361727836	1,176091259	$2,9 \times 10^{-5}$	$1,049 \times 10^{-9}$
52	10	1,716003344	1	$4,16 \times 10^{-5}$	$3,9 \times 10^{-9}$

Fuente: Autores

En cada caso de parejas óptimas la constante de asociación es mayor a la constante de ruptura, tal como se evidencia en los porcentajes de turbidez residual, las partículas se adhieren eficientemente unas con otras, permitiendo la formación de flóculos de mayor volumen y masa, el tiempo de floculación establecido de 20 y 5 minutos evitan que la constante de ruptura crezca hasta el punto en el que se presente la adherencia efímera y la separación permanente al ser $K_b > K_a$. El número de colisiones, así como la frecuencia en las colisiones son determinantes en el factor de fuerza o de adherencia K_a , al aumentar el valor que este puede tomar [51].

Capítulo 4

Conclusiones

- El análisis de varianza ANOVA presentó 95% de similitud para los parámetros fisicoquímicos evaluados en las tres láminas de agua, por lo tanto, no existe variabilidad significativa en la calidad de agua para las diferentes compuertas del embalse de Bucaramanga
- Los mecanismos de desestabilización de coloides que se presentaron con mayor frecuencia en la etapa de coagulación fueron por barrido y absorción-neutralización, generando las zonas de coagulación esperadas por la literatura acorde al tipo de agua del embalse.
- El coagulante PAC demostró la mayor remoción de turbidez para las tres láminas de agua, con rango de remoción final que presentó oscilaciones entre 85% y 95% de turbidez final, a su vez fue el que menor dosis requirió en alcanzar la turbidez residual de 10 NTU, apta para entrar a la etapa de filtración.
- Los altos y bajos valores obtenidos de color aparente presentados en los diagramas de color coinciden con las mayores y menores curvas de remoción en los diagramas de coagulación, dicha concurrencia aplica también para las zonas de coagulación presentadas en ambos diagramas.
- Gradientes menores a 30s^{-1} son necesarios para mantener más de 50% de remoción de turbidez final, gradientes mayores a 30s^{-1} presentarán remociones nulas o menores al 50%.
- El gradiente de velocidad óptimo de operación es de 23 s^{-1} mientras que el tiempo de mezcla lenta óptimo es de 20 minutos
- En gradientes altos (para el caso en estudio $>50\text{ s}^{-1}$) el tiempo de floculación no interviene significativamente en la remoción final de turbidez
- Por medio de la ecuación de Letterman es posible calcular gradientes y tiempos de floculación óptimos para los rangos trabajados en el presente estudio

Capítulo 5

Recomendaciones

- El coagulante recomendado para trabajar en cualquier altura de lámina de agua es el PAC, dosis entre 0,5 a 2mg/L son suficientes para permitir remociones mayores al 45%
- Se recomienda evitar el uso del coagulante sulfato de aluminio granular si no está estipulada la modificación del pH en la operación, por lo contrario, si el pH será alterado, usar dosis altas, mayores a 4mg/L.
- Se recomienda operar la planta Angelinos en la etapa de floculación con gradientes bajos menores a 30 s^{-1} y tiempos medios o altos mayores a 20 minutos, si se trabajará con gradientes mayores es recomendable ajustar el tiempo de floculación de 10 minutos.

BIBLIOGRAFIA

- [1]Chio J. Carlos. (2016). El embalse de Tona está completamente lleno: Amb. Vanguardia Liberal. Encontrado en <http://www.vanguardia.com/area-metropolitana/bucaramanga/380299-el-embalse-de-tona-esta-completamente-lleno-amb>
- [2]Acueducto municipal de Bucaramanga. (2018). Planta de Angelinos y tubería del embalse de Bucaramanga serán licitas. Bucaramanga. Encontrado en http://www.amb.com.co:8081/wp_noticias/2018/05/24/planta-de-angelinos-y-tuberia-del-embalse-de-bucaramanga-seran-licitadas/
- [3]IDEAM. (2012). Embalses en el Valle del Cauca, con un óptimo abastecimiento. Alcaldía de Santiago de Cali. Encontrado en http://www.cali.gov.co/alcaldenlinea/publicaciones/46629/embalses_en_el_valle_del Cauca_con_ptimo_abastecimiento_ideam/
- [4]Ibars Palau Anthony. (2003). Medidas de gestión y adecuación ambiental de embalses frente a la eutrofia. Departamento de medio ambiente y desarrollo sostenible. Endesa servicios
- [5]Bonansea M., Ledesma C., Rodríguez C., Sánchez A. (2012). Concentración de clorofila-a y límite de zona fótica en el embalse río tercero (Argentina) utilizando imágenes del satélite CBERS-2B. Universidad Nacional del Río Cuarto. Universidad Federal Rural do Rio de Janeiro. Revista Ambiente e Agua.
- [6]Bonansea M., Ledesma C., Rodríguez C., Sánchez A. (2012). Calidad de agua en el embalse río tercero (Argentina) utilizando sistemas de información geográfica y modelos lineales de regresión. Universidad Nacional del Río Cuarto. Universidad Federal Rural do Rio de Janeiro. Revista Ambiente e Agua.
- [7]Val R., Niñerola D., Armengol J., Dolz J. Incidencia de los embalses en el régimen térmico del río. El caso del tramo final del río Ebro. Departamento de ingeniería hidráulica, marítima y ambiental. Universidad Politécnica de Cataluña. Departamento de ecología, Facultad de Biología, Universidad de Barcelona.
- [8]De Vargas L. (2015). Capítulo 5: Mezcla rápida. Manual de teoría para la coagulación. Disponible en <http://www.ingenieroambiental.com/4014/cinco.pdf>
- [9]National Academy of Science. (2007). Fuentes de abastecimiento, embalses o reservorios. Global Health and Education Fundation. Disponible en <https://www.koshland-science-museum.org/water/html/es/Sources/Reservoirs.html>
- [10]Mynor Romero. (2016). Tratamientos utilizados en potabilización de agua. Facultad de ingeniería. Universidad Rafael Landivir. Boletín electrónico N°8. Guatemala.

- [11]Castrillón B. Daniela. Giraldo María. (2012). Determinación de las dosis óptimas del coagulante sulfato de aluminio granulado tipo B en función de la turbiedad y el color para la potabilización del agua en la planta de tratamiento Villa de Santa Elena. Universidad Tecnológica de Pereira.
- [12]Arboleda J. (2000). Teórica y práctica de la purificación del agua. Tercera edición. Volumen I
- [13]Romero R. Jairo. A. (2002). Calidad de agua. Primera edición
- [14]Pérez. C. José. (2006). Avances de la sedimentación. Curso sobre tecnología de tratamiento de agua para países en desarrollo.
- [15]Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (2019). Fuentes de Agua. Disponible en <http://www.amb.com.co/frmInformacion.aspx?inf=33>
- [16]Uribe J. Bayona S. (2013). Informe Epidemiológico de Santander. Gobernación de Santander. Colombia. Disponible en http://web.observatorio.co/publicaciones/Informe_calidad_agua_2013.pdf
- [17]Chulluncuy C. (2011). Tratamiento de agua para consumo humano. Universidad nacional mayor de San Marcos.
- [18]Lozano W. (2015). Potabilización del agua; principios de diseño, control de procesos y laboratorio. Universidad Piloto de Colombia. Primera edición. Bogotá. Colombia.
- [19]ANIQ. (2018). Proceso de coagulación/floculación en el tratamiento del agua. Estadísticas de la Industria Química. Asociación Nacional de la Industria Química. CDMX, México.
- [20]SCHULZ OKUND A (1990). Tratamiento de aguas superficiales para países en desarrollo
- [21] Gómez P. Néstor A. (2005). Remoción de materia orgánica por coagulación floculación. Departamento de ingeniería química. Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales.
- [22] Ruiz R. Estilita. (2012). Química de la polución del agua. Departamento de ingeniería química y de ambiente. Universidad del país Vasco. Disponible en <https://ocw.ehu.eus/course/view.php?id=74>.
- [23]Mora A. Darner. (2009). Agua. Universidad Estatal a Distancia. Editorial de la Universidad Estatal a Distancia. San José, Costa Rica. Disponible en https://books.google.com.co/books?id=eafu8E2PtQAC&pg=PA20&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false

- [24]Murphy S. (2007). General information of Alkalinity. Basin. USGS Water Quality Monitoring. Disponible en <http://bcn.boulder.co.us/basin/data/NEW/info/Alk.html>.
- [25]United States Environmental Protection Agency EPA. (2012). 5.9 Conductivity. Disponible en <https://archive.epa.gov/water/archive/web/html/vms59.html>
- [26]Oram B. (2014). The pH of the water. Water Research Center. Disponible en <https://www.water-research.net/index.php/ph>
- [27]Brant, Johnsson, Elphinston, Ratnayaka. (2017). Twort's Water Supply, Seventh Edition. Butterworth-Heinemann. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/book/9780081000250/tworts-water-supply#book-info>
- [28]Gelda, Effler w., Prestiggiacomo, Peng, Effler J., Wagner, Perkins, O'Donnell, O'Donnell S., Pierson. (2013). Characterizations and modeling of turbidity in a water supply reservoir following an extreme runoff event. Inland Waters. Taylor&Francis Group. Disponible en <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.5268/IW-3.3.581>
- [29]Xin X., Li K., Finlayson B., Yin W. (2015). Evaluation, prediction and protection of water quality in Danjiangkou Reservoir, China. Water Science and Engineering, Volume 8. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674237015000125>
- [30]IDEAM. (2002). Guía Ambiental para Sistemas de Acueducto, 6. Aducción y Conducción. Ministerio de Medio Ambiente. Colombia. Disponible en <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/005574/cartillas/sistemasacueducto/Sistemasacueducto2.pdf>
- [31]Ventura. (2019). Healthy Canadians, Colour in water. Government of Canada. Disponible en <https://www.canada.ca/content/dam/canada/health-canada/migration/healthy-canadians/publications/healthy-living-vie-saine/water-colour-couleur-eau/alt/water-colour-couleur-eau-eng.pdf>
- [32]Faust S., Aly O. (1998). Chemistry of the water treatment, 2nd edition. Lewis Publishers. Library of Congress. Disponible en <https://books.google.com.co/books?id=ivLiNH-NjOcC&pg=PA231&lpg=PA231&dq=coagulation+diagrams+for+drinking+water&source=bl&ots=MEwa9ZQPgR&sig=ACfU3U1vpklubmP7vEhP-Egba2KdlhyCuQ&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwjP1Kzq8PXgAhUSrVkJHbIPCzkQ6AEwCnoECAgQAQ#v=onepage&q=coagulation%20diagrams%20for%20drinking%20water&f=false>
- [33]Bilibio C., Hensel O., Selbach J. (2011). Sustainable water management in the tropics and subtropics, cases in Brazil. Volumen 1. Fdereal University of Pampa. Board for Edition Publisher. Disponible en

https://books.google.com.co/books?id=hURXtV7esjwC&pg=PA235&dq=coagulation+diagrams+for+reservoirs&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwiA_vfz-fXgAhVvuVkKHbfBBUoQ6AEINzAC#v=onepage&q=coagulation%20diagrams%20for%20reservoirs&f=false

[34]MRWA. (2003). Coagulation and Flocculation process fundamentals. Minesota Rural Water Association. Disponible en <https://sswm.info/sswm-university-course/module-6-disaster-situations-planning-and-preparedness/further-resources-0/coagulation-flocculation>

[35]López M., Oropeza M., Bizabal J., Ochoa A. (2014). Coagulation-Flocculation mechanisms in water and wastewater treatment plants through zeta potencial measurements. Elsevier V.W. US National Library of Medicine. Disponible en <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25036994>

[36]NPTL. (2019). Water and Wastewater Engineering. Government of India. Disponible en <https://nptel.ac.in/courses/105104102/Lecture%208.htm>

[37]Di Bernardo, Botari A, Sabogal Paz. (2005). Use of the mathematical modeling for flocculation mechanic chambers projection in wáter tratment stations. Environmental and Sanitary Engineering Magazine, vol 10.

[38]Sterling Jr., M, C., J S. Bonner, A.N.S Ernest, C.A. Page. And R.L. Authenrieth. (2005). Application of fractal flocculation and vertical transport model to aquatic sol-sediment system. Water Res 39-1818-1830

[39]Son, M., and T.-Hsu. (2009). The effects of variability yield strenght and variable fractal dimension on flocculation of cohesive sediment. Water Res 43:3582-3592

[40]Dyer. (1989). Sediment processes in a estuaries: future research requirements. J. Geophys. Res 94: 14327-14339

[41]Argaman, Y., Kaufman, W. J.: J. San. Eng. Div., ASCE, 96. SA 2. (1970). 223

[42]Villegas A., Letterman R.D. (1976). Optimizing Flocculator Power Input. Journal of the Environmental Engineering Division. Proceedings of the American Society of Civil Engineers. 102(E2): 251

[43]Di Bernardo L.& Henriquez J.M. (1989). Direct downward filtration in constituted media of sand. Proceedings of the National Seminar on Coagulation and Direct Filtration. Brazil.

[44]Camp TR, Stein PC. (1943). Velocity Gradient and Internal Work in Fluid Motion. Journal Boston Society of Civil Engineers 30:219-237.

- [45]Braga M. R., De Oliveira S. (2012). Mathematical Modeling and analysis of the flocculation process in chambers in series. Bioprocess and Biosystems Engineering. Springer. Disponible en http://www.rc.unesp.br/igce/planejamento/download/rodrigo/mathematical_modeling.pdf
- [46]D.S. Bhargava, C.S.P Ojha. (1993). Models for design on flocculation baffled channels. Water Research. Vol 3. Science Direct. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/004313549390047L>
- [46]Moore, Caux. (1997). Ambient Water Quality for Colour in British Columbia. Technical. British Columbia Government. Disponible en <https://www2.gov.bc.ca/assets/gov/environment/air-land-water/water/waterquality/wqgs-wqos/approved-wqgs/colour-tech.pdf>
- [47]LENNTech. Why is dissolved oxygen in water is important. Disponible en https://www.lenntech.com/why_the_oxygen_dissolved_is_important.htm
- [48]FONDRIEST. (2019). Water Temperature. Disponible en <https://www.fondriest.com/environmental-measurements/parameters/water-quality/water-temperature/>
- [49] Cárdenas A. Yolanda. (2010). Tratamiento de agua: coagulación y floculación. SEDEPAL, Perú. Disponible en http://www.sedapal.com.pe/c/document_library/get_file?uuid=2792d3e3-59b7-4b9e-ae55-56209841d9b8&groupId=10154
- [50] Kirchmer, C.; Pérez Carrión, J. Coagulación. Programa Regional OPS/ HPE/CEPIS de Mejoramiento de la Calidad del Agua para Consumo Humano. Versión preliminar. 1981.
- [51] Polymer Conditioning. Advances in environmental research 5, 129-136

Anexos

Anexo 1. Ficha de seguridad Policloruro de Aluminio




Hoja de Seguridad POLICLORURO DE ALUMINIO													
<p>Preparado por Química Integrada S.A. según Norma Técnica Colombiana NTC 4435 de 1998-07-22</p> <div style="text-align: center;">  </div> <p>IDENTIFICACION U.N : 3264 UN 3264</p>	<p style="text-align: center;">IDENTIFICACION NFPA</p> <div style="text-align: center;">  </div> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 30%;">Salud</td> <td style="width: 30%;">Azul</td> <td style="width: 10%; text-align: center;">1</td> </tr> <tr> <td>Inflamabilidad</td> <td>Rojo</td> <td style="text-align: center;">0</td> </tr> <tr> <td>Reactividad</td> <td>Amarillo</td> <td style="text-align: center;">0</td> </tr> <tr> <td>Riesgo especial</td> <td>Blanco</td> <td></td> </tr> </table>	Salud	Azul	1	Inflamabilidad	Rojo	0	Reactividad	Amarillo	0	Riesgo especial	Blanco	
Salud	Azul	1											
Inflamabilidad	Rojo	0											
Reactividad	Amarillo	0											
Riesgo especial	Blanco												
1. Identificación del producto y de la empresa													
<p>Producto : POLICLORURO DE ALUMINIO</p> <p>Sinónimos : PAC, Hidroxicloruro de Aluminio, Cloruro de Polialuminio</p> <p>Fabricante/distribuidor : Química Integrada S.A. QUINSA</p> <p>Dirección : KM. 34 Vía Neiva Bogotá</p> <p>Código postal y ciudad : Neiva - Huila</p> <p>País : Colombia</p> <p>Número de teléfono : 098-8389038</p> <p>Telefax : 098-8389224 / 8389327</p> <p>E-mail : quinsa01@hotmail.com</p> <p>CISTEMA : 01 – 8000 - 941414</p>													
2. Composición/información de los componentes													
El producto es un polímero inorgánico													
<p>Contenido de Alúmina : 22.0%</p> <p>Contenido de Acidez : 11.5%</p>													
3. Identificación de peligros													
<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>													

Fuente: Quinsa S.A.

4. Primeros auxilios
<p>Instrucciones generales Facilitar siempre al médico la hoja de datos de seguridad.</p> <p>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.</p> <p>En caso de contacto con los ojos Lavar los ojos afectados inmediatamente con agua abundante durante 15 minutos. Tratamiento médico necesario.</p> <p>En caso de ingestión No provocar el vómito. Requerir inmediatamente ayuda médica. Beber abundante agua</p>
5. Medidas de lucha contra incendios
<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>
6. Medidas a tomar en caso de vertido accidental
<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>
7. Manipulación y almacenamiento
<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>
8. Control de exposición y medidas de protección personal
<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>

Fuente: Quinsa S.A.

Anexo 2. Ficha de seguridad sulfato de aluminio liquido tipo B



SULFATO DE ALUMINIO TIPO B LIQUIDO													
<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> <div style="text-align: center;">   </div>	<p style="text-align: center;">IDENTIFICACION NFPA</p> <div style="text-align: center;">  </div> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 30%;">Salud</td> <td style="width: 30%;">Azul</td> <td style="width: 10%; text-align: center;">1</td> </tr> <tr> <td>Inflamabilidad</td> <td>Rojo</td> <td style="text-align: center;">0</td> </tr> <tr> <td>Reactividad</td> <td>Amarillo</td> <td style="text-align: center;">0</td> </tr> <tr> <td>Riesgo especial</td> <td>Blanco</td> <td></td> </tr> </table>	Salud	Azul	1	Inflamabilidad	Rojo	0	Reactividad	Amarillo	0	Riesgo especial	Blanco	
Salud	Azul	1											
Inflamabilidad	Rojo	0											
Reactividad	Amarillo	0											
Riesgo especial	Blanco												
1. Identificación del producto y de la empresa													
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												
2. Composición/información de los componentes													
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%												
3. Identificación de peligros													
<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>													

Fuente: Quinsa S.A.

4. Primeros auxilios
<p>Instrucciones generales Facilitar siempre al médico la hoja de datos de seguridad.</p> <p>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.</p> <p>En caso de contacto con los ojos Lavar los ojos afectados inmediatamente con agua abundante durante 15 minutos. Tratamiento médico necesario.</p> <p>En caso de ingestión No provocar el vómito. Requerir inmediatamente ayuda médica. Beber abundante agua</p>
5. Medidas de lucha contra incendios
<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>
6. Medidas a tomar en caso de vertido accidental
<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>
7. Manipulación y almacenamiento
<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>
8. Control de exposición y medidas de protección personal
<p>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.</p>

Fuente: Quinsa S.A.

Anexo 3. Ficha de seguridad sulfato de aluminio granular tipo B

Hoja de Seguridad													
SULFATO DE ALUMINIO TIPO B SOLIDO													
<p>Preparado por Quimica 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 3260</p> <div style="text-align: center;">  <p>UN 3260</p> </div>	<p style="text-align: center;">IDENTIFICACION NFPA</p> <div style="text-align: center;">  </div> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 30%;">Salud</td> <td style="width: 30%;">Azul</td> <td style="width: 40%; text-align: center;">1</td> </tr> <tr> <td>Inflamabilidad</td> <td>Rojo</td> <td style="text-align: center;">0</td> </tr> <tr> <td>Reactividad</td> <td>Amarillo</td> <td style="text-align: center;">0</td> </tr> <tr> <td>Riesgo especial</td> <td>Blanco</td> <td></td> </tr> </table>	Salud	Azul	1	Inflamabilidad	Rojo	0	Reactividad	Amarillo	0	Riesgo especial	Blanco	
Salud	Azul	1											
Inflamabilidad	Rojo	0											
Reactividad	Amarillo	0											
Riesgo especial	Blanco												
1. Identificación del producto y de la empresa													
Producto	: SULFATO DE ALUMINIO TIPO B SOLIDO												
Fabricante/distribuidor	: Quimica 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												
2. Composición/información de los componentes													
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	: 8.2%												
Contenido de Hierro	: 1.3%												
Contenido de Sulfatos	: 47.1%												
3. Identificación de peligros													
<p>En los ojos causa irritación.</p> <p>El material fino puede ser inhalado y producir irritaciones en mucosas.</p> <p>No es un producto combustible, pero emite vapores al ser incinerado.</p>													

Fuente: Quinsa S.A.

<p>En caso de inhalación Si se sienten molestias, acudir al médico.</p> <p>En caso de contacto con la piel Lavar la zona afectada inmediatamente con agua y jabón. Si persisten los síntomas de irritación, acudir al médico.</p> <p>En caso de contacto con los ojos Lavar los ojos afectados inmediatamente con agua abundante durante 15 minutos. Tratamiento médico necesario.</p> <p>En caso de ingestión No provocar el vómito. Requerir inmediatamente ayuda médica. Beber abundante agua</p>
5. Medidas de lucha contra incendios
<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>
6. Medidas a tomar en caso de vertido accidental
<p>El material en estado sólido es inofensivo. 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>
7. Manipulación y almacenamiento
<p>Almacenar sobre estibas, en un lugar protegido de la humedad. Evitar vertimientos a los cursos de agua.</p>
8. Control de exposición y medidas de protección personal
<p>Emplear gafas protectoras y mascarillas para evitar inhalar el material fino</p>
9. Propiedades físicas y químicas
<p>Formula Química : $Al_2(SO_4)_3 \cdot 14.3 H_2O$ Aspecto : Granular o Polvo Color : Café Olor : Ninguno Punto de fusión : ND Temperatura de ignición : ND El material no es corrosivo cuando está seco; es moderadamente corrosivo cuando se disuelve en agua.</p>
10. Estabilidad y reactividad
<p>El producto es estable en condiciones normales de almacenamiento. Reacciona con agentes quelantes.</p>

Fuente: Quinsa S.A.

Anexo 4. Datos recogidos para pH, datos de medias y totales

Datos de pH recogidos		
C 1	C 2	C 3
7,95	7,43	7,49
8,01	7,78	7,74
7,73	7,94	7,58
7,59	7,51	7,48
7,57	7,52	7,66
7,58	7,51	7,6

Fuente: Autores

Totales y medias para pH				
pH	C 1	C 2	C 3	Total
Media	7,615	7,73833333	7,5916667	
n°datos	6	6	6	
y.	45,69	46,43	45,55	
Media gen.				7,6483333
N°datos				18
Y..				137,67

Fuente: Autores

Anexo 5. Datos recogidos para temperatura, datos de medias y totales

Datos de recogidos Temperatura		
C 1	C 2	C 3
21,1	21,3	21
20,9	21,1	21,3
21,3	22,1	21,5
21,1	21,7	21,5
21	21,9	21,4
21,2	21,7	21,4

Fuente: Autores

Temp	C 1	C 2	C 3	Total
Media	21,1	21,63333333	21,35	
n° datos	6	6	6	
y.	126,6	129,8	128,1	
Media Gen.				21,3611111
N° datos				18
Y..				384,5

Fuente: Autores

Anexo 6. Datos recogidos para color aparente, datos de medias y totales

Datos para Color Aparente		
C 1	C 2	C 3
184	166	90
193	169	98
193	222	85
191	90	79
128	121	75
128	84	91

Fuente: Autores

Totales y medias para Color Aparente				
Color A.	C 1	C 2	C 3	Total
Media	169,5	142	86,33333333	
n° de datos	6	6	6	
y.	1017	852	518	
Media Gen.				1132,611111
N° de datos				18
Y..				2387

Fuente: Autores

Anexo 7. Datos recogidos para oxígeno disuelto, datos de medias y totales

Datos para Oxígeno Disuelto		
C 1	C 2	C 3
7,92	8,25	8,02
8,05	7,88	8,04
8,02	7,64	7,92
8,01	8,05	8,14
8,31	7,96	8,08
8,07	8,09	7,94

Fuente: Autores

Totales y medias para Oxígeno Disuelto				
Color A.	C 1	C 2	C 3	Total
Media	8,06333333	7,97833333	8,02333333	
n° de datos	6	6	6	
y.	48,38	47,87	48,14	
Media Gen.				8,02166667
N° de datos				18
Y..				144,39

Fuente: Autores

Anexo 8. Datos recogidos para conductividad, datos de medias y totales

Datos para Conductividad		
C 1	C 2	C 3
184,1	185,2	189,2
185	184,9	191,8
184,5	184,9	189,1
189,3	187,4	188,9
215,1	188,6	188,6
192,5	189,5	184,9

Fuente: Autores

Totales y medias para Conductividad				
Conductividad	C 1	C 2	C 3	Total
Media	191,75	186,75	188,75	
n° de datos	6	6	6	
yi.	1150,5	1120,5	1132,5	
Media Gen.				189,083333
N° de datos				18
Y..				3403,5

Fuente: Autores

Anexo 9. Datos recogidos para alcalinidad, datos de medias y totales

Datos para Alcanilidad		
C 1	C 2	C 3
129,56	118,74	113,12
102,3	110,22	116,74
107,92	115,4	16,89
104,04	114,52	16,65
104,07	106,7	16,91
107,2	108,34	16,53

Fuente: Autores

Totales y medias para Alcalinidad				
Alcalinidad	C 1	C 2	C 3	Total
Media	109,181667	112,32	49,4733333	
n° de datos	6	6	6	
y.	655,090002	673,92	296,84	
Media Gen.				90,3250001
N° de datos				18
Y..				1625,85

Fuente: Autores

Anexo 10. Datos recogidos para dureza, datos de medias y totales

Datos para Dureza		
C 1	C 2	C 3
181,9	262,2	158,4
118,6	138,4	134
163,6	109,38	187,4
121,6	170,1	143,6
118	156,6	135,4
127,8	160,4	141,6

Fuente: Autores

Totales y medias para Dureza				
Dureza	C 1	C 2	C 3	Total
Media	138,583333	166,18	150,066667	
n° de datos	6	6	6	
y.	831,5	997,08	900,400002	
Media Gen.				137,270555
N° de datos				18
Y..				2470,87

Fuente: Autores

Anexo 11. Datos recogidos para turbidez, datos de medias y totales

Datos para Turbidez		
C 1	C 2	C 3
21,4	18,6	16,4
21,1	18,6	17,89
21,3	24,9	16,89
20,1	16,96	16,65
19,9	16,71	16,91
19,3	16,88	16,53

Fuente: Autores

Totales y medias para Turbidez				
Turbidez	C 1	C 2	C 3	Total
Media	20,5166667	18,775	16,8783333	
n° de datos	6	6	6	
y.	123,1	112,65	101,27	
Media Gen.				18,723333
N de datos				18
Y..				337,02

Fuente: Autores

Anexos 11. Datos de turbidez final recogidos en la etapa de floculación

Gradiente (S-1)	RPM	Tiempo de Floculación (Minutos)						
		1	10	20	30	40	50	60
3	5	18,4 NTU	9,93 NTU	5,14 NTU	3,18 NTU	3,91 NTU	2,04 NTU	3,52 NTU
10	15	10,56 NTU	5,55 NTU	2,45 NTU	12,29 NTU	4,6 NTU	5,82 NTU	5,28 NTU
23	30	8,97 NTU	3,41 NTU	2,04 NTU	3,55 NTU	5 NTU	4,05 NTU	3,77 NTU
30	40	13,57 NTU	8,01 NTU	6,96 NTU	9,7 NTU	5,6 NTU	8,79 NTU	15,3 NTU
52	60	10,88 NTU	9,85 NTU	10,88 NTU	9,15 NTU	13,61 NTU	8,24 NTU	14,89 NTU
61	70	12,7 NTU	8,74 NTU	14,84 NTU	11,11 NTU	10,89 NTU	14,52 NTU	19,6 NTU

Fuente: Autores

Anexos 12. Log de tiempo de floculación vs Log gradiente de velocidad.

Log Tiempo de Floculación							
Log Gradiente	0	1	1,30103	1,47712125	1,60205999	1,69897	1,77815125
0,477121255	100%	54%	28%	17%	21%	11%	19%
1	57%	30%	13%	67%	25%	32%	29%
1,361727836	49%	19%	11%	19%	27%	22%	20%
1,477121255	74%	44%	38%	53%	30%	48%	83%
1,716003344	59%	25%	59%	50%	74%	45%	71%
1,785329835	69%	47%	81%	60%	59%	79%	100%

Fuente: Autores