

**Estudio de coagulación del proceso fisicoquímico de lamelas de una PTARI. Un
estudio de caso en Sesquilé**

Nelson David Arteaga Sandoval

Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD

Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuaria y de Medio Ambientes – ECAPMA

Programa de Ingeniería Ambiental

Bogotá 2022

**Estudio de coagulación del proceso fisicoquímico de lamelas de una PTARI. Un
estudio de caso en Sesquilé**

Nelson David Arteaga Sandoval

Trabajo para optar el título de Ingeniero Ambiental

Director:

Sonia Esperanza Ruiz Balaguera

Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD

Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuaria y de Medio Ambientes – ECAPMA

Programa de Ingeniería Ambiental

Bogotá 2022

Resumen

Este proyecto consiste en el estudio del proceso de coagulación de un sistema fisicoquímico de lamelas de una PTARI, donde se comparan los coagulantes sulfato de aluminio y policloruro de aluminio, con el objeto de determinar cuál de los dos es el más eficiente y las variables de proceso que representan mayor incidencia en la eficiencia de remoción de parámetros contaminantes como sólidos suspendidos totales (SST), demanda química de oxígeno (DQO), color y turbidez. Como metodología se estableció un diseño experimental factorial 2^4 , para cada uno de los coagulantes, en el cual se definieron 4 factores como variables independientes y en los que se establecieron como variable de respuesta SST, juntamente con otros parámetros como la DQO, color y turbidez. Los experimentos se realizaron por triplicado para un total de 48 experimentos con cada coagulante en un equipo floculador piloto como es el test de jarras. Finalmente, los resultados obtenidos por técnicas analíticas de laboratorio se someten a un análisis estadístico de varianza ANOVA, por medio del software MINITAB, el cual permitió la interpretación de los datos y por ende lograr los objetivos establecidos para el estudio de caso.

Palabras clave: Coagulantes, polímero, turbidez, sólidos, variables

Abstract

This Project consists of the study of the coagulation process of a physicochemical system of Lamelas of a WWTP, where aluminum sulfate and aluminum polychloride coagulants are compared, in order to determine which of the two is the most efficient and the variables of process that represented a greater incidence in the removal efficiency of polluting parameters such as total suspended solids (TSS), chemical oxygen demand (COD), color and turbidity. As a methodology, a 2^4 factorial experimental design was established for each of the coagulants, in which 4 factors were defined as independent variables and in which SST was found as a response variable, together with other parameters such as COD, color and turbidity. The experiments were carried out in triplicate for a total of 48 experiments with each coagulant in a pilot flocculator equipment such as the jar test. Finally, the results obtained by laboratory analytical techniques are subjected to an ANOVA variance statistic, through the analysis of MINITAB software, which allowed the interpretation of the data and finally achieve the objectives established for the case study.

Keywords: Coagulants, polymer, turbidity, solids, variables.

Tabla de Contenido

Introducción	14
Objetivos	15
Objetivo General	15
Objetivos Específicos	15
Definición del problema	16
Justificación	19
Marco Teórico	21
Demanda, Abastecimiento y Disposición del Agua	21
Generación de Aguas Residuales	22
Normatividad	24
Decreto - Ley 2811 de 1974	24
Ley 9 de 1979	25
Decreto 1594 de 1984	25
Decreto 3930 de 2010	25
Resolución 0631 de 2015	25
Decreto 4090 de 2017	25
Tratamiento del Agua Residual	25
Tipos de tratamiento de aguas residuales	27
Tratamiento Físico Químico	28

	6
Coagulación	28
Teoría de la coagulación	29
Factores influyentes en el proceso de coagulación	30
Clases de coagulantes	33
Floculación	34
Formas de Floculación	34
Tipos de floculantes	35
Estado del Arte	35
Estudios de coagulación	35
Metodología	44
Parte Experimental	44
Parte Pre - experimental	44
Agua residual industrial	44
Parámetros de Prueba de jarras preliminar	44
Reactivos coagulantes y polímero	44
Diseño Experimental 2 ⁴	45
Prueba de Jarras	46
Análisis de laboratorio	47
Caracterización inicial del agua residual	48
Análisis de los datos	49

	7
Resultados	50
Resultados parte pre - experimental	50
Resultados del pre- experimento	51
Desarrollo del Diseño 2^4 con Sulfato de Aluminio	52
Resultados del Diseño Experimental 2^4 con Sulfato de Aluminio	54
Desarrollo del Diseño 2^4 con Policloruro de Aluminio	56
Resultados del Diseño Experimental 2^4 con Policloruro de Aluminio	58
Análisis de los Datos	60
Análisis de Resultados del Diseño Experimental 2^4 con Sulfato de Aluminio.	60
Análisis estadístico para la variable de respuesta SST con el uso de sulfato de aluminio	60
Análisis estadístico para la variable de respuesta turbidez con el uso de sulfato de aluminio.	65
Análisis estadístico para la variable de respuesta % de remoción de Color con sulfato de aluminio.	70
Análisis estadístico para la variable de respuesta % de remoción de DQO con sulfato de aluminio.	75
Análisis de resultados del diseño experimental 2^4 con PAC.	80
Análisis estadístico para la variable de respuesta SST con el uso de PAC.	80
Análisis estadístico para la variable de respuestas turbidez con el uso de PAC.	85

Análisis estadístico para la variable de respuesta % de remoción de color con el uso de PAC.	90
Análisis estadístico para la variable de respuesta % de remoción de DQO con el uso de PAC.	95
Cumplimiento normativo.	100
Discusión	103
Conclusiones	106
Recomendaciones	107
Referencias bibliográficas	108

Lista de Tablas

Tabla 1 Tipos de agua residual _____	24
Tabla 2 Comparación característica entre el Sulfato de aluminio y el PAC _____	34
Tabla 3 Estado del arte _____	40
Tabla 4 Variables del diseño experimental 2 ⁴ _____	46
Tabla 5 Caracterización fisicoquímica del agua residual _____	48
Tabla 6 Promedio de remoción de parámetros contaminantes con Sulfato de aluminio _____	51
Tabla 7 Promedio de remoción de parámetros contaminantes con PAC _____	51
Tabla 8 Notación de yates para la interacción de factores y sus niveles para el diseño con sulfatos de aluminio _____	53
Tabla 9 % de remoción promedio de los tratamientos realizados para SST y turbidez con sulfato de aluminio _____	54
Tabla 10 % de remoción promedio de los tratamientos realizados para color y DQO con sulfato de aluminio _____	55
Tabla 11 Notación de yates para la interacción de factores y sus niveles con PAC _____	57
Tabla 12 % de remoción promedio de los tratamientos realizados para SST y turbidez con PAC _____	58
Tabla 13 % de remoción de los tratamientos realizados para color y DQO _____	59
Tabla 14 Análisis de varianza con respuesta % de remoción de SST con sulfato de aluminio _	60
Tabla 15 Combinaciones con mayor % de remoción de SST _____	65
Tabla 16 Análisis de varianza con respuesta % de remoción de turbidez con sulfato de aluminio. _____	65
Tabla 17 Combinación de variables con mayor % de remoción de turbidez _____	70

Tabla 18 <i>Análisis de varianza con respuesta % de remoción de color con sulfato de aluminio</i>	70
Tabla 19 <i>Combinaciones con mayor % de remoción de color</i> _____	75
Tabla 20 <i>Análisis de varianza con respuesta % de remoción de DQO con sulfato de aluminio</i>	75
Tabla 21 <i>Combinaciones con mayor % de remoción de DQO</i> _____	80
Tabla 22 <i>Análisis de varianza con respuesta % de remoción de SST con PAC</i> _____	80
Tabla 23 <i>Combinaciones con mayor % de remoción de SST</i> _____	85
Tabla 24 <i>Análisis de varianza con respuesta % de remoción de turbidez con PAC</i> _____	85
Tabla 25 <i>Combinaciones con mayor % de remoción de turbidez</i> _____	90
Tabla 26 _____	90
Tabla 27 <i>Combinaciones con mayor % de remoción de color</i> _____	95
Tabla 28 <i>Análisis de varianza con respuesta % de remoción de DQO</i> _____	95
Tabla 29 <i>Combinaciones con mayor % de remoción de DQO</i> _____	99
Tabla 30 <i>Concentraciones de SST y DQO obtenidas después del tratamiento con sulfato de aluminio</i> _____	100
Tabla 31 <i>Concentraciones de SST y DQO obtenidas después del tratamiento con PAC</i> ____	101

Lista de Figuras

Figura 1. Diagrama de flujo de agua residual generada en el proceso de limpieza de equipos de ultrafiltración _____	18
Figura 2. Estabilidad de los coloides en el agua _____	29
Figura 3. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados con variable de respuesta % de remoción de SST _____	62
Figura 4. Gráfica de interacción de factores y el % de remoción de SST _____	63
Figura 5. Gráfica de cubos para medias ajustadas con variable de respuesta % e remoción de SST _____	64
Figura 6. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados con variable de repuesta % de remoción de turbidez _____	67
Figura 7. Gráfica de interacción de factores con variable de respuesta % de remoción de turbidez _____	68
Figura 8. Gráfica de cubos para medias ajustadas con variable de respuesta % de remoción de turbidez _____	69
Figura 9. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados con variable de respuesta % de remoción de color _____	72
Figura 10. Gráfica de interacción de factores con variable de respuesta % de remoción de color _____	73
Figura 11. Gráfica de cubos para media ajustadas con variable de respuesta % de remoción de color _____	74
Figura 12. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados con variable de respuesta % de remoción de color _____	77

Figura 13. Gráfica de interacción de factores con variable de respuesta % de remoción de DQO	78
Figura 14. Gráfica de cubos para medias ajustadas con variable de respuesta % de remoción de DQO	79
Figura 15. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados con variable de respuesta % de remoción de SST	82
Figura 16. Gráfica de interacción de factores con variable de respuesta % de remoción de SST	83
Figura 17. Gráfica de cubos de media ajustadas con variable de respuesta % de remoción de SST	84
Figura 18. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados con variable de respuesta % de remoción de turbidez	87
Figura 19. Gráfica de interacción con variable de respuesta % de remoción de turbidez	88
Figura 20. Gráfica de cubos para medias ajustadas con variable de respuesta % de remoción de turbidez	89
Figura 21. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados con variable de respuesta % de remoción de color	92
Figura 22. Gráfica de interacción con variable de respuesta % de remoción de color	93
Figura 23. Gráfica de cubos para medias ajustadas con variable de respuesta % de remoción de color	94
Figura 24. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados con variable de respuesta % de remoción de DQO	97
Figura 25. Gráfica de interacción con variable de respuesta % de remoción de DQO	98

Figura 26. *Gráfica de cubos para medias ajustadas con variable de respuesta % de remoción de DQO*

Introducción

El presente estudio evalúa la aplicación de los procesos de coagulación y floculación implementados para el tratamiento de aguas residuales industriales generadas durante la limpieza química y la limpieza con retrolavados de unidades de ultrafiltración integradas en el tren de tratamiento de aguas residuales de una cervecería.

Estas aguas presentan características contaminantes como sólidos suspendidos, materia orgánica, color, turbidez, entre otros, con especificaciones mayores a las establecidas en el permiso de vertimientos otorgado por la CAR a la cervecería.

Para mejorar la remoción de estos contaminantes se plantea el uso de los coagulantes sulfato de aluminio y policloruro de aluminio, para luego realizar una comparación entre estos con el fin de implementar el que mejor eficiencia de remoción presente y así poder disponer de estas aguas de manera que cumplan las especificaciones establecidas por la CAR y posteriormente verterlas al río Bogotá.

Con el objeto de encontrar el tipo de coagulante y la dosis con mejor eficiencia de remoción, se desarrolló un diseño experimental factorial 2^4 , el cual permitió determinar las mejores condiciones de proceso para verter el agua de manera segura.

Se eligió implementar el diseño experimental 2^4 en la metodología, por permitir una interacción entre las diversas variables dependientes e independientes, siendo posible determinar los factores que mayor incidencia tienen sobre las variables de respuesta para lograr encontrar las condiciones más adecuadas del proceso y aplicarlas a una escala real.

Objetivos

Objetivo general:

- Evaluar la eficiencia en porcentajes de remoción de parámetros contaminantes del proceso de coagulación del sistema fisicoquímico de lamelas de una PTARI, con el uso de coagulantes químicos a través de la prueba de jarras y el análisis de parámetros contaminantes para conocer su cumplimiento normativo a nivel ambiental vigente en Colombia.

Objetivos específicos:

- Determinar la eficiencia de remoción de parámetros contaminantes en aguas industriales usando sulfato de aluminio y policloruro de aluminio, para implementar el que presente mayor rendimiento en procesos de coagulación de agua residual industrial.
- Encontrar la mejor combinación de variables en el proceso de coagulación y la dosis adecuada de coagulante, para integrarla al tratamiento fisicoquímico de aguas residuales industriales del estudio de caso.
- Comparar los resultados obtenidos durante el ensayo con la normatividad aplicable a vertimientos para conocer el nivel de cumplimiento del agua a verter.

Definición del Problema

En la industria, es común relacionar la generación de aguas residuales directamente con los procesos productivos, sin embargo, detrás de los procesos de transformación de productos, se encuentran otros procesos que comprenden la limpieza de tanques, equipos y líneas de transporte del producto, donde se generan residuales líquidos que deben ser susceptibles de tratamiento antes de ser vertidos al cuerpo hídrico.

En este caso de estudio, se han identificado algunas fuentes de generación de vertimientos provenientes de la limpieza de equipos de ultrafiltración, tanto de aguas potables como residuales y algunos retrolavados de filtros de carbón de una industria cervecera. En este tipo de afluentes se ha identificado a través de su caracterización una generación de sólidos suspendidos totales con concentraciones entre 70 mg/l y 175 mg/l, concentraciones de DQO entre 200 mg/l y 500 mg/l, incluyendo valores de color hasta de 1380 Uptc que deben ser removidos, ya que comparados con la normatividad ambiental vigente, resolución 0631 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2015), se establece un límite máximo en el vertimiento de aguas residuales provenientes de la elaboración de maltas y cervezas de 200 mg/l para DQO y 50 mg/l para SST.

Para este tipo de aguas, la cervecería cuenta con un tren de tratamiento primario donde se usa la coagulación, floculación y sedimentación, tratando únicamente el residual de los saneamientos de las membranas de ultrafiltración que tratan el agua residual cervecera.

Cabe decir, que el efluente del tren de tratamiento fisicoquímico converge en un canal de clorinación junto con el efluente proveniente del tratamiento de aguas cerveceras, para luego ser descartado al río Bogotá. El inconveniente allí es que el efluente fisicoquímico tiende a contaminar el canal de clorinación, aumentando las concentraciones de DQO y sólidos

suspendidos, afectando el vertimiento al río con concentraciones de DQO mayores a 50 mg/l y por ende generando incumplimiento con la resolución 4090 del 2017 establecida para el cumplimiento del permiso de vertimientos de la cervecería, siendo el valor de cumplimiento de DQO menor a 50 mg/l y SST menor a 40mg/l.

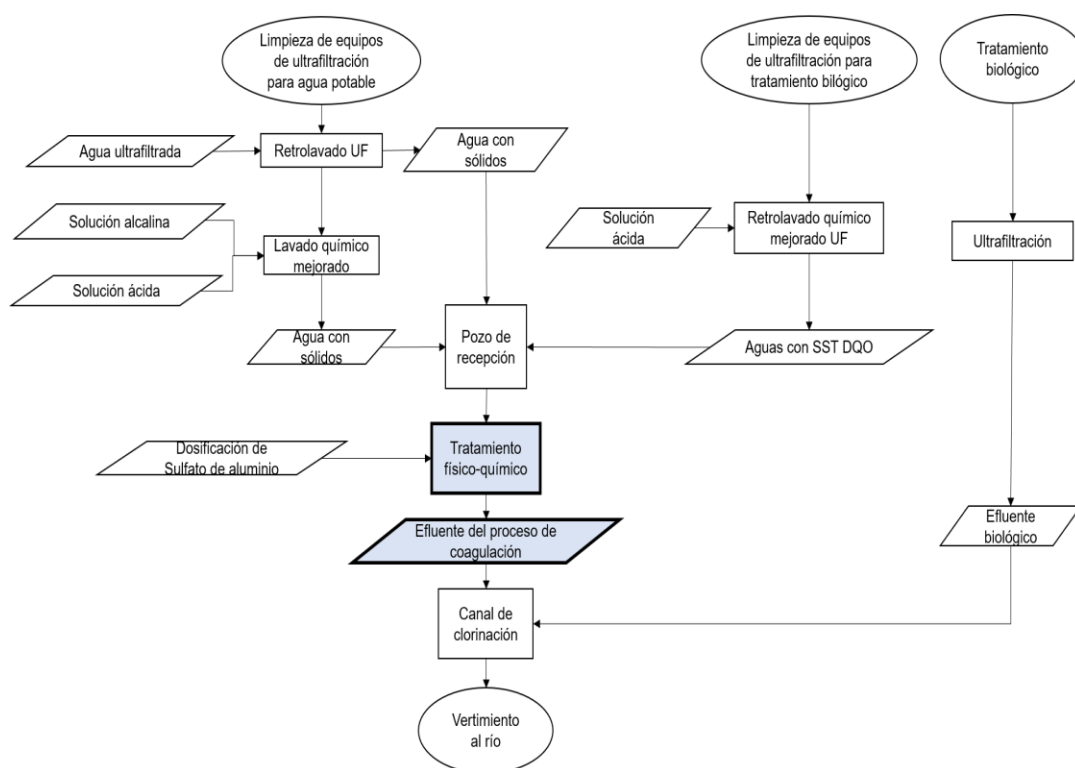
Sumado a lo anterior, se detecta la necesidad de establecer las dosis óptimas para el proceso de coagulación, en el que se usa sulfato de aluminio como agente coagulante, ya que se identifica una alta dosificación del producto durante la operación, con dosis entre 1500 ppm y 2000 ppm, lo cual podría ser una causa de afectación del sistema, por lo que se pretende implementar el coagulante policloruro de aluminio (PAC), ya que se considera como un coagulante alternativo de mejor desempeño por tener mínimas variaciones en el proceso de coagulación frente a los coagulantes convencionales. (Cogollo, 2011)

De esta manera se desea comparar la eficiencia de los dos coagulantes y establecer el que represente mayor eficiencia de remoción junto a las dosis óptimas y la configuración de variables de proceso que representen mayor rendimiento.

Para comprender mejor el punto de generación del agua residual den la cervecería, se presenta a continuación un diagrama de procesos del tema en cuestión. (Ver figura 1.)

Figura 1

Diagrama de flujo de agua residual generada en el proceso de limpieza de equipos de ultrafiltración



Fuente. Autoría propia

Justificación

En vista de que el congreso de la república en la Constituyente (1991) indica que el gozo de un ambiente sano es derecho fundamental para los ciudadanos y en el artículo No 8 de la misma, se dictamina como obligación del estado y de las personas la protección de riquezas culturales y naturales de la nación, se considera necesario el cumplimiento de lo dicho, para velar por la protección de los recursos naturales y promover la responsabilidad social para el disfrute de estos por parte de las generaciones venideras.

Por la protección a la salud y como medidas sanitarias es necesario promover la recuperación del recurso hídrico a través de sistemas eficientes, que garanticen la calidad del agua antes de ser vertida con el fin de evitar el aumento de cargas contaminantes que puedan generar problemas en la salud de las personas. De acuerdo con la OMS (2019), cerca de 842.000 personas mueren al año por enfermedades relacionadas con el consumo de agua contaminada, por lo que, si se realizara una adecuada gestión de aguas residuales urbanas, agrícolas e industriales, se podría evitar la muerte de aproximadamente 361.000 menores a nivel mundial. (OMS, 2019)

El recurso hídrico requiere características adecuadas como lo establece el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2015) en la resolución 0631 en cuanto a parámetros y límites permisibles de los vertimientos se refiere y la resolución 4090 de la CAR, donde se otorga el permiso de vertimientos para la cervecería.

Se considera necesario este estudio con el fin de mejorar la operación del sistema y transmitir el conocimiento al personal operativo, por lo que se pretende estudiar el proceso de coagulación, ya que el uso de coagulantes en aguas residuales difiere con las condiciones del medio donde se implementen, sumado a las ventajas y desventajas que tiene el uso de estos productos, siendo

necesaria su evaluación y análisis de forma que permitan tomar la mejor decisión en el momento de definir y escoger el tipo de coagulante con el que se obtienen los mejores resultados.

Marco Teórico

Demanda, Abastecimiento y Disposición del Agua

El agua es un recurso fundamental para suplir las necesidades básicas del hombre y a su vez para realizar actividades socio económicas (Del Valle, 2017). Es un recurso que hoy en día es más difícil de proveer para el uso doméstico, industrial y agrario, lo cual es una problemática referente a la disponibilidad y el aumento en la demanda, además de la contaminación y desperdicio del recurso (Bernal, Solís, Linares, Barrera & Colín, 2011).

Si bien es cierto, el agua dulce es necesaria, pero también lo es, la importancia de la calidad de esta, ya que el crecimiento industrial y poblacional ha provocado su pérdida, aportando elementos contaminantes como sólidos suspendidos, físicos y químicos que se transportan a través del ciclo hidrológico (Blanco & De la Torre, 2017). Lo anterior implica la necesidad de volverla apta para el consumo humano y para el desarrollo de diversas actividades, como también para satisfacer la demanda por necesidades básicas (Blanco & De la Torre, 2017).

La generación de aguas servidas, vertidas a los cuerpos como ríos, lagunas o quebradas sin tratamiento alguno, cambia las características y su composición microbiana, afectando la salud humana por su ingestión, lo que implica brotes epidemiológicos (Agudelo, 2009). De ahí la importancia de que tanto el acceso agua, como la calidad de esta, sean parte fundamental de la gestión integral del recurso hídrico, con el fin de asegurar el abastecimiento y demanda que se requiera para proteger la salud (Agudelo, 2009).

A nivel mundial, se presentan situaciones de estrés hídrico y una generación de vertimientos incontrolada, con presencia de residuos líquidos industriales que afectan el recurso. En Europa, solo 2 de los 55 ríos del continente, cuentan con calidad favorable, mientras que, en África, el recurso hídrico se encuentra en un estado crítico y en Estados Unidos de Norte América, el 40%

de sus ríos se encuentran contaminados. Por su parte, Colombia, aunque es considerado como un país rico en fuentes hídricas, presenta problemas por contaminación y desabastecimiento, claro ejemplo es el departamento del Chocó, donde solo el 26% de la población tiene acceso a la misma y tan solo por 3 horas al día (Agudelo, 2009).

Por lo tanto, se entiende que la disponibilidad de agua no cubre las necesidades de las poblaciones, que se necesita un control para evitar la contaminación del recurso hídrico y que se debe contar con estructuras, métodos y tecnologías que permitan cambiar las características fisicoquímicas del agua, como el aseguramiento, la inocuidad y la demanda.

Generación de Aguas Residuales

El desarrollo de actividades humanas implica que se generen residuos sólidos y líquidos, que terminan por llegar de alguna forma a las aguas residuales. Su volumen y características difiere del comportamiento de las personas y de los diversos procesos industriales, lo cual indica que la producción de agua residual no será la misma para la industria que para los hogares (Romero Zúñiga, 2001, p 35).

Según Fúquene y Yate (2018) el uso de agua en procesos industriales, domésticos y ganaderos, entre otros, implica que se generen residuos líquidos que cambian las características fisicoquímicas del recurso hídrico, siendo necesaria la remoción de la contaminación a través de su tratabilidad antes de ser vertida. De otro lado, es importante tener en cuenta que:

Disponer de agua suficiente y con adecuados niveles de calidad para el consumo humano, la higiene y la salud, supone contar con adecuadas infraestructuras de abastecimiento y alcantarillado. Las primeras necesitan infraestructuras de regulación, captación, distribución y potabilización para llevarlas hasta cada punto de demanda el recurso. Las segundas, una red de colectores que conduzca las aguas residuales a plantas depuradoras, para la eliminación de

sustancias contaminantes, previamente su devolución a los cauces naturales (Del Valle, 2017, p.76).

Blanco y De la Torre (2017) indican que la contaminación de las aguas se genera a través de vertidos provenientes de:

Actividades domésticas, como el lavado de ropa, utensilios de cocina, aseo personal y general, uso de agua para suplir las necesidades básicas, que aportan al agua contaminantes de tipo orgánico, grasas y detergentes (Blanco & De la Torre, 2017, p. 35).

Actividades industriales, como la minería, fábricas de producción, entre otras, que de acuerdo con el tipo de actividades que realicen, se clasifican las características de las aguas residuales que genera cada una. Las condiciones de estas aguas son variables y pueden presentar altas y bajas cargas contaminantes de sólidos, pH y temperatura inestable que deben ser controladas antes de descargarlas al ambiente (Blanco & De la Torre, 2017, p. 36).

Actividades agrícolas y ganaderas, en las que se presenta la contaminación por el uso de agua para ganado, la irrigación o la escorrentía de la plaza agrícola. Este tipo de aguas presenta características fitosanitarias, contenidos de sólidos y sales provenientes de fertilizantes junto con residual de excretas del ganado. Su descarga suele hacerse a los cuerpos de agua sin tratamiento previo (Blanco & De la Torre, 2017, p. 36).

Acerca del tipo de aguas residuales, como se indica en la tabla 1, Romero (2001) menciona que las redes de recolección influyen en las características que las componen y que en algunos países se recolectan por separado. Sin embargo, algunas redes de recolección antiguas combinan las aguas residuales de diferentes tipos y las descargan al cuerpo hídrico sin tratamiento alguno (p. 35).

Tabla 1*Tipos de agua residual.*

Aguas residuales urbanas	Aguas residuales generadas internamente en las plantas de tratamiento
Aguas residuales domésticas	Sobrenadante de espesores
Aguas residuales de instituciones	Sobrenadante de digestores
Aguas residuales industriales	Aguas residuales de rechazo de deshidratación de lodos
Infiltración en el sistema de alcantarillado	Drenajes de lechos de secado de lodos
Pluviales	Agua drenada de lechos de secado de lodos
Lixiviados	Aguas de limpieza de filtros
Aguas residuales de fosas sépticas	Aguas de limpieza de equipos

*Nota. Fuente: Romero (2001, p. 35)***Normatividad**

La regulación del recurso hídrico y el manejo de cuencas en Colombia hacia el año de 1940 inició con el decreto 1381 expedido por el ministerio de economía nacional. No obstante, el decreto – ley 2811 de 1974 fue el que inicio la planeación ambiental del país. Esta norma, denominada como el código nacional de los recursos naturales renovables y de protección del medio ambiente, establece los principios normativos y regulación para planificar el manejo de recursos como aire, flora, fauna suelo y agua del país (Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo, 2014).

En cuanto al tema de cumplimiento normativo, para manejo de aguas y vertimientos se debe considerar la siguiente normativa.

Decreto - Ley 2811 de 1974

Denominado Código Nacional de los Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente. Dicta las acciones de prevención y control de la contaminación del recurso

hídrico, para garantizar la calidad del agua y su posterior uso (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 1974).

Ley 9 de 1979

Conocida como Código Sanitario Nacional. Establece los procedimientos y las medidas para llevar a cabo la regulación y control de los vertimientos (Ministerio de Salud, 1979).

Decreto 1594 de 1984

Reglamenta el título 1 de la ley 9 de 1979 y el capítulo II, del título IV, parte III, libro II y título III de la parte III del libro I del decreto 2811 de 1974 en cuanto a usos de agua y vertimientos líquidos (Colombia Leyes y Decretos, 1984).

Decreto 3930 de 2010

Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9ª de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II del Decreto-ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones (Ministerio de Ambiente, 2010).

Resolución 0631 de 2015

Establece los parámetros y valores límites permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015).

Decreto 4090 de 2017

Por la que se aclara la resolución 2559 del 17 de septiembre de 2017 y se modifica una norma de vertimientos.

Tratamiento del Agua Residual

Los cuerpos de agua tienen la capacidad de auto depurarse y pueden amortiguar ciertas concentraciones de toxicidad que se les presente, no obstante, el crecimiento poblacional y el

desarrollo industrial han sido factores que provocan la contaminación en el agua, reduciendo la capacidad de autodepuración y la calidad de esta (Blanco & De la Torre, 2017, p. 35).

La falta de oxígeno por la contaminación y la presencia de otros parámetros contaminantes en el agua, aceleran la eutrofización y afectan los ecosistemas acuáticos, inhibiendo algunas especies y causando impacto no solo en el ambiente, sino en la salud humana (Del Valle, 2017, p. 84). Las afecciones a la salud por agua contaminada se presentan por vertidos en ríos, lagos y otro tipo de aguas superficiales, causando enfermedades graves como cáncer y pueden provocar la muerte por la ingestión de elementos tóxicos (Agudelo, 2009, p. 98).

Por otra parte, los países han tenido avances a nivel normativo, donde se establecen límites para la calidad de agua (Blanco & De la Torre, 2017) y estos deben ser capaces de construir y gestionar fundamentos de regulación e implementación de infraestructuras para el tratamiento de agua potable y residual (Del Valle, 2017, p. 93).

Según Rojas (2002), los tratamientos de agua consisten en la remoción de parámetros contaminantes y se realizan para evitar que dicha contaminación llegue a los cuerpos de agua. Su argumentación se deriva de razones higiénicas, estéticas, económicas y legales.

Este mismo, Indica que hacia el año 1800, las prácticas de tratabilidad del agua consistían en verter las aguas residuales al suelo, lo que provocó la epidemia del cólera en Inglaterra. Debido a esta problemática se implementaron las redes de alcantarillado, pero aún no se le daba importancia al tratamiento de las aguas servidas (Rojas, 2002, p. 3).

Por otra parte, Betancur, Jiménez y Linares (2012), mencionan que la turbidez en el agua fue un parámetro precursor para la implementación de tratamientos de agua por estar asociada con el color y sabor desagradable. De otro lado, entre los años de 1860 y 1925, aparecieron distintos métodos de tratamiento de aguas como los primeros lechos sépticos, la precipitación química,

lodos activos y la cloración, entre otros. Si bien es cierto, estos métodos son aplicados desde tiempos atrás, no quiere decir que sean obsoletos, es más, la precipitación química y los sistemas de lodos activados son unidades de tratamiento que se usan con frecuencia en la actualidad (Rojas, 2002, p. 4).

Dentro de los sistemas de tratamiento de aguas se encuentran unidades seccionadas conocidas como pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento biológico y tratamientos terciarios. Según las características del agua se debe elegir el tratamiento más adecuado y se deben tener en cuenta los costos asociados a su implementación (Fúquene & Yate, 2018).

Tipos de tratamiento de aguas residuales

Los sistemas de tratamientos de aguas incluyen procesos unitarios fisicoquímicos y biológicos. Los fisicoquímicos, aplican los principios de separación de partículas del agua por métodos de sedimentación y flotación (Osorio, Carrillo, Negrete, Loo & Rivera, 2021) mientras que los procesos biológicos se refieren a la reducción de la contaminación en el agua por actividad microbiana (Fúquene & Yate, 2018, p. 2).

De acuerdo con lo anterior, los tratamientos de aguas se componen de unidades como:

Tratamiento preliminar. Se basa en la remoción de sólidos de gran volumen y regulación de caudales, donde se usan las rejillas, desarenadores y tanques de igualación (Osorio et al., 2021, p. 237).

Tratamiento primario. Su proceso se basa en la eliminación de sólidos en suspensión a través de la decantación, flotación y filtración, incluyendo métodos como la coagulación y floculación (Fúquene & Yate, 2018, p. 2).

Tratamiento secundario. Trata de la remoción de contaminantes por medios biológicos. Este incluye la degradación aerobia y anaerobia con fines de remoción de materia orgánica.

(Fúquene & Yate, 2018). También se encuentran sistemas de biomasa adherida (Osorio et al., 2021, p 238).

Tratamiento terciario. Se usa para remover contaminantes orgánicos y la inhibición de material biológico. Se pueden encontrar sistemas como membranas de filtración, sistemas de adsorción e intercambio iónico (Fúquene & Yate, 2018, p. 2).

Tratamiento Fisicoquímico

Coagulación

De acuerdo con Bernal et al. (2011), entre las tecnologías de tratamiento de aguas se encuentra el proceso físico químico, en el que se usan reactivos químicos llamados coagulantes. Esta metodología conocida también como coagulación, consiste en la desestabilización de partículas coloidales gracias a la neutralización de las fuerzas que las mantienen separadas por adición de coagulantes químicos (Fúquene & Yate, 2018, p. 2).

El proceso de coagulación se usa para eliminar la turbidez del agua, ya sea orgánica o inorgánica, el color aparente y verdadero, logra remover material bacteriano y materia formadora de olor y sabor (Restrepo, 2009).

Las partículas coloidales permanecen en suspensión y no se sedimentan por su estabilidad, adquiriendo un contacto entre la fase líquida y la fase sólida y se caracterizan por ser hidrofílicas e hidrófobas. Las primeras se encuentran rodeadas de una capa de agua y carga eléctrica que tiende a desplazar las partículas unas de otras dándoles la estabilidad (Andía, 2000).

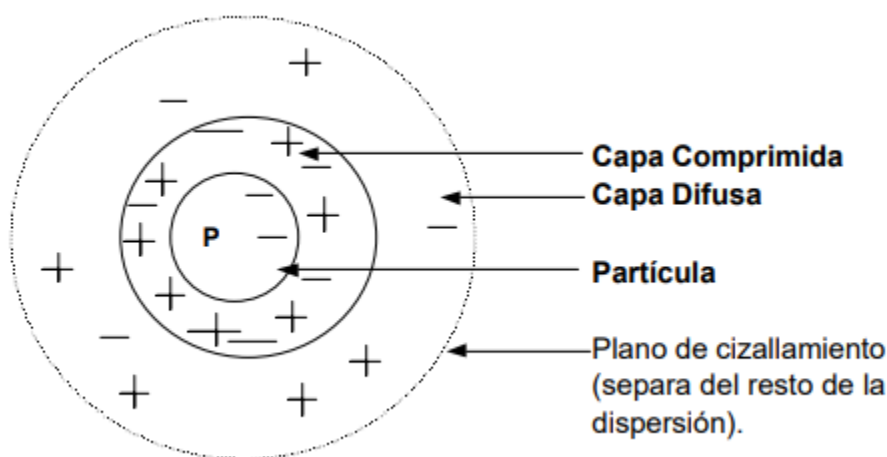
Por otra parte, la adición de cargas positivas contenidas en los coagulantes reduce la carga negativa de la partícula en suspensión, generando la inestabilidad de esta, dando lugar a la aglomeración para formar agregados (Betancur et al., 2012).

Teoría de la coagulación

Las partículas coloidales contienen cargas negativas que se repelen entre ellas, lo que hace que sean estables en el agua, superando las fuerzas de atracción de Van Der Waals evitando su aglomeración y precipitación. Estas cargas negativas se pueden desestabilizar con cargas positivas aplicando coagulantes a base de aluminio o hierro (Acosta, 2006).

Figura 2

Estabilidad de los coloides en el agua



Fuente: Andía (2000)

La neutralización de partículas en el agua se puede lograr gracias a los siguientes mecanismos:

Compresión de la doble capa. Las partículas coloidales al poseer carga eléctrica negativa atraen iones positivos del agua, formando una capa comprimida que atrae iones positivos junto a una menor cantidad de negativos para formar la llamada capa difusa dando lugar a un potencial electrostático conocido como potencial z (Andía, 2000). “Este potencial tiene un valor crítico, por encima del cual los coloides son estables, mientras que, por debajo de él, la repulsión en las

partículas se reduce a un grado tal que, chocando a cierta velocidad, pueden unirse y flocular” (Restrepo, 2009, sección teoría de la coagulación).

Según la teoría de la doble capa, los coagulantes deben poseer carga positiva, contraria a la de las partículas estables, ya que, a mayor carga, mayor característica de coagulación se tendrá (Cabrera, Fleites & Contreras, 2009).

Atrapamiento por barrido. La adición de coagulante en concentraciones considerables permite la captura de los coloides desestabilizados gracias a la formación de flóculos. Los coagulantes más usados para este fin son el sulfato de aluminio y el cloruro férrico. El floculo se compone de moléculas de hidróxidos de aluminio o de hierro según sea el caso (Andía, 2000).

Adsorción. Los coagulantes cuentan con cadenas largas que adsorben los coloides en las extremidades ya que la superficie coloidal reacciona con el coagulante. Sin embargo, el exceso en las cargas puede generar la reinversión de estas (Andía, 2000).

Absorción. Se presenta por la absorción de cargas contrarias a las de los coloides, formando precipitados previa la desestabilización. Para que esto se logre, es necesario que el medio sea ácido y que las dosis de coagulante sean mínimas (Fúquene & Yate, 2018, p. 3).

De acuerdo con los mecanismos de la coagulación, es necesario disminuir el valor de potencial z para que se genere la coagulación. Sin embargo, se debe tener en cuenta que para que esto se logre, deben ocurrir métodos como la coagulación por neutralización de carga o por la disminución del espesor de la doble capa (Restrepo, 2009).

Factores influyentes en el proceso de coagulación

Para obtener un resultado óptimo y de calidad durante el proceso de coagulación, es necesario considerar algunas variables como pH, alcalinidad, dosis de coagulante, Turbidez, gradientes de velocidad de mezcla tanto rápida como lenta y la dosis de coagulante.

Los coagulantes reaccionan en el agua con diversos componentes, especialmente con la alcalinidad que forma precipitados voluminosos y absorbentes, variables como el pH influyen en el proceso y es preciso mantenerlo en un rango deseado (Fúquene & Yate, 2018).

Cada coagulante maneja un rango en el que la floculación se da con eficiencia a una misma dosis y corto tiempo (Restrepo, 2009) y cada agua tiene rango de pH para que se genere la coagulación dependiendo este de la alcalinidad, por lo que, si el rango de pH no es óptimo, se deberá aumentar la dosis de coagulante (Andía, 2000).

Un pH de 6.5 y 8.0 unidades es un rango óptimo para las sales de aluminio, mientras que las sales de hierro tienen eficiencias entre pH 5.5 y 8,5. (Andía, 2000). Sin embargo, en el mercado se encuentran coagulantes como el PAC, los cuales son muy eficientes y gracias a la liberación de cargas altas de iones con peso molecular moderado no precisan de un pH, temperatura y alcalinidad detallada siendo posible la coagulación a pH entre 4 y 9 unidades y temperaturas de 4 a 25°C sin problemas, lo cual no ocurre con el sulfato de aluminio, que es poco eficiente al dosificarlo en aguas con pH menor a 6 unidades, sumado a que por bajas temperaturas, los hidróxidos de aluminio formados durante la hidrólisis, generan un pH mayor al que se puede formar a temperaturas de 25°C (Anccasi, 2019).

Para mejorar los procesos de coagulación es importante contemplar los siguientes factores o variables (Andía, 2000).

pH. Los coagulantes reaccionan en el agua con diversos componentes, especialmente con la alcalinidad que forma precipitados voluminosos y absorbentes, variables como el pH influyen en el proceso y es preciso mantenerlo en un rango deseado (Fúquene & Yate, 2018).

La medida del pH indica el potencial de hidrógeno en las soluciones y se mide de acuerdo con la ecuación 1 (Díaz, 2016, p. 18).

$$pH = - \log \log [H^+] \quad (1)$$

Temperatura. Influye en la formación de flóculos cuando se tiene baja temperatura, afectando el tiempo de formación siendo más largo el proceso (Restrepo, 2009). Al variar la temperatura en 1°C, varia la densidad del agua afectando la energía cinética de las partículas (Díaz, 2016, p. 18).

Cuando la temperatura del agua disminuye en la etapa de sedimentación, aumenta la viscosidad afectando la decantación de los flóculos (Andía, 2000).

Turbidez. las aguas con alta turbidez tienen una probabilidad alta de colisión entre partículas que hacen que se genere la coagulación con bajas dosis. Esto podría traducirse también en que aguas con baja turbiedad necesitaran altas dosis para generar el efecto de coagulación (Andía, 2000).

Coagulante. las dosis de coagulantes son importantes en el proceso, ya que, a concentraciones altas, se revierten las cargas, formando flóculos pequeños y de baja sedimentabilidad, mientras que, a concentraciones bajas, el floc no se forma fácilmente y las partículas coloidales no se desestabilizan (Fúquene & Yate, 2018, p. 5).

Mezcla. Debe existir una agitación homogénea que asegure la mezcla de coagulante y el agua para que se genere la desestabilización. (Díaz, 2016, p. 20) Los gradientes de velocidad de mezcla durante las pruebas de jarras son importantes, ya que, al suministrar valores altos durante la mezcla lenta, tiende a romperse el floc que se ha formado (Trujillo, Duque, Arcila, Rincon, Pacheco & Herrera, 2014).

Algunos autores recomiendan gradientes de velocidad por debajo de 40 rpm para una buena formación del floc (Acosta, 2006).

Alcalinidad. Esta tiene relación con el pH y debe tenerse en cuenta para un proceso de coagulación (Restrepo, 2009). Por otra parte, las sales metálicas reaccionan con la alcalinidad del agua generando hidróxidos que forman precipitados (Díaz, 2016, p. 81).

Clases de coagulantes

Los coagulantes que se usan con mayor frecuencia en los procesos de coagulación son a base de aluminio o hierro. Estas sales metálicas forman reacciones complejas (Díaz, 2016). Se encuentran coagulantes inorgánicos como el sulfato de aluminio, sulfato ferroso, cloruro férrico, entre otros. Sin embargo, existen coagulantes inorgánicos polimerizados con comportamiento distinto a los convencionales (Cogollo, 2011, p.20).

Sales de aluminio. el más común es el sulfato de aluminio, se caracteriza por la formación de flóculos ligeramente pesados. Este tiene un costo bajo en el comercio y por ende es el que se usa con mayor frecuencia (Restrepo, 2009).

Sales de hierro. Se encuentra el cloruro férrico, sulfato férrico y sulfato ferroso, los cuales forman flóculos de gran peso y se sedimentan con mayor velocidad que las sales de aluminio (Restrepo, 2009).

Policloruros de aluminio PACs. Se caracterizan porque sus flóculos son conjuntos de pequeñas esferas y tienen una estructura en forma de cadena. Su tamaño es menor al de los flóculos formados por el sulfato de aluminio. Se considera que son más eficientes por no depender directamente del pH y la temperatura, además que generan menor cantidad de lodos.

En la tabla 2 se muestra una comparación del Sulfato de Aluminio frente al PAC.

Tabla 2

Comparación característica entre el Sulfato de aluminio y el PAC.

Parámetro	PAC	Sulfato de Aluminio
Temperatura	La forma de aluminio prepolimerizadas permiten un menor efecto de la temperatura	La formación de complejos hidroxilos cargados positivamente se ve afectada por la temperatura en la etapa de hidrólisis
pH	El rango de pH es amplio, entre 4 y 9 unidades. Su impacto es menor al contener formas de aluminio prepolimerizadas	El rango de pH es limitado, entre 6 y 8 unidades. Este controla las especies de hidroxilos producidos
Especies de aluminio	Contiene formas de aluminio monomérica y poliméricas	Contiene forma de aluminio monoméricas de carga catiónica +1 a +3
Cinética	Rápida	Lenta
Generación de lodo	Poca generación de lodo	Alta generación de lodo

Nota. Fuente: Anccasi (2019, p. 15 - 16)

Floculación

La floculación trata la agrupación de coágulos pequeños gracias a la agitación lenta en el medio, formando flóculos grandes y de peso suficiente permitiendo su sedimentación (Díaz, 2016, p. 23).

Los flóculos formados durante la mezcla lenta, puede que no sedimenten rápidamente, por lo que será necesaria la adición de un floculante (Andía, 2000).

Formas de floculación

La floculación se puede dar por dos vías, la percinética y la ortocinética. La primera consiste en el movimiento de partículas en el medio, mientras la segunda se basa en generación de energía por medios externos como paletas de agitación (Acosta, 2006, p. 12). La floculación también se presenta cuando las partículas chocan entre sí durante la sedimentación, aglomerándose durante el descenso (Díaz, 2016, p. 24).

Tipos de floculantes

Los polímeros o floculantes que se conocen pueden ser catiónicos, aniónicos o no iónicos (Rivas, Menés & Rómulo, 2017, p. 197).

Catiónicos. Suelen usarse para la precipitación de partículas orgánicas y su eficiencia se encuentra en soluciones con pH entre 4 y 8 unidades. Estos pueden ser poliacrilamidas y poliaminas (Rivas et al., 2017, p. 197).

Aniónicos. Se usan con frecuencia para la precipitación de minerales y su eficiencia se encuentra en un pH entre 7 y 14 unidades. Estos pueden ser acrilatos y acrilamidas (Rivas et al., 2017, p. 197).

No iónicos. Los floculantes no iónicos suelen usarse en la precipitación de partículas orgánicas e inorgánicas y su eficiencia se encuentra en soluciones con pH entre 6 y 10 unidades (Rivas et al., 2017, p. 197).

Estado del Arte

Estudios de coagulación

Cómo ya se ha mencionado, la adición de coagulantes químicos se hace con el fin de lograr la sedimentación de partículas coloidales (Cabrera et al., 2009).

Los coagulantes más usados son las sales de aluminio y de hierro, como el sulfato de aluminio y el cloruro férrico (Fúquene & Yate, 2018). El tipo de coagulante y la dosis optima, son posibles determinarlos por el método de prueba de jarras, donde se pueden encontrar las dosis adecuadas para cada tipo de agua, según su carga.

Yagual y Torres (2013) realizaron pruebas en aguas residuales de 2 ríos de la provincia de guayas ecuador, encontrando que, con el uso de sulfato de aluminio y dosis entre 60 y 65 ppm se

obtienen resultados con baja turbidez removiendo más del 90%. Sin embargo, detectaron que, al aumentar la dosis de coagulante, la turbidez aumenta (Yagual & Torres, 2013).

Lo anterior se debe a que, a mayor cantidad de coagulante, las cargas se invierten en la partícula y se crean microfloculos con baja sedimentabilidad. Ahora bien, a menor dosis, la partícula no se desestabiliza. De lo anterior se puede afirmar que la turbidez en el agua se mantendrá y se debe encontrar la dosis ideal a través de varios ensayos (Andía, 2000).

Gilpavas, Arbeláez, Medina y Gómez (2018), realizaron pruebas en aguas residuales de la industria textil dosificando sulfato de aluminio, encontrando óptimas dosis entre 400 ppm y 900 ppm con el fin de remover SST, turbidez y DQO. La dosis optima fue de 800 ppm a un pH de 7 unidades con un resultado del 50% de remoción en la DQO y la turbidez (Gilpavas et al., 2018, p. 161).

Para la remoción contaminantes en el agua residual de tintura en una industria textil, Salas (2003) realizó ensayos de jarras encontrando eficiencias de remoción de 90% en SST y un 73% en la DQO con dosis de 300 ppm de sulfato de aluminio, regulando el pH del agua a 7 unidades (Salas, 2003, p. 70).

Otro estudio realizado sobre aguas residuales proveniente de la industria textil muestra eficiencias del proceso de coagulación hasta del 94,5 % con dosis 40 ppm de cloruro férrico a un pH 7 (Cabrera et al., 2009, p. 68).

Cogollo (2011) Evaluó el proceso de coagulación en aguas residuales industriales provenientes de la elaboración y envase de bebidas, implementado un PAC conocido como hidróxicloruro de aluminio, encontrando que la remoción de turbidez alcanza un 73,5 % de eficiencia, mientras que con el uso de sulfato de aluminio la remoción fue del 59.5% (Cogollo, 2011, p. 22 - 23).

Ordóñez, Palacios, López y Suárez (2020), encontraron eficiencias de remoción hasta del 94,9% para SST y de 89,39% en DQO con la adición de 250 ppm de sulfato de aluminio en agua residuales de la industria de bebidas gaseosas (Ordóñez et al., 2020).

En una destilería cubana, se realizaron ensayos sobre la vinaza residual con un coagulante comercial llamado Percol, el cual es un copolímero catiónico donde se encontró una eficiencia de remoción de DQO del 59% con dosis de 60 ppm (Armaignac & Cortón, 2009, p. 158).

Por parte de Mohammadi y Alireza (2017) se realizaron pruebas en aguas residuales de la industria de pasas, encontrando remoción de turbidez de 95,8% y un 97,6% de SST con dosis de 60 ppm de sulfato ferroso (Mohammadi & Alireza, 2017).

En industrias dedicadas a la producción de alimentos cárnicos, se han encontrado eficiencias de remoción en SST del 97% con PAC y del 90% con cloruro férrico. Con el uso de los dos coagulantes se alcanzan eficiencias en remoción de DQO hasta del 85% y un 70% de remoción de grasas y aceites (Díaz, Rivas, Salazar, Teuteló, Maa & Sosa, 2019, p. 117 - 118).

Otro caso en el que se usó el proceso de coagulación – floculación fue llevado a cabo por González & Falcón (2013) sobre aguas residuales provenientes de la industria láctea, encontrando eficiencias de remoción de un 88,5% en la DQO y 96,7% en SST con una dosis de 500 ppm de sulfato férrico y un pH en el agua de 6 unidades, mientras que con una concentración de 600 ppm de Sulfato de aluminio y un pH en el agua de 5 unidades obtuvieron resultados de un 84,4% en la remoción de DQO y 97,1% en SST. Por último, encuentran remoción de DQO hasta del 85,2% y un 96,9% en SST con la adición de 857 ppm de PAC teniendo un rango de pH entre 5 y 7 unidades (González & Falcón, 2013, p. 132).

En Ciudad de México, Ramírez, Moreno, Martínez y Orta (1995) realizaron pruebas con 6 tipos de coagulantes sobre una mezcla de aguas residuales de dos puntos de la ciudad.

Obteniendo remociones del 89% de SST, 88% en color y 98% de turbidez con dosis de 20 ppm de sulfato de aluminio. Otro coagulante eficiente fue un policloruro de aluminio con el que se obtuvieron remociones de 87% en la remoción de SST, 92 % para el color y un 98% en la turbidez (Ramírez et al., 1995).

Algunos ensayos realizados en aguas residuales de la planta el salguero en Valledupar Colombia, reportados en la literatura, presentan remoción de 84,71 % en DQO y 84,12% en la remoción de SST con dosis de 55 ppm de sulfato de aluminio, mientras que con el uso de policloruro de aluminio (PAC), se reporta un 81,91% de remoción de DQO y 91,16% en la remoción de SST con dosis de 50 ppm (Dearmas Duarte & Ramírez Hernández, 2015, p. 191).

Otros experimentos se desarrollaron con 3 coagulantes por parte de Ramírez y Sierra (2018) con el fin de mejorar las características del efluente, obteniendo como resultado un 98% en la remoción de turbiedad, 91,03% en SST y 77,13% en DQO al dosificar 170 ppm de cloruro férrico, mientras que, con el uso de sulfato de aluminio, obtuvieron remoción del 96% en la turbidez, 88,47% en SST y 76,36% en la DQO con dosis de 175 ppm. El tercer coagulante usado fue el PAC, a concentración de 400 ppm con eficiencias de 97,43% de turbidez, 89,75% para SST y 76,06% en la DQO (Ramírez & Sierra, 2018, p. 94).

Hacia el año 2014, en la planta el salguero, Flórez, López y Mannbash (2016) obtuvieron eficiencias del 93,03% en SST y 77,13% den DQO con adición de cloruro férrico. Por otra parte, al usar sulfato de aluminio, encontraron remoción de un 88,47% para SST y 76,36% en la DQO (Flórez et al., 2016, p. 36).

En el tratamiento de aguas residuales domésticas, se encuentran remociones del 93,1% para la turbidez y 92,8% de color con una dosis de 125 ppm de sulfato de aluminio. (Duran et al., 2017). Otros autores como Bernal et al (2011), indican que, con dosis de 7 ppm de sulfato de

aluminio, se obtienen remociones de 54% en turbidez, 41 % en color, 49% para SST y 44% en la DQO (Bernal et al., 2011, p. 65).

Por otra parte, Eliet, Llanes, Fernández y Bataller (2010) obtienen porcentajes de remoción del 99% en la turbidez, 98,4% para SST y un 95,9% en la remoción de color con dosis de 100 ppm de sulfato en aguas residuales municipales (Eliet, Lannes, Fernández & Bataller, 2010, p. 53).

Estudios realizados sobre aguas grises, indican que, con el uso de sulfato de aluminio, se obtienen resultados de remoción de turbidez hasta de un 94,24% para un agua con pH de 7,1 unidades (Paula & Fernández, 2018, p. 959).

En este documento se han comparado resultados de estudios realizados a las aguas residuales con el fin de remover la turbidez, sin embargo, se ha encontrado que los ensayos de jarras también son realizados como método de remoción de otros parámetros contaminantes

Rivas, Menés y Rómulo (2017) evaluaron la remoción de contaminantes por medio de pruebas de coagulación en aguas contaminadas con Níquel, donde encontraron eficiencias de remoción de 57,02% con una dosis de 300 ppm de PAC y un 78,80% con adición de 300 ppm de sulfato de aluminio (Rivas et al., 2017, p. 200).

De otro lado Franco y Carro (2014) usaron dosis de cloruro férrico para la remoción de Arsénico con eficiencias del 95% y 80% con sulfato de aluminio, no obstante, tuvieron que oxidar primero el arsénico con hipoclorito de sodio, ya que la remoción sin oxidar el arsénico se encontró entre un 30 % y 60% (Franco & Carro, 2014).

La tabla 3 muestra las eficiencias obtenidas en diferentes estudios de coagulación y su progreso a través del tiempo.

Tabla 3

Estado del arte.

Eficiencias de remoción del proceso de coagulación									
Localización	Técnica de tratamiento	Concentración ppm	pH optimo	% de remoción					Búsqueda
				SST	Turbidez	DQO	Color	Otro	
México Año 1995	Sulfato de aluminio	20	6	89	98	-	88	-	(Ramírez et al., 1995)
	PAC	20	6	87	98	-	92	-	
Perú Año 2003	Sulfato de aluminio	300	7	90	-	73	-	-	(Salas, 2003)
Cuba Año 2009	Sulfato de aluminio	40	7	-	-	-	-	94.9	(Cabrera et al., 2009)
	Cloruro férrico	40	5	-	-	-	-	80	
Cuba Año 2009	Percol PAC	60	7,6	-	-	59	-	-	(Armaignac & Cortón, 2009)
Medellín Colombia Año 2009	Sulfato de aluminio	50	6,17	-	95,77	-	-	-	(Restrepo, 2009)
	PASS	50	7,06	-	94,51	-	-	-	

Eficiencias de remoción del proceso de coagulación

Localización	Técnica de tratamiento	Concentración ppm	pH optimo	% de remoción					Búsqueda
				SST	Turbidez	DQO	Color	Otro	
	PAC	35	7,17	-	94,87	-	-	-	
México Año 2010	Sulfato de aluminio	100	7,8	94,8	99	-	95,9	-	(Eliet et al., 2010)
México Año 2011	Sulfato de aluminio	7	6.6	49	54	44	41	-	(Bernal et al., 2011)
Colombia Año 2010	PAC	24	-	-	73,5	-	-	-	(Cogollo, 2011)
	Sulfato de aluminio	24	-	-	59.5	-	-	-	
Cuba Año 2013	Sulfato ferroso	500	6	96,7	-	88,5	-	-	(González & Falcón, 2013)
	Sulfato de aluminio	600	5	91,7	-	84,4	-	-	
Ecuador Año 2013	PAC	857	5 - 7	96,9	-	82,5	-	-	(Yagual & Torres, 2013)
	Sulfato de aluminio	65	7	-	>90	-	-	-	
Colombia Año 2014	PAC	24	-	-	73,5	-	-	-	(Franco & Carro, 2014)

Eficiencias de remoción del proceso de coagulación

Localización	Técnica de tratamiento	Concentración ppm	pH optimo	% de remoción					Búsqueda
				SST	Turbidez	DQO	Color	Otro	
Colombia Año 2015	PAC	50	7	91,16	-	81,91	-	-	(Dearmas Duarte & Ramírez Hernández, 2015)
	Sulfato de aluminio	55	7	84,12	-	84,71	-	-	
Colombia Año 2016	Cloruro férrico	34	7	91,03	-	77,13	-	-	(Flórez et al., 2016)
Colombia Año 2016	Sulfato de aluminio	35	7	88,47	-	76,36	-	-	
Cuba Año 2017	PAC	300	8,28 – 9,05	-	-	-	-	57,02 N	(Rivas et al., 2017)
	Sulfato de aluminio	300	8,28 – 9,05	-	-	-	-	78,8 N	
Colombia Año 2017	Sulfato férrico	60	-	97,6	95,8	-	-	-	(Mohammadi & Alireza, 2017)
Colombia 2017	Sulfato de aluminio	125	6,5	-	93,1	-	92,8	-	(Duran et al., 2017)
Brasil 2018	Sulfato de aluminio	585	7,1	-	94,24	-	-	-	(Paula & Fernandes, 2018)
Colombia Año 2018	Cloruro férrico	170	5,34	91,03	98	77,13	-	-	(Ramírez & Sierra, 2018)

Eficiencias de remoción del proceso de coagulación

Localización	Técnica de tratamiento	Concentración ppm	pH optimo	% de remoción					Búsqueda
				SST	Turbidez	DQO	Color	Otro	
	Sulfato de aluminio	175	6,66	88,47	96	76,36	-	-	
	PAC	400	7,03	97,43	89,75	76,06	-	-	
Colombia Año 2018	Sulfato de aluminio	800	7	-	50	50	-	-	(Gilpavas et al., 2018)
Cuba Año 2019	PAC	150	7	97	-	-	85	70 G y A	(Díaz Díaz et al., 2019)
	Sulfato de aluminio	100	7,5	90	-	-	85	70 Gy A	
Colombia Año 2019	PAC	3939	7,62	86,21	-	75,79	-	98,8 G y A	(Rodríguez Díaz et al., 2019)
	Cloruro férrico	36 – 42	8,5	-	80,7	-	75	-	
Colombia Años 2019	Cloruro férrico + PAC	36 - 42 + 0'2- 0,5	8,5	-	80,2	-	86,9	-	(Yanza, Rivera, Gómez & Zafra., 2019)
	PAC	32 - 46	8,5	-	47,1	-	55,8	-	
Perú Año 2020	Sulfato de aluminio	250	7,5	94,9	-	89,39	-	-	(Ordóñez et al., 2020)

Fuente. Autoría propia

Metodología

Parte Experimental

Se realizó un diseño experimental factorial 2^4 , ya que este permite determinar los factores que tienen mayor incidencia sobre las variables de respuesta, lo cual se ajusta al ensayo por tratarse de evaluar 4 variables con 2 niveles, permitiendo reducir el número de pruebas en comparación con otros diseños más robustos que demandan un tiempo mayor. Sin embargo, antes de llevar a cabo este diseño, se realizó una parte pre -experimental para definir el porcentaje de pureza con el que se evaluaría cada coagulante.

Parte Pre - experimental

Agua residual industrial

Se realizó un muestreo de agua residual proveniente de los retrolavados y retrolavados químicamente mejorados de las unidades de filtración de agua residual y potable a la entrada del sistema fisicoquímico de lamelas, a la cual se le hizo la debida caracterización de parámetros fisicoquímicos (DQO, SST, color, turbidez, pH, conductividad, temperatura) antes de llevar a cabo el experimento.

Parámetros de prueba de jarras preliminar

Se realizó una prueba de jarras preliminar, con los coagulantes Sulfato de aluminio y Policloruro de aluminio en estado líquido comercial para determinar con cual porcentaje de pureza se obtienen los mejores resultados de remoción y así aplicarlos al experimento objeto de estudio de acuerdo con el diseño experimental elegido para la investigación.

Reactivos coagulantes y polímero

De cada coagulante se preparó 1 L de solución al 50%, destinando también 1L de cada coagulante puro para realizar una prueba con cada solución, con el fin de encontrar y definir a

que porcentaje de concentración se obtienen mejores resultados. Lo anterior se hizo acondicionando el agua a un pH de 7 unidades, un gradiente de velocidad de mezcla rápida de 130 rpm/1,5 minutos y un gradiente de velocidad de mezcla lenta de 50 rpm/ 3 minutos, por lo que nuestra única variable fue la concentración de coagulante, la cual se dosificó con una variabilidad de 100 ppm entre cada jarra, dosificando en la última jarra 1000 ppm durante la mezcla rápida.

El polímero se dosificó en una concentración de 2 ppm para cada jarra durante la mezcla lenta. Su preparación se hizo con una solución de 1g de polímero en 1L de agua destilada.

De acuerdo con lo anterior se llevaron a cabo 10 pruebas de jarras por cada coagulante, lo que equivale a 40 pruebas a las que se les caracterizaron parámetros de DQO, SST, color, turbidez, pH, conductividad.

Luego se definió la pureza a la que se obtuvieron mejores resultados de remoción para llevar a cabo el experimento, siendo más eficientes las dosis según la pureza comercial de cada coagulante.

Diseño Experimental 2⁴

Después de la parte pre - experimental, se llevó a cabo el diseño de experimentos factorial 2⁴ para cada uno de los coagulantes que se evaluaron, en el cual se definieron 4 factores como variables independientes y en los que se establecieron como variable de respuesta SST, juntamente con otros parámetros como la DQO, color y turbidez. Los experimentos se realizaron por triplicado para un total de 48 experimentos con cada coagulante.

A continuación, la tabla 4 presenta las variables del diseño experimental y los niveles asociados a cada una de las variables para cada uno de los coagulantes.

Tabla 4

Variables del diseño experimental 2⁴.

Factores		Niveles	
		Mínimo	Máximo
A	Dosis de Coagulante	500 ppm	1000 ppm
B	Velocidad mezcla rápida	120 RPM	150 RPM
C	Velocidad de mezcla lenta	40 RPM	70 RPM
D	pH	5	8
Variables de respuesta en términos de % de remoción		Sólidos suspendidos totales (SST)	
		Demanda Química de Oxígeno	
		Color	
		Turbidez	

Fuente. Autoría propia

Prueba de Jarras

De acuerdo con el diseño experimental 2⁴, y con el objeto de encontrar la interacción entre variables independientes y su incidencia en las variables de respuesta, se llevó a cabo el método de prueba de jarras donde se usaron dos jarras con volumen de 1L de agua residual en las que se representó el nivel mínimo para una de las mismas y el nivel máximo para la segunda hasta completar 16 corridas por triplicado, llegando a realizar 48 pruebas para cada tipo de coagulante. Los factores se identificaron con las letras A, B, C y D como lo indica la tabla 3.

El ajuste de pH se hizo con HNO₃ al 0.1 N, ajustando a pH de 5 unidades como nivel mínimo, mientras que para el ajuste de aumento de pH se hizo con NaOH al 0.1 N, llevando la muestra a pH de 8 unidades como nivel máximo.

Durante la puesta en marcha el floculador piloto se ajustó a una velocidad de mezcla rápida acorde con el nivel expuesto en la tabla 1. Por otra parte, se dosificó el coagulante según el diseño experimental y se dejó en proceso de mezcla durante 1,5 minutos.

Culminada la etapa de mezcla rápida, se procedió a ajustar la velocidad de mezcla lenta, de acuerdo con los niveles establecidos en el diseño durante un tiempo de 10 minutos.

La dosificación de polímero no se cambió y se mantuvo en una concentración de 2 ppm para cada corrida durante la mezcla lenta.

Para finalizar la prueba de coagulación - floculación, se dejó en etapa de sedimentación por 10 minutos, para luego extraer las alícuotas con el fin de analizarlas.

Análisis de laboratorio

Se realizó la caracterización de alícuotas de 50 ml de agua extraída de cada jarra después de cada corrida usando los siguientes métodos:

1. Turbidímetro portátil para medición de turbidez 2100Q, método 180.1 USEPA
2. Multiparámetro HQ11D para medición de pH método potenciométrico. Con sonda de medición de pH, pH C: 101 para la medición de pH, conductividad y temperatura.
3. Termo reactor DRB 200 para reacción de DOQ
4. Espectrofotómetro DR 1900 para medición de DQO método 8000 USEPA.
Reactor digestión methods
5. Espectrofotómetro DR 1900 para medición de SST método 8006

Caracterización inicial del agua residual

Antes de llevar a cabo el diseño experimental, se realizó una caracterización de los parámetros contaminantes en las muestras de agua objeto de estudio, realizando un muestreo a diario entre el día 18 y 28 de mayo, con un volumen de 20 litros de agua residual a la entrada del sistema fisicoquímico de lamelas.

Cada una de las muestras se analizó de inmediato en los laboratorios de la industria.

En la tabla 5 se comparan las concentraciones obtenidas durante la caracterización inicial con los valores límites de la normatividad aplicable a vertimientos.

Tabla 5

Caracterización fisicoquímica del agua residual.

Caracterización fisicoquímica del agua antes del tratamiento							
ítem	Parámetro	Unidad de medida	Valor	Valor Límite Res 0631/2015	Cumple	Valor límite Res 4090/2017	Cumple
1	pH	Unidades	7,9	6,0 a 9,0	Si	6,0 a 9,0	Si
2	SST	mg/l	105,1	50	No	40	No
3	Turbidez	NTU	72,1	N/A	N/A	N/A	N/A
4	Color	Uptc	934,3	N/A	N/A	N/A	N/A
5	Conductividad	µS/cm	2144,6	N/A	N/A	N/A	N/A
6	TDS	mg/l	1013,0	N/A	N/A	N/A	N/A
7	Temperatura	°C	24,4	N/A	N/A	< 40	Si
8	DQO	mg/l	293	200	No	50	No
9	Manganeso	mg/l	0,2	N/A	N/A	N/A	N/A
10	Hierro	mg/l	0,5	N/A	N/A	N/A	N/A
11	Aluminio	mg/l	0,2	N/A	N/A	N/A	N/A
12	Alcalinidad Total	mg/l	856,3	Análisis y reporte	N/A	Análisis y reporte	N/A
13	Cloruros	mg/l	108,1	250	Si	250	Si

Fuente. Autoría propia

Análisis de los datos

El análisis de los datos se realizó de acuerdo con el diseño 2^4 y el uso del software MINITAB, evaluando la normalidad de los datos gracias a la gráfica de normalidad, encontrando que los datos no eran normales, por lo que se transformaron implementando el método de Box – cox. Luego se dió lugar a la evaluación de los resultados mediante un análisis de varianza ANOVA y la representación de gráficas de Pareto e interacción de efectos con la finalidad de encontrar las condiciones más adecuadas del proceso de coagulación.

Finalmente, se implementaron gráficas de cubos, en las que se identificaron las combinaciones entre variables independientes y sus rendimientos, determinando así las condiciones que presentan mayor eficiencia durante el experimento.

Resultados

Resultados Parte Pre - experimental

Mediante la técnica de prueba de jarras como proceso pre - experimental se determinó si el coagulante se debía manejar en solución o concentrado, el estudio se realizó con un volumen de 1 litro de muestra en cada jarra, donde la única variable que se ajustó fue la concentración de cada uno de los coagulantes.

Primeramente, se preparó una dilución de cada uno de los coagulantes llevándolas a una concentración del 50% v/v, para posteriormente realizar 10 corridas, variando la dosis entre 100 ppm hasta 1000 ppm con cada uno de los coagulantes.

De la misma manera se llevaron a cabo 10 corridas con los coagulantes sin diluir, variando también la dosis en cada jarra con concentraciones de 100 ppm hasta 1000 ppm, logrando identificar que los mejores resultados se lograron con los coagulantes sin diluir.

La ecuación 2 representa la forma en que se hallaron los porcentajes de remoción para cada caso

$$\% \text{ eficiencia} = \frac{\text{concentración inicial} - \text{concentración final}}{\text{Concentración inicial}} \times 100 \quad (2)$$

A continuación, se presentan las eficiencias de remoción obtenidas con el uso de sulfato de aluminio en la tabla 6 y policloruro de aluminio en la tabla 7.

Resultados del pre- experimento

Tabla 6

Promedio de remoción de parámetros contaminantes con Sulfato de aluminio.

Eficiencia de remoción con Sulfato de aluminio				
ppm coagulante	SST	Turbidez	Color	DQO
100	66,7%	24,4%	42,0%	54,3%
200	86,1%	57,4%	67,4%	65,4%
300	100,0%	89,4%	87,6%	75,3%
400	97,2%	88,4%	90,3%	74,1%
500	94,4%	91,4%	92,5%	70,4%
600	94,4%	82,8%	89,3%	71,6%
700	97,2%	67,4%	91,3%	74,1%
800	86,1%	73,9%	88,6%	70,4%
900	88,9%	63,2%	77,9%	66,7%
1000	75,0%	57,0%	83,8%	64,2%

Fuente. Autoría propia

Tabla 7

Promedio de remoción de parámetros contaminantes con PAC.

Eficiencias de remoción con PAC				
ppm coagulante	SST	Turbidez	Color	DQO
100	97,2%	86,0%	88,3%	70,4%
200	94,4%	86,5%	86,8%	74,1%
300	100,0%	95,2%	93,5%	80,2%
400	100,0%	96,3%	94,5%	85,2%
500	100,0%	98,9%	96,8%	88,9%
600	100,0%	98,9%	97,0%	84,0%
700	100,0%	96,2%	100,0%	81,5%
800	100,0%	98,5%	100,0%	79,0%

Eficiencias de remoción con PAC				
ppm coagulante	SST	Turbidez	Color	DQO
900	100,0%	98,8%	100,0%	79,0%
1000	100,0%	99,1%	100,0%	76,5%

Fuente. Autoría propia

Después de determinar que las mejores eficiencias se obtuvieron con los coagulantes sin diluir, se procedió a poner en marcha el desarrollo del diseño 2⁴ con cada uno de los coagulantes según su concentración comercial. Sulfato de aluminio al 25% v/v y Policloruro de aluminio al 21% v/v.

A continuación, se presenta el desarrollo del diseño experimental para el sulfato de aluminio.

Desarrollo del Diseño 2⁴ con Sulfato de Aluminio

De acuerdo con los resultados encontrados, se determinó que para el diseño experimental 2⁴, el factor concentración de coagulante Sulfato de aluminio (A) se trabajaría con 500 ppm para su mínimo nivel, siendo 1000 ppm el máximo. De otra parte, se determinó que el factor gradiente de velocidad de mezcla rápida (B) se trabajaría con nivel mínimo de 120 rpm y un máximo nivel de 150 rpm durante 3 minutos en los dos casos, dando lugar al factor gradiente de velocidad de mezcla lenta (C) con 40 rpm en el mínimo nivel y 70 rpm en el máximo con duración de 10 minutos. Para el factor pH (D), se trabajaron concentraciones de 5 +/- 0.1 unidades en su mínimo nivel y de 8 +/- 0.1 unidades para el máximo.

Las concentraciones de pH se ajustaron con HNO₃ al 0.1 N para pH bajo y NaOH al 0.1 N para el máximo pH o nivel.

Como se mencionó en la metodología, se llevaron a cabo 48 corridas donde se ajustaron los cuatro factores a su mínimo o máximo nivel según fuera el caso, para que, terminada la etapa de sedimentación, se realizara los análisis de laboratorio.

La tabla 8, muestra el orden de corridas y las combinaciones que se establecieron para el desarrollo del experimento con la implementación de sulfato de aluminio.

Tabla 8

Notación de yates para la interacción de factores y sus niveles para el diseño con sulfatos de aluminio.

Orden de las Corridas	Orden aleatorio y real de las corridas	Factores				Tratamientos	Replicas		
		A	B	C	D		1	2	3
1	2	-	-	-	-	(1)			
2	4	+	-	-	-	a			
3	10	-	+	-	-	b			
4	12	+	+	-	-	ab			
5	13	-	-	+	-	c			
6	15	+	-	+	-	ac			
7	11	-	+	+	-	bc			
8	8	+	+	+	-	abc			
9	1	-	-	-	+	d			
10	9	+	-	-	+	Ad			
11	16	-	+	-	+	Bd			
12	5	+	+	-	+	Abd			
13	7	-	-	+	+	Cd			
14	3	+	-	+	+	Acđ			
15	14	-	+	+	+	Bcd			
16	6	+	+	+	+	abcd			

Nota. A; concentración de Sulfato de aluminio, B; Velocidad de mezcla rápida, C; Velocidad de mezcla lenta, D;

Concentración de pH, -; Nivel mínimo, +; Nivel máximo.

Resultados del Diseño Experimental 2⁴ con Sulfato de Aluminio

De acuerdo con el desarrollo experimental donde se implementó el coagulante sulfato de aluminio, se presentan en la tabla 9 las eficiencias de remoción de SST y turbidez.

Tabla 9

% de remoción promedio de los tratamientos realizados para SST y turbidez con sulfato de aluminio.

Eficiencia de remoción Sulfato de Aluminio		
Corridas	SST	Turbidez
2	68%	59%
4	89%	91%
10	99%	98%
13	100%	93%
12	81%	65%
15	100%	95%
11	60%	26%
8	67%	47%
1	95%	91%
9	94%	87%
16	100%	98%
5	97%	96%
7	94%	96%
3	98%	95%
14	100%	99%
6	75%	65%

Fuente. Autoría propia

A continuación, se presentan en la tabla 10 las eficiencias de remoción de color y DQO encontradas luego de realizar el experimento con la implementación del coagulante sulfato de aluminio.

Tabla 10

% de remoción promedio de los tratamientos realizados para color y DQO con sulfato de aluminio.

Eficiencia de remoción Sulfato de Aluminio		
Corridas	Color	DQO
2	60%	68%
4	82%	62%
10	97%	71%
12	98%	95%
13	70%	79%
15	97%	91%
11	50%	83%
8	55%	83%
1	89%	52%
9	85%	51%
16	98%	92%
5	95%	87%
7	90%	81%
3	94%	89%
14	99%	91%
6	63%	72%

Fuente. Autoría propia

De la misma manera, se desarrolló un diseño experimental para evaluar las eficiencias y combinaciones presentadas con la implementación del coagulante policloruro de aluminio. A continuación, se presenta el desarrollo del diseño y los resultados encontrados.

Desarrollo del Diseño 2⁴ con Policloruro de Aluminio

Para el desarrollo del experimento con policloruro de aluminio, se determinó que el factor concentración de coagulante policloruro de aluminio (A) se trabajara con 500 ppm para su mínimo nivel, siendo 1000 ppm el máximo. De otra parte, se determinó que el factor gradiente de velocidad de mezcla rápida (B) se trabajaría con nivel mínimo de 120 rpm y un máximo nivel de 150 rpm durante 3 minutos en los dos casos, dando lugar al factor gradiente de velocidad de mezcla lenta (C) con 40 rpm en el mínimo nivel y 70 rpm en el máximo con duración de 10 minutos. Para el factor pH (D), se trabajaron concentraciones de 5 +/- 0.1 unidades en su mínimo nivel y de 8 +/- 0.1 unidades para el máximo.

Las concentraciones de pH se ajustaron con HNO₃ al 0.1 N para pH bajo y NaOH al 0.1 N para el máximo pH o nivel.

Como se mencionó en la metodología, se llevaron a cabo 48 corridas donde se ajustaron los cuatro factores a su mínimo o máximo nivel según fuera el caso, para que, terminada la etapa de sedimentación, se realizara los análisis de laboratorio.

La tabla 11, muestra el orden de corridas y las combinaciones que se establecieron para el desarrollo del experimento con la implementación de policloruro de aluminio.

Tabla 11

Notación de Yates para la interacción de factores y sus niveles con PAC.

Orden de las Corridas	Orden aleatorio y real de las corridas	Factores				Tratamientos	Replicas		
		A	B	C	D		1	2	3
1	2	-	-	-	-	(1)			
2	4	+	-	-	-	a			
3	10	-	+	-	-	b			
4	12	+	+	-	-	ab			
5	13	-	-	+	-	c			
6	15	+	-	+	-	ac			
7	11	-	+	+	-	bc			
8	8	+	+	+	-	abc			
9	1	-	-	-	+	d			
10	9	+	-	-	+	Ad			
11	16	-	+	-	+	Bd			
12	5	+	+	-	+	Abd			
13	7	-	-	+	+	Cd			
14	3	+	-	+	+	Acđ			
15	14	-	+	+	+	Bcd			
16	6	+	+	+	+	abcd			

Nota. A; concentración de PAC, B; Velocidad de mezcla rápida, C; Velocidad de mezcla lenta, D; Concentración de pH, -; Nivel mínimo, +; Nivel máximo.

Resultados del Diseño Experimental 2⁴ con Policloruro de Aluminio

De acuerdo con el desarrollo experimental donde se implementó el coagulante policloruro de aluminio, se presentan en la tabla 12 las eficiencias de remoción des SST y turbidez.

Tabla 12

% de remoción promedio de los tratamientos realizados para SST y turbidez con PAC.

Eficiencia de remoción PAC		
Corridas	SST	Turbidez
2	98%	96%
4	99%	99%
10	100%	100%
12	100%	98%
13	91%	87%
15	100%	96%
11	97%	91%
8	94%	95%
1	97%	97%
9	100%	100%
16	100%	99%
5	98%	98%
7	99%	98%
3	93%	93%
14	100%	99%
6	98%	95%

Fuente. Autoría propia

A continuación, se presentan en la tabla 13 las eficiencias de remoción de color y DQO encontradas luego de realizar el experimento con la implementación del coagulante policloruro de aluminio.

Tabla 13

% de remoción de los tratamientos realizados para color y DQO.

Eficiencia de remoción PAC		
Corridas	Color	DQO
2	94%	92%
4	95%	63%
10	100%	74%
12	99%	93%
13	87%	86%
15	98%	96%
11	93%	92%
8	91%	93%
1	92%	56%
9	100%	57%
16	100%	95%
5	97%	89%
7	98%	87%
3	95%	93%
14	99%	95%
6	93%	89%

Fuente. Autoría propia

Análisis de los Datos

Se realizó un análisis soportado por las tablas de análisis de varianza ANOVA, graficas estadísticas de Pareto para la interpretación de efectos estandarizados, gráficas de interacción de factores y su rendimiento, junto con graficas de cubos que facilitan la interpretación y análisis de resultados.

Teniendo en cuenta que se realizó un diseño experimental para el coagulante sulfato de aluminio y otro diseño para el policloruro de aluminio, se presenta primeramente el análisis para el sulfato de aluminio, iniciando con el análisis de la variable de respuesta % de remoción de SST y terminando con el de la variable % de remoción de DQO. Seguidamente, se da lugar al análisis del diseño experimental con policloruro de aluminio analizando las mismas variables en los dos casos.

Análisis de Resultados del Diseño Experimental 2⁴ con Sulfato de Aluminio

Análisis estadístico para la variable de respuesta SST con el uso de sulfato de aluminio

Se presenta a continuación, el análisis estadístico del diseño experimental 2⁴ con variable de respuesta denominada % de remoción de SST.

Tabla 14

Análisis de varianza con respuesta % de remoción de SST con sulfato de aluminio.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	15	6623,25	441,55	239,63	0,000
Lineal	4	1014,24	253,56	137,61	0,000
A	1	8,14	8,14	4,42	0,043
B	1	46,37	46,37	25,17	0,000
C	1	9,48	9,48	5,15	0,030
D	1	950,24	950,24	515,70	0,000

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	15	6623,25	441,55	239,63	0,000
Interacciones de 2 términos	6	3953,02	658,84	357,55	0,000
A*B	1	5,17	5,17	2,80	0,104
A*C	1	127,09	127,09	68,97	0,000
A*D	1	3570,02	3570,02	1937,45	0,000
B*C	1	78,27	78,27	42,48	0,000
B*D	1	4,32	4,32	2,35	0,135
C*D	1	168,14	168,14	91,25	0,000
Interacciones de 3 términos	4	1366,04	341,51	185,34	0,000
A*B*C	1	494,36	494,36	268,29	0,000
A*B*D	1	29,50	29,50	16,01	0,000
A*C*D	1	10,25	10,25	5,56	0,025
B*C*D	1	831,93	831,93	451,49	0,000
Interacciones de 4 términos	1	289,95	289,95	157,36	0,000
A*B*C*D	1	289,95	289,95	157,36	0,000
Error	32	58,96	1,84		
Total	47	6682,22			

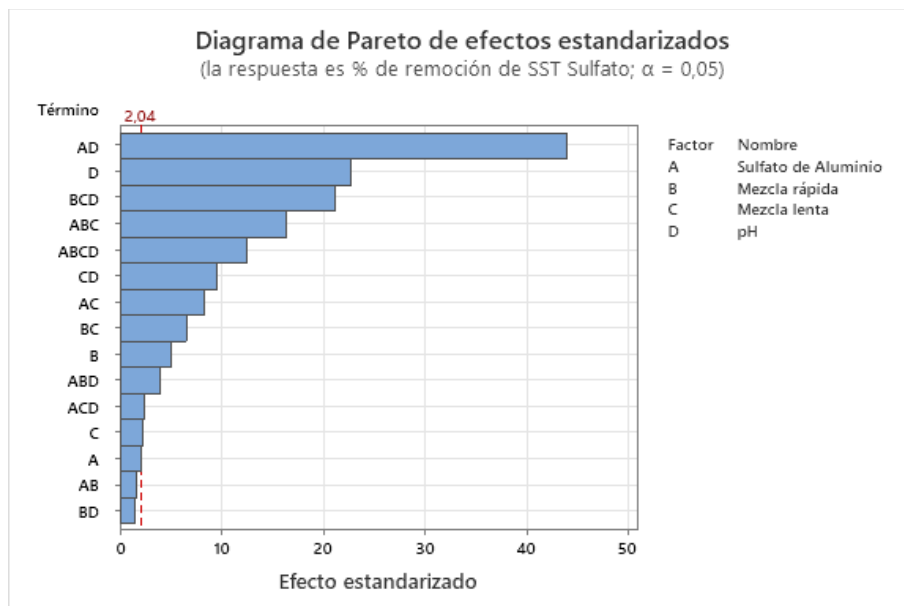
Nota. A; Concentración de Sulfato de aluminio, B; Velocidad de mezcla rápida, C; Velocidad de mezcla lenta, D; Concentración de pH.

De la tabla ANOVA, se puede interpretar que las variables con un p – valor menor a 0,05 que presentan significancia, son la interacción entre la concentración de coagulante y el pH como interacción de 2 términos, y la interacción de 3 términos entre las variables velocidad de mezcla rápida, velocidad de mezcla lenta y pH, siendo las que presentan significancia para el análisis de la variable % de remoción de SST, confirmando su efecto sobre la variable dependiente en la gráfica de Pareto (ver figura 3).

A continuación, se presenta el diagrama de Pareto de efectos estandarizados donde se muestran las combinaciones entre factores que tienen efecto sobre la variable % de remoción de SST con el uso de sulfato de aluminio.

Figura 3

Diagrama de Pareto de efectos estandarizados con variable de respuesta % de remoción de SST



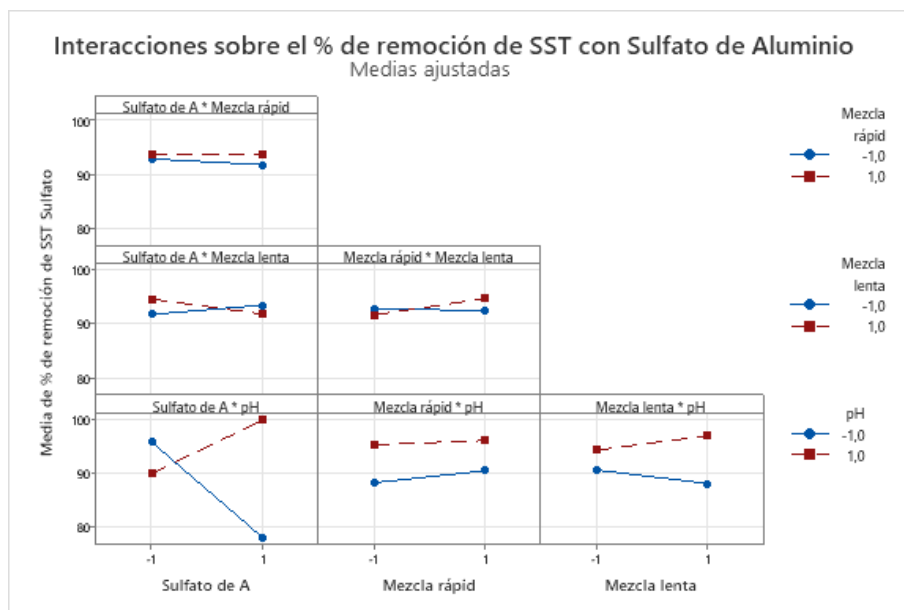
Fuente. Autoría propia

De acuerdo con el diagrama de Pareto de efectos estandarizados, se puede afirmar que los efectos del experimento son significativos en la mayoría de las interacciones, encontrando que la interacción con mayor efecto se encuentra entre la concentración de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ y el pH. Lo anterior se puede comprobar con el p - valor en la tabla de análisis de varianza, el cual se encuentra en 0,000. Por lo tanto, hay una asociación estadísticamente significativa entre la variable de respuesta y el termino(s) o factor(es).

A continuación, se presenta la gráfica de interacción de factores que tienen significancia e inciden sobre la variable de respuesta % de remoción de SST con el uso de sulfato de aluminio.

Figura 4

Gráfica de interacción de factores y el % de remoción de SST



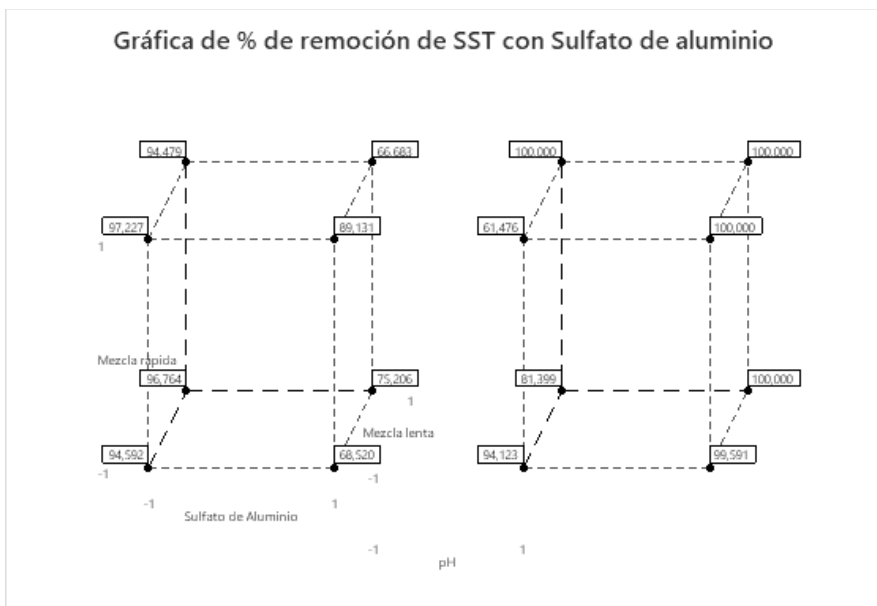
Fuente. Autoría propia

Según la gráfica de interacción el último recuadro de la primera columna muestra que la combinación con mayor incidencia sobre la variable % de remoción de SST se encuentra entre los factores concentración de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ y pH, mostrando una eficiencia de remoción de SST del 100% cuando la concentración de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ se encuentra en 1000 ppm y el pH en 8 unidades.

Para interpretar la combinación de factores que presenta mayor % de remoción de SST, se presenta a continuación la figura 5.

Figura 5

Gráfica de cubos para medias ajustadas con variable de respuesta % e remoción de SST



Fuente. Autoría propia

Según los gráficos de cubos, se pueden observar cuatro tipos de combinaciones entre los factores que inciden positivamente sobre la variable % de remoción de SST con valores hasta del 100%. Los valores más representativos se logran ubicar en la parte superior del cubo derecho, el cual representa el nivel máximo del factor pH. Indicando la gráfica, que los mayores rendimientos se obtienen cuando el nivel de pH se encuentra en 8 unidades y el factor concentración de sulfato de aluminio en nivel máximo de 1000 ppm. De otra parte, se logra identificar que los factores velocidad de mezcla rápida y velocidad de mezcla lenta se encuentra en su máximo nivel en la mayoría de los tratamientos donde se presentan los mayores rendimientos.

Se presentan a continuación en la tabla 15 las combinaciones con mayor % de remoción de SST para el diseño experimental realizado con sulfato de aluminio.

Tabla 15

Combinaciones con mayor % de remoción de SST.

Concentración de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ppm	velocidad de mezcla rápida	Velocidad mezcla lenta	Concentración de pH	Eficiencia %
500	120	70	8	100
1000	150	40	8	100
1000	150	70	8	100
1000	150	70	8	100

De acuerdo con las combinaciones seleccionadas, se observa que para obtener una eficiencia de remoción de SST hasta del 100%, se puede llevar a cabo alguno de los 4 tratamientos. Sin embargo, en términos de eficiencia y de ahorro de producto, lo más conveniente es trabajar con el cuarto tratamiento establecido en la gráfica de cubos, donde la concentración de sulfato es de 500 ppm.

Análisis estadístico para la variable de respuesta turbidez con el uso de sulfato de aluminio

A continuación, se presenta el análisis estadístico del diseño experimental 2^4 con variable de respuesta denominada % de eficiencia de remoción de turbidez.

Tabla 16

Análisis de varianza con respuesta % de remoción de turbidez con sulfato de aluminio.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	15	17735,2	1182,3	298,00	0,000
Lineal	4	847,2	211,8	53,38	0,000
A	1	4,8	4,8	1,22	0,278

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
B	1	134,3	134,3	33,84	0,000
C	1	61,1	61,1	15,41	0,000
D	1	647,0	647,0	163,06	0,000
Interacciones de 2 términos	6	12313,5	2052,3	517,25	0,000
A*B	1	3,9	3,9	0,98	0,330
A*C	1	511,3	511,3	128,87	0,000
A*D	1	10748,8	10748,8	2709,10	0,000
B*C	1	116,2	116,2	29,30	0,000
B*D	1	311,7	311,7	78,55	0,000
C*D	1	621,6	621,6	156,67	0,000
Interacciones de 3 términos	4	4416,8	1104,2	278,30	0,000
A*B*C	1	1187,0	1187,0	299,18	0,000
A*B*D	1	306,4	306,4	77,23	0,000
A*C*D	1	228,1	228,1	57,49	0,000
B*C*D	1	2695,3	2695,3	679,31	0,000
Interacciones de 4 términos	1	157,6	157,6	39,73	0,000
A*B*C*D	1	157,6	157,6	39,73	0,000
Error	32	127,0	4,0		
Total	47	17862,2			

Nota. A; Concentración de Sulfato de aluminio, B; Velocidad de mezcla rápida, C; Velocidad de mezcla lenta, D; Concentración de pH.

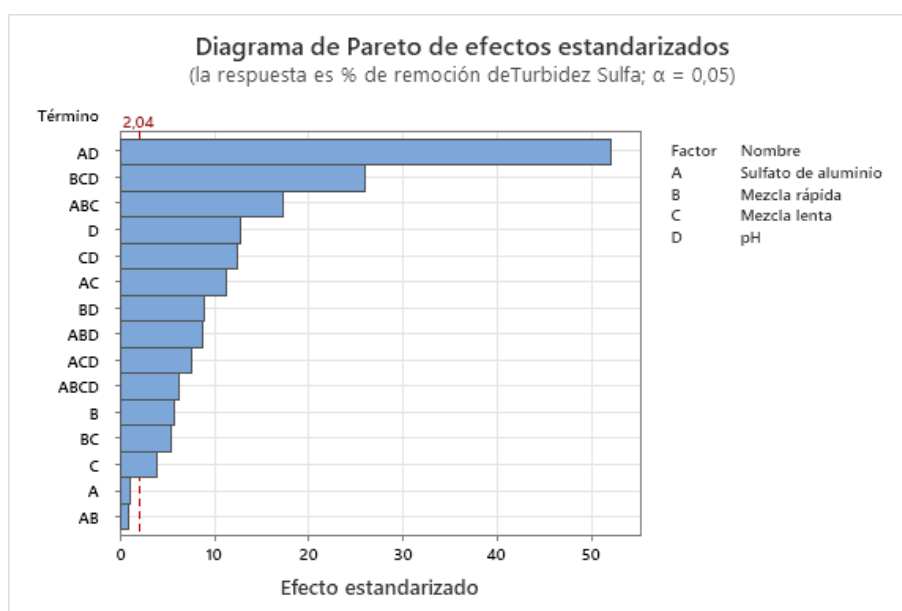
Según la tabla ANOVA, se puede interpretar que las variables con $p - \text{valor} < 0,05$ que presentan significancia son la combinación de la concentración de coagulante y el pH y la interacción entre la velocidad de mezcla rápida, velocidad de mezcla lenta y pH. También se evidencia que la interacción entre la concentración de coagulante, velocidad de mezcla rápida y mezcla lenta, es significativa. Por lo tanto, se puede afirmar que las tres interacciones presentan

significancia sobre la variable de respuesta % de remoción de turbidez, lo cual se confirma con la gráfica de Pareto en la figura 6.

A continuación, se presenta el diagrama de Pareto de efectos estandarizados, donde se muestran las combinaciones entre factores que tienen efecto sobre la variable % de remoción de turbidez con el uso de sulfato de aluminio.

Figura 6

Diagrama de Pareto de efectos estandarizados con variable de repuesta % de remoción de turbidez



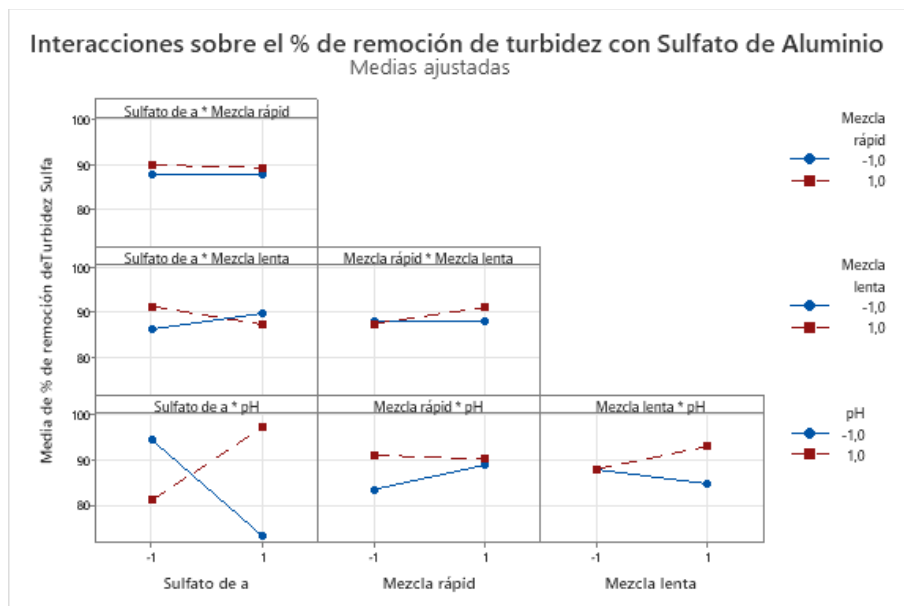
Fuente. Autoría propia

El diagrama de Pareto muestra que el intervalo de confianza es superado por la mayoría de las interacciones. Sin embargo, la interacción que presenta el mayor efecto es la concentración de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ y el pH con un p – valor de 0. Por lo tanto, se puede afirmar que hay una relación estadísticamente significativa entre los termino(s) o factor(es) sobre la variable de respuesta % de remoción de turbidez.

A continuación, se presenta la gráfica de interacción de factores que tienen significancia e inciden sobre la variable de respuesta % de remoción de turbidez con el uso de sulfato de aluminio.

Figura 7

Gráfica de interacción de factores con variable de respuesta % de remoción de turbidez



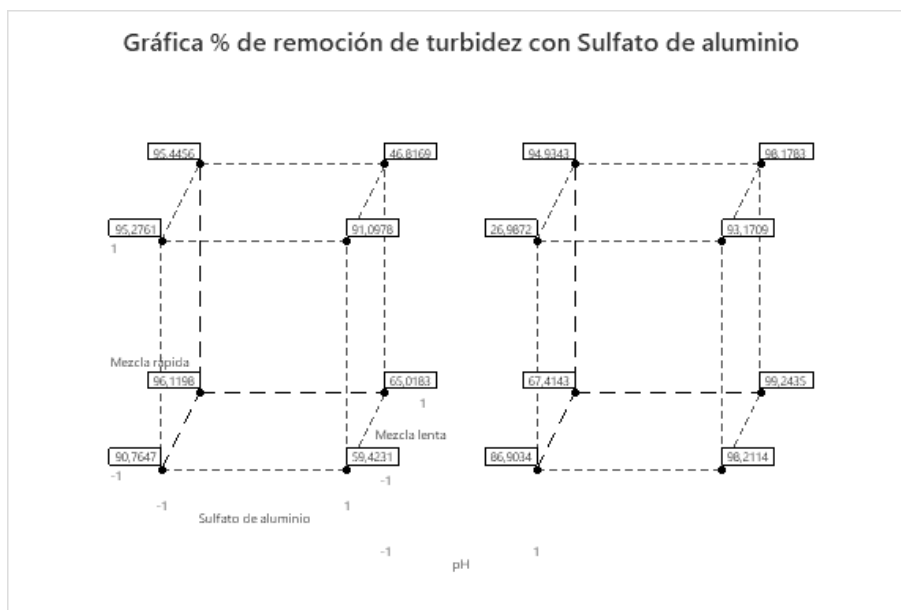
Fuente. Autoría propia

La gráfica de interacciones muestra en el último recuadro de la primera columna, que la interacción entre la concentración de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ y el pH es la más significativa sobre la variable de respuesta % de remoción de turbidez, cuando la concentración de sulfato de aluminio es de 1000 ppm y el pH en el agua es de 8 unidades, logrando un rendimiento cercano al 100 % de eficiencia. Se encuentran otras interacciones, pero con menor eficiencia como se observa en el recuadro que titula la interacción entre mezcla lenta y pH, indicando eficiencia de remoción de turbidez mayor al 90%.

La siguiente figura, muestra las posibles combinaciones entre factores y su % de remoción sobre la variable de respuesta % de remoción de turbidez.

Figura 8

Gráfica de cubos para medias ajustadas con variable de respuesta % de remoción de turbidez



Fuente. Autoría propia

Según la gráfica, la mejor combinación de variables se encuentra en el cubo del lado derecho, donde se representa el factor pH en su máximo nivel, el cual indica 8 unidades y una concentración de sulfato de aluminio de 1000 ppm, presentándose una respuesta positiva sobre la variable % de remoción de turbidez del 99,24%. También, se logra identificar que el factor velocidad de mezcla rápida se encuentra en su mínimo nivel y la velocidad de mezcla lenta al máximo para lograr el rendimiento obtenido.

La tabla 17 muestra la combinación con mayor % de remoción de turbidez con el uso de sulfato de aluminio.

Tabla 17

Combinación de variables con mayor % de remoción de turbidez.

Concentración de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ppm	velocidad de mezcla rápida	Velocidad mezcla lenta	Concentración de pH	Eficiencia %
1000	120	70	8	99,24

Análisis estadístico para la variable de respuesta % de remoción de color con sulfato de aluminio

A continuación, se presenta el análisis estadístico del diseño experimental 2^4 con variable de respuesta denominada % de eficiencia de remoción de Color.

Tabla 18

Análisis de varianza con respuesta % de remoción de color con sulfato de aluminio.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	15	11171,7	744,78	151,03	0,000
Lineal	4	1118,0	279,51	56,68	0,000
A	1	19,9	19,92	4,04	0,053
B	1	43,9	43,91	8,90	0,005
C	1	44,0	44,02	8,93	0,005
D	1	1010,2	1010,19	204,85	0,000
Interacciones de 2 términos	6	7438,9	1239,82	251,42	0,000
A*B	1	13,0	13,05	2,65	0,114
A*C	1	337,9	337,93	68,53	0,000
A*D	1	6652,2	6652,18	1348,96	0,000

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
B*C	1	61,7	61,70	12,51	0,001
B*D	1	17,9	17,94	3,64	0,065
C*D	1	356,1	356,1 1	72,21	0,000
Interacciones de 3 términos	4	2189,2	547,3 0	110,98	0,000
A*B*C	1	741,2	741,2 0	150,30	0,000
A*B*D	1	40,6	40,62	8,24	0,007
A*C*D	1	0,7	0,67	0,14	0,714
B*C*D	1	1406,7	1406, 72	285,26	0,000
Interacciones de 4 términos	1	425,6	425,5 6	86,30	0,000
A*B*C*D	1	425,6	425,5 6	86,30	0,000
Error	32	157,8	4,93		
Total	47	11329,5			

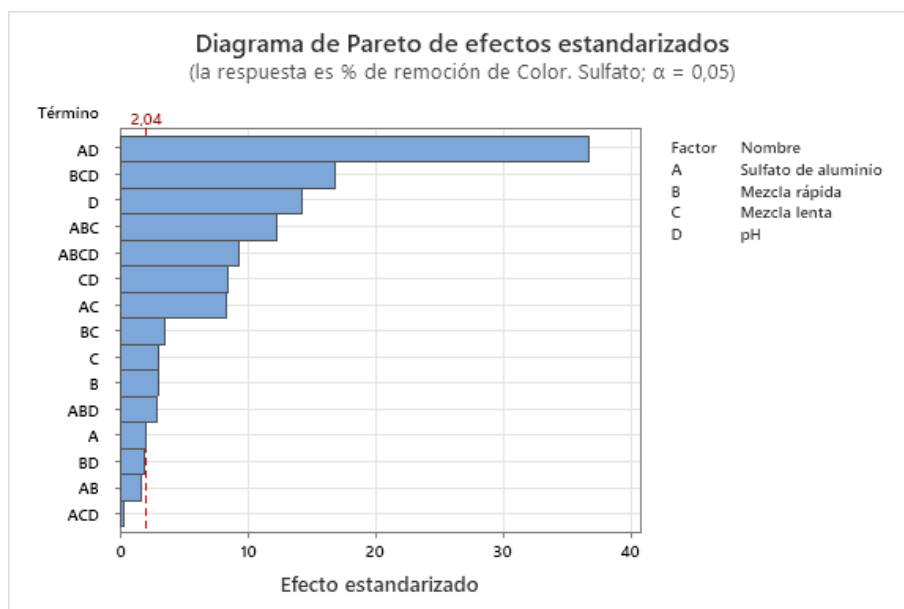
Nota. A; Concentración de coagulantes, B; Velocidad de mezcla rápida, C; Velocidad de mezcla lenta, D; Concentración de pH.

El análisis de ANOVA, indica que con p – valor $<0,05$ las variables que presentaron significancia fueron el pH como variable independiente, las interacciones entre la concentración de coagulante, velocidad de mezcla rápida y velocidad de mezcla lenta y la interacción entre la velocidad de mezcla rápida, la velocidad de mezcla lenta y el pH, para el análisis de la variable de respuesta % de remoción de color, confirmando esta significancia con los gráficos de interacciones (ver figura 10).

A continuación, se presenta el diagrama de Pareto de efectos estandarizados donde se muestran las combinaciones entre factores que tienen efecto sobre la variable % de remoción de color con el uso de sulfato de aluminio.

Figura 9

Diagrama de Pareto de efectos estandarizados con variable de respuesta % de remoción de color



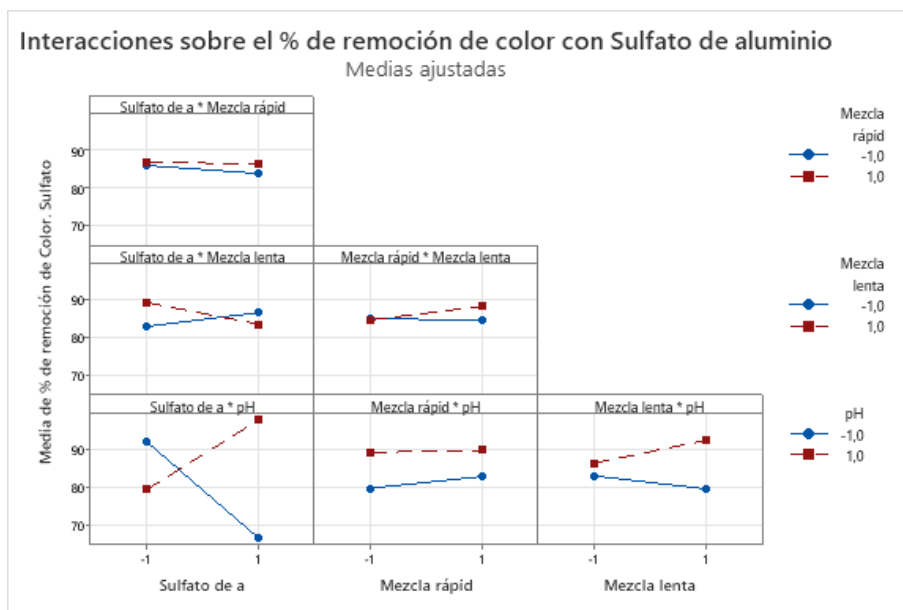
Fuente. Autoría propia

El diagrama de Pareto muestra que, la interacción con mayor efecto es la combinación entre la concentración de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ y el pH con un p - valor de 0,000, seguido por algunas interacciones de menor efecto. Por lo tanto, se puede afirmar que los términos tienen un efecto positivo en la variable de respuesta % de remoción de color y su interacción es estadísticamente significativa, lo cual se puede confirmar con la tabla ANOVA. (ver tabla 18).

A continuación, se presenta la gráfica de interacción de factores que tienen significancia e inciden sobre la variable de respuesta % de remoción de color con el uso de sulfato de aluminio.

Figura 10.

Gráfica de interacción de factores con variable de respuesta % de remoción de color



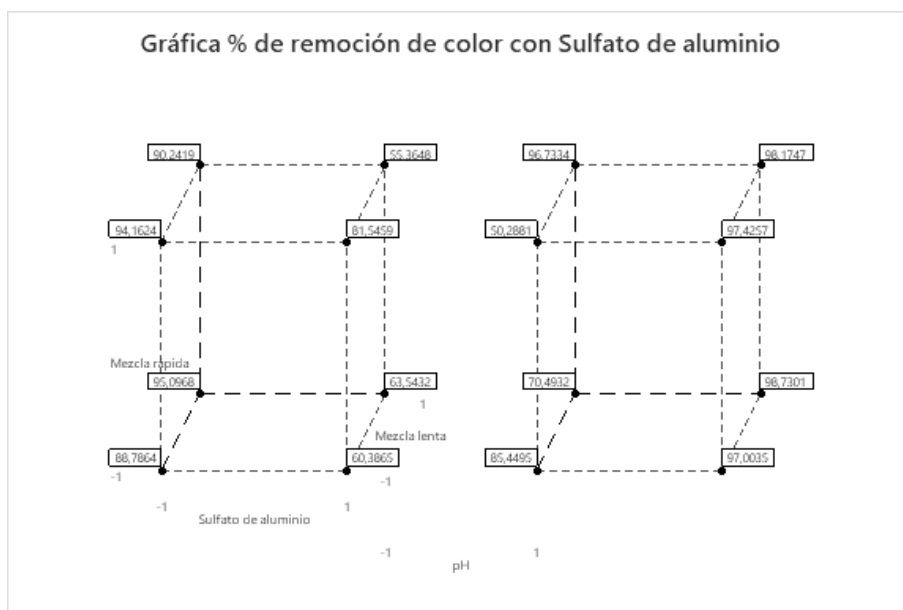
Fuente. Autoría propia

De la gráfica de interacción, se puede observar que la mayor eficiencia se encuentra con la interacción entre la concentración de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ y el pH, además, el factor concentración de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ se encuentra en una concentración de 1000 ppm y el pH en 8 unidades, incidiendo en la variable turbidez con una eficiencia hasta mayor 98%, siendo una interacción positiva. Lo anterior se puede observar en el último recuadro de la primera columna de la gráfica.

La figura 11, muestra las posibles combinaciones entre los factores y su incidencia en la variable de respuesta % de remoción de color.

Figura 11

Gráfica de cubos para media ajustadas con variable de respuesta % de remoción de color



Fuente. Autoría propia

Según la gráfica de cubos, las mayores eficiencias sobre la variable % de remoción de color se obtienen cuando el factor pH se encuentra en 8 unidades, representado en la gráfica de cubos del lado derecho. No obstante, la mejor combinación de factores se encuentra con una concentración de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ en su máximo nivel, representado por 1000 ppm, una velocidad de mezcla rápida de 120 rpm, una velocidad de mezcla lenta de 70 rpm y pH de 8 unidades para obtener un rendimiento del 98,73% sobre la variable de respuesta % de remoción de color.

La tabla 19 muestra la combinación de variables para obtener dicho rendimiento.

Tabla 19

Combinaciones con mayor % de remoción de color.

Concentración de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ppm	velocidad de mezcla rápida	velocidad de mezcla lenta	Concentración de pH	Eficiencia %
1000	120	70	8	98,73

Análisis estadístico para la variable de respuesta % de remoción de DQO con sulfato de aluminio

Se presenta a continuación, el análisis estadístico del diseño experimental 2^4 con variable de respuesta denominada % de eficiencia de remoción de DQO.

Tabla 20

Análisis de varianza con respuesta % de remoción de DQO con sulfato de aluminio.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	15	7774,91	518,33	41,07	0,000
Lineal	4	4382,17	1095,54	86,80	0,000
A	1	38,88	38,88	3,08	0,089
B	1	1939,86	1939,86	153,70	0,000
C	1	1608,87	1608,87	127,47	0,000
D	1	794,56	794,56	62,95	0,000
Interacciones de 2 términos	6	2130,44	355,07	28,13	0,000
A*B	1	146,54	146,54	11,61	0,002
A*C	1	25,82	25,82	2,05	0,162
A*D	1	1057,76	1057,76	83,81	0,000
B*C	1	637,34	637,34	50,50	0,000
B*D	1	254,86	254,86	20,19	0,000

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
C*D	1	8,12	8,12	0,64	0,428
Interacciones de 3 términos	4	343,94	85,99	6,81	0,000
A*B*C	1	259,19	259,19	20,54	0,000
A*B*D	1	7,28	7,28	0,58	0,453
A*C*D	1	52,06	52,06	4,12	0,051
B*C*D	1	25,41	25,41	2,01	0,166
Interacciones de 4 términos	1	918,37	918,37	72,76	0,000
A*B*C*D	1	918,37	918,37	72,76	0,000
Error	32	403,88	12,62		
Total	47	8178,80			

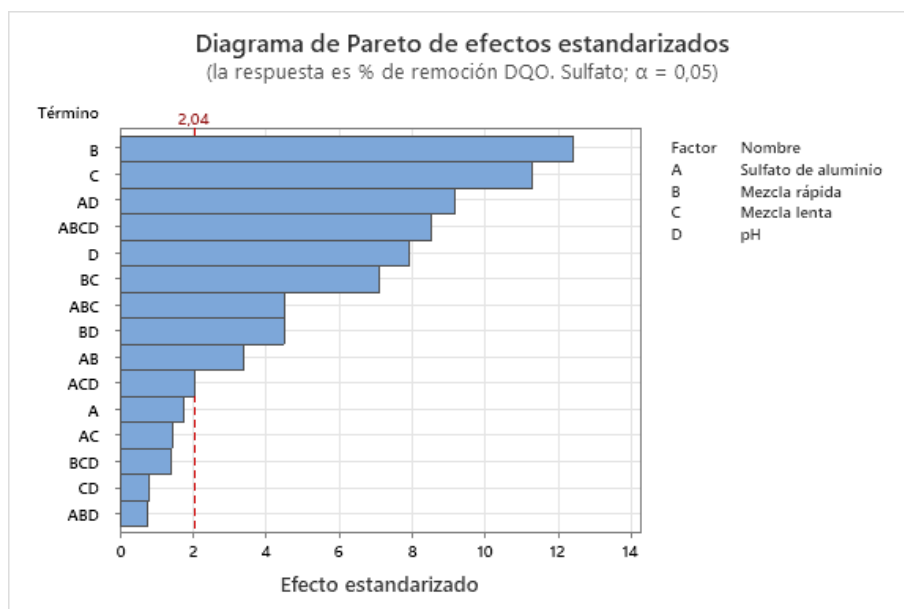
Nota. A; Concentración de Sulfato de aluminio, B; Velocidad de mezcla rápida, C; Velocidad de mezcla lenta, D; Concentración de pH.

De la tabla ANOVA, se puede interpretar que con $p < 0,05$ las variables que presentaron significancia fueron la velocidad de mezcla rápida y la velocidad de mezcla lenta como variables individuales. También se identifica una doble interacción entre el factor concentración de sulfato de aluminio y el pH, evidenciando una significancia para la variable % de remoción de DQO, lo que se puede confirmar en la gráfica de Pareto para efectos estandarizados (ver figura 12).

A continuación, se presenta el diagrama de Pareto de efectos estandarizados donde se muestran las combinaciones entre factores que tienen efecto sobre la variable % de remoción de DQO con el uso de sulfato de aluminio.

Figura 12

Diagrama de Pareto de efectos estandarizados con variable de respuesta % de remoción de color



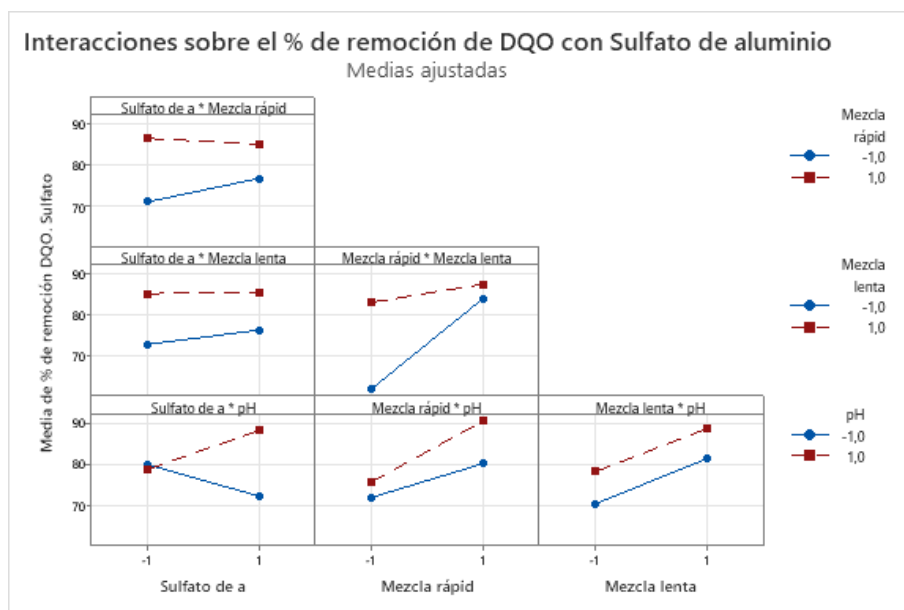
Fuente. Autoría propia

El diagrama de Pareto muestra que la mayor significancia se obtuvo con la variable velocidad de mezcla rápida. Sin embargo, también se encuentra significancia entre los factores concentración $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ y el factor pH, prueba de esto se puede constatar en la tabla 20 de análisis de varianza ANOVA. Por lo tanto, se confirma que la relación de factores es estadísticamente significativa.

A continuación, se presenta la gráfica de interacción de factores que tienen significancia e inciden sobre la variable de respuesta % de remoción de DQO con el uso de sulfato de aluminio.

Figura 13

Gráfica de interacción de factores con variable de respuesta % de remoción de DQO



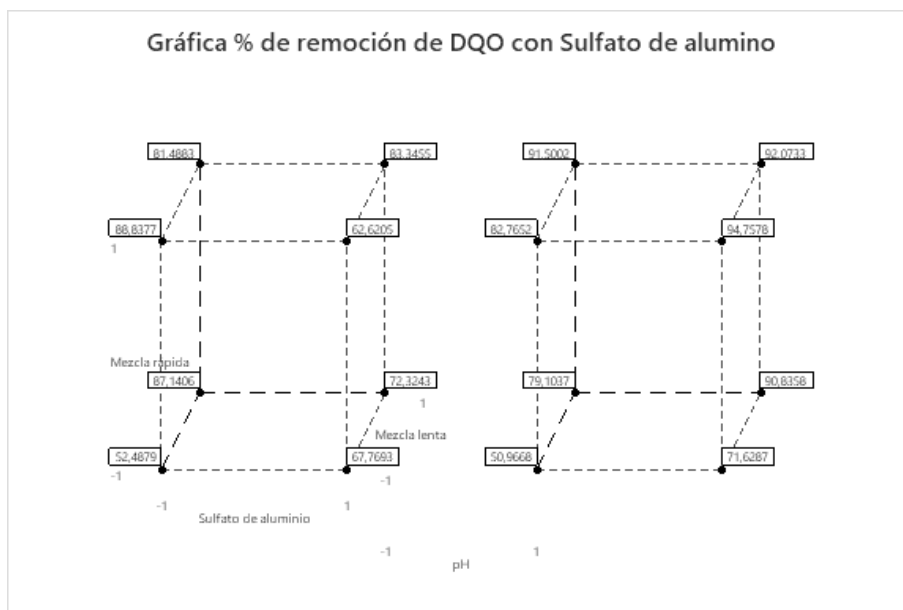
Fuente. Autoría propia

En la gráfica anterior, se observa en el segundo recuadro de la última fila que la interacción con mayor rendimiento se presenta entre los factores velocidad de mezcla rápida cuando se encuentra a 150 rpm representado por el número 1 en la gráfica y el pH a concentración de 8 unidades, representado por la línea roja, rebasando el 90% en la eficiencia para la variable de respuesta % de remoción de DQO. Sin embargo, las demás interacciones muestran resultados cercanos al 90%.

La figura 14, muestra las posibles combinaciones entre los factores y su incidencia en la variable de respuesta % de remoción de DQO.

Figura 14

Gráfica de cubos para medias ajustadas con variable de respuesta % de remoción de DQO



Fuente. Autoría propia

En la gráfica de cubos se puede evidenciar los porcentajes de remoción de DQO entre el 50% y el 94,7 % de eficiencia. Se puede afirmar también que los mayores rendimientos se encuentran en la gráfica de cubo del lado derecho, la cual indica que el factor pH está en una concentración de 8 unidades. Por otra parte, se logra identificar que la mayor eficiencia de % de remoción de DQO se presenta cuando el factor concentración de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ se encuentra en un nivel máximo representado por 1000 ppm, velocidad de mezcla rápida en 150 rpm, velocidad de mezcla lenta en 40 rpm y pH de 8 unidades.

La tabla 21 muestra la combinación con mayor rendimiento.

Tabla 21

Combinaciones con mayor % de remoción de DQO.

Concentración de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ppm	velocidad de mezcla rápida	velocidad de mezcla lenta	Concentración de pH	Eficiencia %
1000	150	40	8	94,7

Como se mencionó al inicio del análisis, terminado el análisis de los resultados del diseño experimental 2^4 con el uso de sulfato de aluminio, se da continuación con el análisis de los resultados obtenidos durante el desarrollo del diseño experimental 2^4 con el uso de PAC.

Análisis de Resultados del Diseño Experimental 2^4 con PAC

Análisis estadístico para la variable de respuesta SST con el uso de PAC

Se presenta a continuación, el análisis estadístico del diseño experimental 2^4 con variable de respuesta denominada % de eficiencia de SST.

Tabla 22

Análisis de varianza con respuesta % de remoción de SST con PAC.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	15	233,874	15,5916	16,54	0,000
Lineal	4	97,814	24,4534	25,95	0,000
A	1	27,572	27,5725	29,26	0,000
B	1	1,630	1,6303	1,73	0,198
C	1	1,085	1,0846	1,15	0,291
D	1	67,526	67,5262	71,65	0,000
Interacciones de 2 términos	6	40,464	6,7440	7,16	0,000
A*B	1	1,240	1,2403	1,32	0,260

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
A*C	1	9,604	9,6041	10,19	0,003
A*D	1	12,497	12,4974	13,26	0,001
B*C	1	15,961	15,9608	16,94	0,000
B*D	1	0,403	0,4035	0,43	0,518
C*D	1	0,758	0,7579	0,80	0,377
Interacciones de 3 términos	4	90,044	22,5110	23,89	0,000
A*B*C	1	41,342	41,3417	43,87	0,000
A*B*D	1	0,637	0,6374	0,68	0,417
A*C*D	1	25,111	25,1112	26,65	0,000
B*C*D	1	22,954	22,9539	24,36	0,000
Interacciones de 4 términos	1	5,552	5,5525	5,89	0,021
A*B*C*D	1	5,552	5,5525	5,89	0,021
Error	32	30,157	0,9424		
Total	47	264,031			

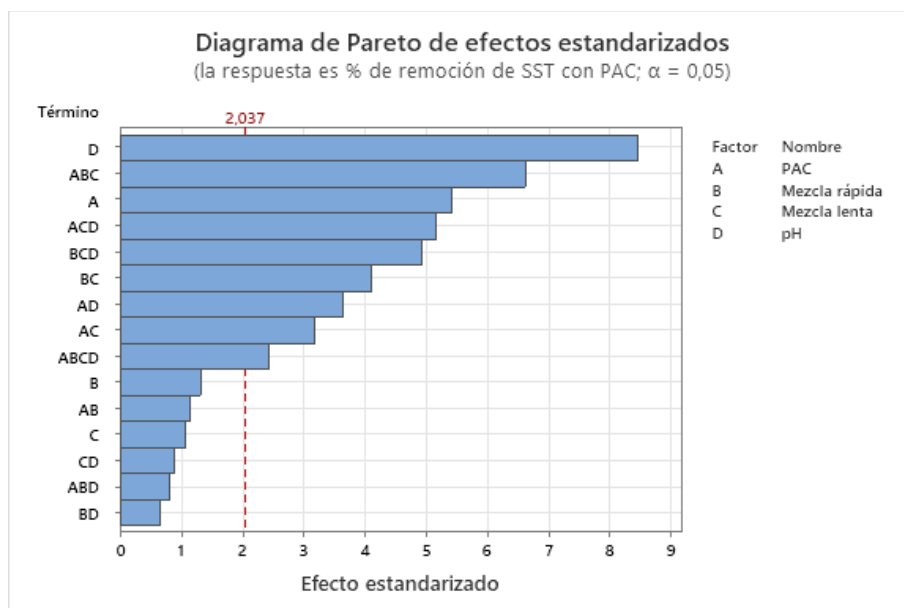
Nota. A; concentración de PAC, B; Velocidad de mezcla rápida, C; Velocidad de mezcla lenta, D; Concentración de pH.

De la tabla ANOVA, se puede interpretar que las variables que presentan significancia con un $p - \text{valor} < 0,05$ fueron el pH y la concentración de coagulante como variables individuales. Por otra parte, se presenta una interacción triple entre la concentración de PAC, la velocidad de mezcla rápida y la velocidad de mezcla lenta, por lo cual se puede afirmar que dichas interacciones inciden en la variable % de remoción de SST de forma significativa, lo cual se puede confirmar con la gráfica de interacciones de la figura 16.

A continuación, se presenta el diagrama de Pareto de efectos estandarizados donde se muestran las combinaciones entre factores que tienen efecto sobre la variable % de remoción de SST con el uso de PAC.

Figura 15

Diagrama de Pareto de efectos estandarizados con variable de respuesta % de remoción de SST



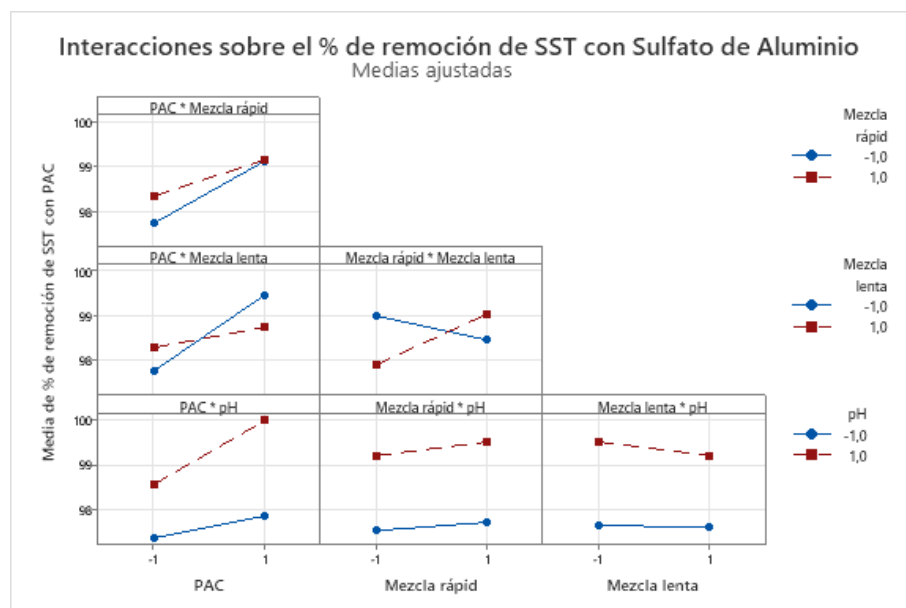
Fuente. Autoría propia

El anterior diagrama, muestra que el factor pH presenta un mayor efecto sobre la variable de respuesta % de remoción de SST. Sin embargo, se presenta una interacción entre los factores concentración de PAC, velocidad de mezcla rápida y velocidad de mezcla lenta, siendo la interacción más significativa con un p valor de 0,000. Por lo tanto, los factores son estadísticamente significativos sobre la variable de respuesta % de remoción de SST.

A continuación, se presenta la gráfica de interacción de factores que tienen significancia e inciden sobre la variable de respuesta % de remoción de SST con el uso de PAC.

Figura 16

Gráfica de interacción de factores con variable de respuesta % de remoción de SST



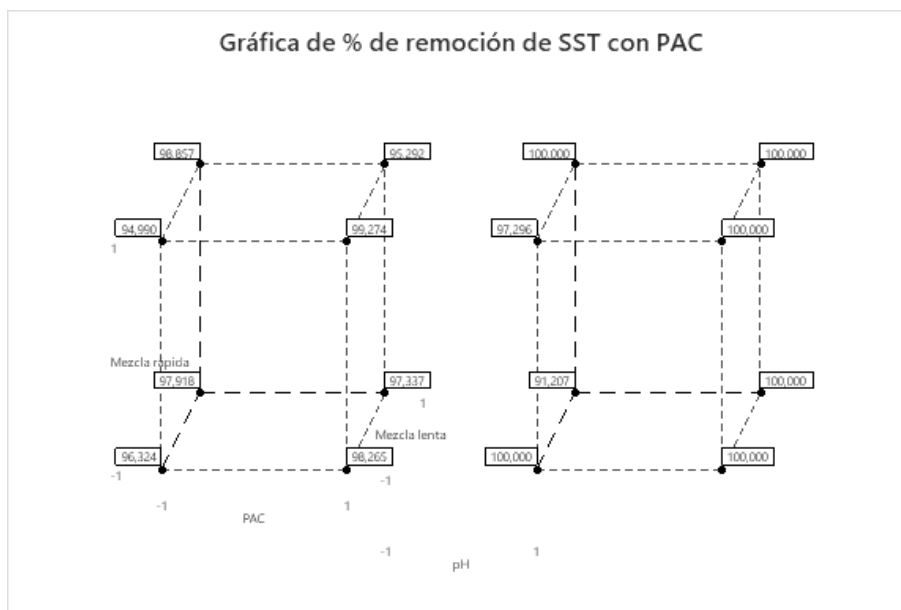
Fuente. Autoría propia

Según la gráfica anterior, se encuentran diversas interacciones entre los factores, no obstante, la más significativa es la interacción entre la concentración de PAC cuando se tienen 1000 ppm y el pH cuando presenta 8 unidades, incidiendo sobre la variable % de remoción de SST con un 100% de eficiencia.

La figura 17, muestra las posibles combinaciones entre los factores y su incidencia en la variable de respuesta % de remoción de SST.

Figura 17

Gráfica de cubos de media ajustadas con variable de respuesta % de remoción de SST



Fuente. Autoría propia

El gráfico muestra que en la diversidad de combinaciones es posible obtener rendimientos desde el 91% hasta un 100% en la remoción de SST. No obstante, el cubo del lado derecho enseña que cuando se tiene el factor pH en 8 unidades, la mayoría de sus rendimientos se encuentran en un 100%. Por lo tanto, se puede afirmar que la mayoría de las combinaciones son significativas, incidiendo de forma positiva sobre la variable % de remoción de SST.

La tabla 23 muestra las combinaciones con mayor % de remoción de SST.

Tabla 23

Combinaciones con mayor % de remoción de SST.

Concentración de PAC ppm	velocidad de mezcla rápida	velocidad de mezcla lenta	Concentración de pH	Eficiencia %
500	120	70	8	100
1000	150	70	8	100
1000	150	40	8	100
500	120	40	8	100

Análisis estadístico para la variable de respuestas turbidez con el uso de PAC

Se presenta a continuación, el análisis estadístico del diseño experimental 2⁴ con variable de respuesta denominada % de eficiencia de turbidez.

Tabla 24

Análisis de varianza con respuesta % de remoción de turbidez con PAC.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	15	313,709	20,9139	73,69	0,000
Lineal	4	58,502	14,6254	51,53	0,000
A	1	35,515	35,5145	125,13	0,000
B	1	5,332	5,3323	18,79	0,000
C	1	1,396	1,3960	4,92	0,034
D	1	16,259	16,2589	57,29	0,000
Interacciones de 2 términos	6	115,456	19,2427	67,80	0,000
A*B	1	6,976	6,9761	24,58	0,000
A*C	1	1,072	1,0715	3,78	0,061
A*D	1	74,545	74,5445	262,65	0,000

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
B*C	1	22,846	22,8459	80,49	0,000
B*D	1	7,172	7,1717	25,27	0,000
C*D	1	2,846	2,8464	10,03	0,003
Interacciones de 3 términos	4	137,257	34,3142	120,90	0,000
A*B*C	1	27,678	27,6779	97,52	0,000
A*B*D	1	4,546	4,5460	16,02	0,000
A*C*D	1	52,918	52,9176	186,45	0,000
B*C*D	1	52,115	52,1154	183,62	0,000
Interacciones de 4 términos	1	2,494	2,4940	8,79	0,006
A*B*C*D	1	2,494	2,4940	8,79	0,006
Error	32	9,082	0,2838		
Total	47	322,791			

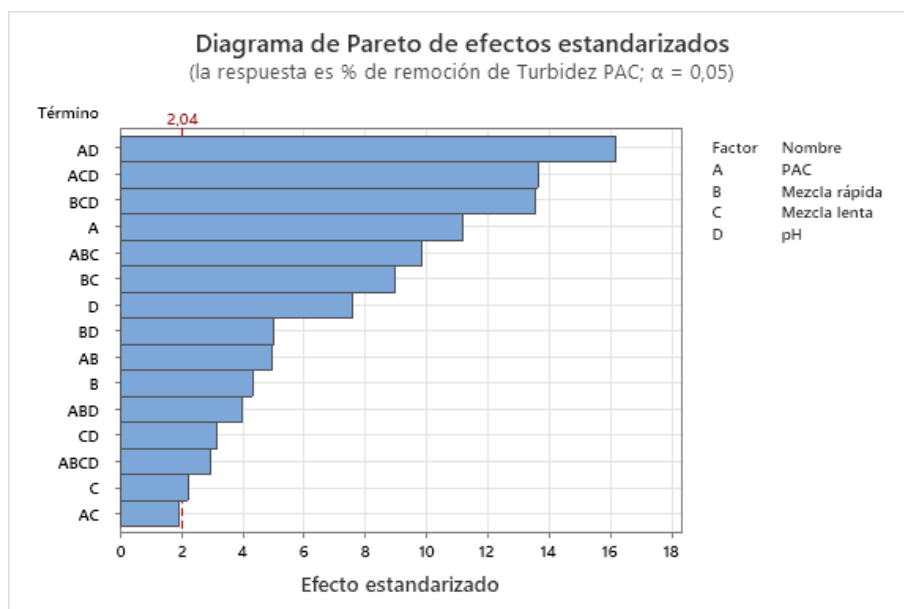
Nota. A; concentración de PAC, B; Velocidad de mezcla rápida, C; Velocidad de mezcla lenta, D; Concentración de pH.

De la tabla ANOVA, se puede interpretar que con un p – valor $< 0,05$ las variables con significancia fueron la concentración de PAC como variable independiente y la interacción doble entre la concentración de PAC y el pH. También se encontró una interacción triple entre las variables concentración de PAC, velocidad de mezcla lenta y pH para el análisis de la variable % de remoción de turbidez, confirmando esto con el diagrama de Pareto de efectos estandarizados. (ver figura 18).

A continuación, se presenta el diagrama de Pareto de efectos estandarizados donde se muestran las combinaciones entre factores que tienen efecto sobre la variable % de remoción de turbidez con el uso de PAC.

Figura 18

Diagrama de Pareto de efectos estandarizados con variable de respuesta % de remoción de turbidez



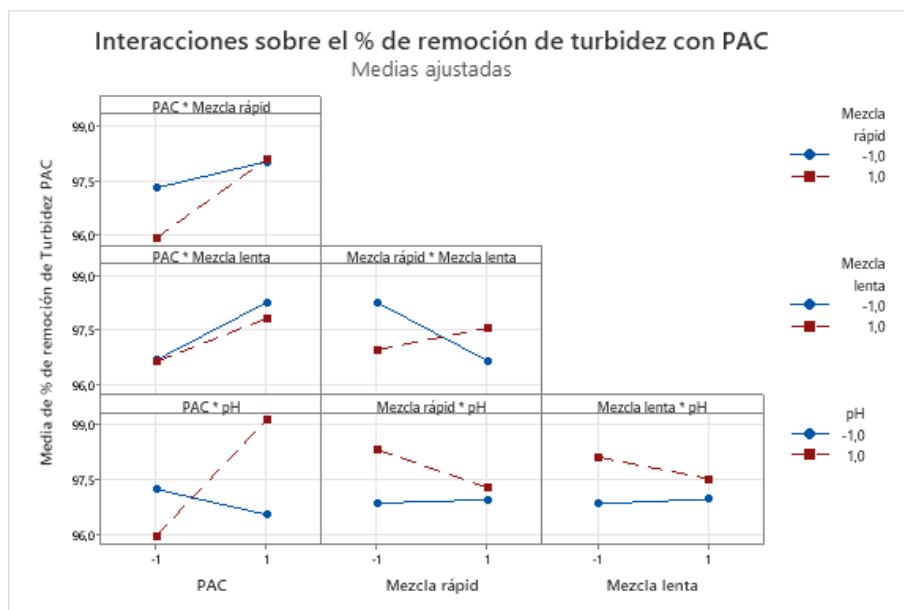
Fuente. Autoría propia

El Pareto muestra que la mayoría de las combinaciones superan el intervalo de confianza. Sin embargo, el tratamiento con mayor efecto se encuentra cuando interactúa el factor concentración de PAC y el pH con un p valor de 0,000, por lo cual se puede afirmar que las interacciones son estadísticamente significativas sobre la variable % de remoción de turbidez.

A continuación, se presenta la gráfica de interacción de factores que tienen significancia e inciden sobre la variable de respuesta % de remoción de turbidez con el uso de PAC.

Figura 19

Gráfica de interacción con variable de respuesta % de remoción de turbidez



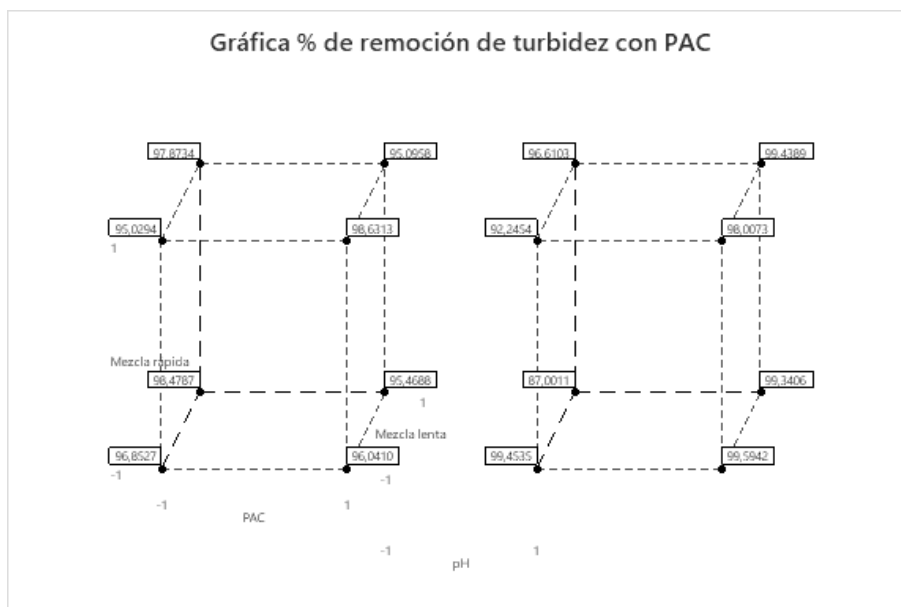
Fuente. Autoría propia

Las gráficas de interacción enseñan que el mayor rendimiento se tiene cuando hay una combinación entre la concentración de PAC con valor de 1000 ppm y un pH de 8, superando el 99% de eficiencia. Se pueden encontrar otras combinaciones con eficiencias mayores al 97% como es el caso de la concentración de PAC y la velocidad de mezcla lenta como se muestra en la gráfica ubicada en la primera columna fila 2.

La figura 20, muestra las posibles combinaciones entre los factores y su incidencia en la variable de respuesta % de remoción de turbidez.

Figura 20

Gráfica de cubos para medias ajustadas con variable de respuesta % de remoción de turbidez



Fuente. Autoría propia

En la gráfica de cubos del lado derecho, se puede observar que la mejor combinación incide sobre la variable % de remoción de turbidez con una eficiencia de 99,5%.

Por otra parte, se puede observar que entre el total de las combinaciones se encuentra rendimientos entre un 87% y un 99%, lo que demuestra que cualquiera de las combinaciones se puede considerar adecuada para el caso de estudio.

La tabla 25 muestra la combinación de factores que presenta mayor rendimiento sobre la variable % de remoción de turbidez.

Tabla 25

Combinaciones con mayor % de remoción de turbidez.

Concentración de PAC ppm	velocidad de mezcla rápida	velocidad de mezcla lenta	Concentración de pH	Eficiencia %
1000	120	40	8	99,5

Análisis estadístico para la variable de respuesta % de remoción de color con el uso de PAC

Se presenta a continuación, el análisis estadístico del diseño experimental 2^4 con variable de respuesta denominada % de eficiencia de color.

Tabla 26

Análisis de varianza con respuesta % de remoción de color con PAC.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	15	625,259	41,684	126,29	0,000
Lineal	4	223,435	55,859	169,23	0,000
A	1	25,881	25,881	78,41	0,000
B	1	1,491	1,491	4,52	0,041
C	1	0,066	0,066	0,20	0,658
D	1	195,997	195,997	593,80	0,000
Interacciones de 2 términos	6	219,113	36,519	110,64	0,000
A*B	1	0,016	0,016	0,05	0,827
A*C	1	2,781	2,781	8,43	0,007
A*D	1	155,220	155,220	470,26	0,000
B*C	1	39,635	39,635	120,08	0,000
B*D	1	4,178	4,178	12,66	0,001

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
C*D	1	17,284	17,284	52,36	0,000
Interacciones de 3 términos	4	164,691	41,173	124,74	0,000
A*B*C	1	28,466	28,466	86,24	0,000
A*B*D	1	5,487	5,487	16,62	0,000
A*C*D	1	51,883	51,883	157,19	0,000
B*C*D	1	78,855	78,855	238,90	0,000
Interacciones de 4 términos	1	18,019	18,019	54,59	0,000
A*B*C*D	1	18,019	18,019	54,59	0,000
Error	32	10,562	0,330		
Total	47	635,821			

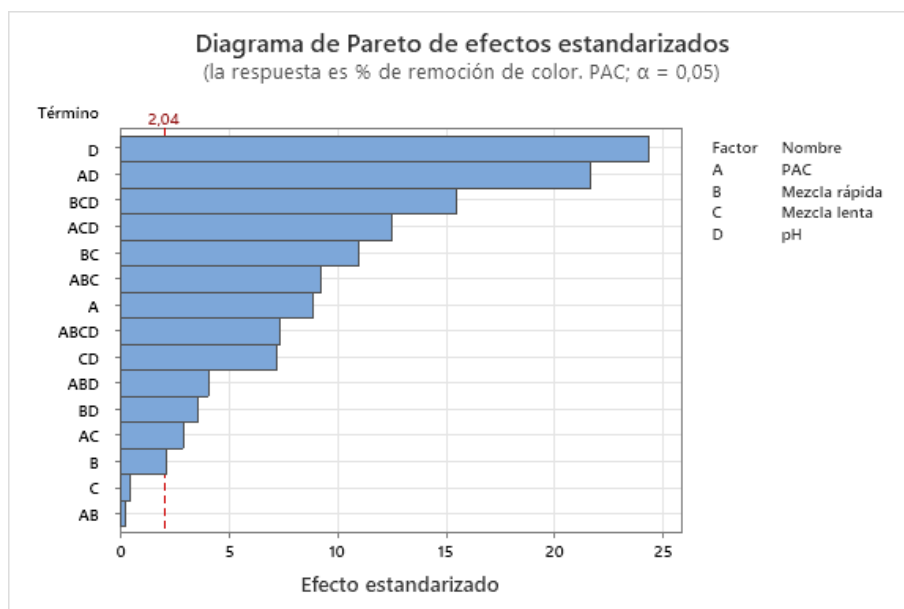
Nota. A; concentración de PAC, B; Velocidad de mezcla rápida, C; Velocidad de mezcla lenta, D; Concentración de pH.

Según la tabla ANOVA, se encuentra que con un p – valor $< 0,05$ las variables con significancia fueron el pH individualmente y la interacción entre la concentración de PAC y el pH. Se encontró también una interacción triple entre las variables velocidad de mezcla rápida, velocidad de mezcla lenta y pH para la variable de respuesta % de remoción de color, lo cual se puede confirmar con el diagrama de Pareto (ver figura 21).

A continuación, se presenta el diagrama de Pareto de efectos estandarizados donde se muestran las combinaciones entre factores que tienen efecto sobre la variable % de remoción de color con el uso de PAC.

Figura 21

Diagrama de Pareto de efectos estandarizados con variable de respuesta % de remoción de color



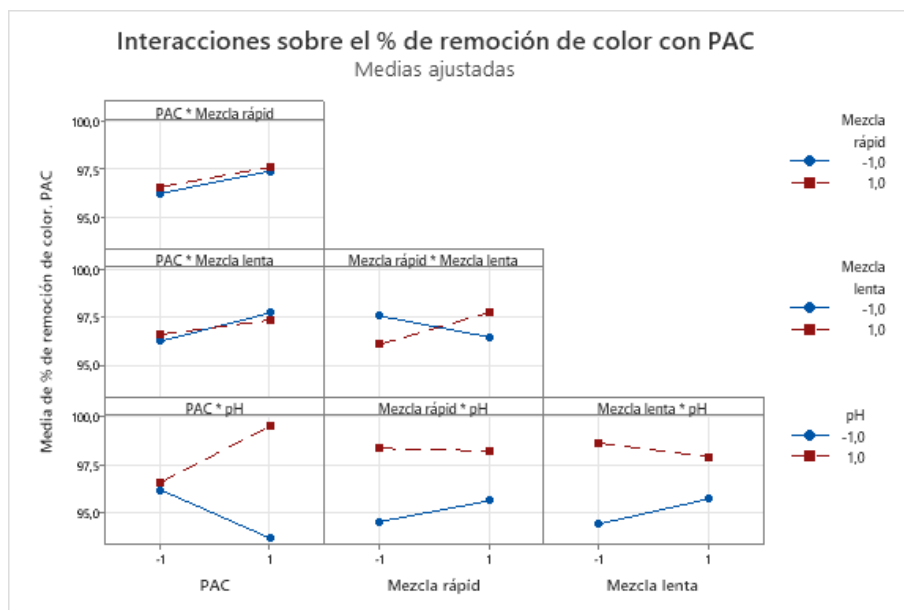
Fuente. Autoría propia

De la gráfica anterior, se puede afirmar que la mayoría de los tratamientos rebasan el intervalo de confianza, sin embargo, la interacción entre la concentración de PAC y pH es la que presenta mayor efecto con un p – valor de 0,000. por lo que se puede afirmar que los términos y su asociación con la variable de respuesta % de remoción de color son estadísticamente significativos.

A continuación, se presenta la gráfica de interacción de factores que tienen significancia e inciden sobre la variable de respuesta % de remoción de color con el uso de PAC.

Figura 22

Gráfica de interacción con variable de respuesta % de remoción de color



Fuente. Autoría propia

De la gráfica de interacciones, se puede resaltar que la interacción con mayor significancia se presenta entre el factor concentración de PAC con 1000 ppm y el factor pH en 8 unidades, lo cual se puede observar en el último recuadro de la primera columna.

La figura 23, muestra las posibles combinaciones entre los factores y su incidencia en la variable de respuesta % de remoción de color.

Figura 23

Gráfica de cubos para medias ajustadas con variable de respuesta % de remoción de color



Fuente. Autoría propia

La gráfica de cubos muestra que la totalidad de las combinaciones presentan rendimientos mayores al 87.5%, no obstante, la mejor combinación se encuentra con un rendimiento del 100%, encontrando también que cuando se tiene el factor pH en 8 unidades, las eficiencias son mayores como se muestra en el cubo del lado derecho.

La tabla 27 muestra la combinación de factores que presenta mayor rendimiento sobre la variable % de remoción de color.

Tabla 27

Combinaciones con mayor % de remoción de color.

Concentración de PAC ppm	velocidad de mezcla rápida	velocidad de mezcla lenta	Concentración de pH	Eficiencia %
1000	150	70	8	100

Análisis estadístico para la variable de respuesta % de remoción de DQO con el uso de PAC

Se presenta a continuación, el análisis estadístico del diseño experimental 2⁴ con variable de respuesta denominada % de eficiencia de DQO.

Tabla 28

Análisis de varianza con respuesta % de remoción de DQO.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	15	5207,37	347,16	65,65	0,000
Lineal	4	2342,50	585,63	110,74	0,000
A	1	127,34	127,34	24,08	0,000
B	1	884,61	884,61	167,28	0,000
C	1	1154,51	1154,51	218,31	0,000
D	1	176,04	176,04	33,29	0,000
Interacciones de 2 términos	6	1377,18	229,53	43,40	0,000
A*B	1	637,09	637,09	120,47	0,000
A*C	1	25,48	25,48	4,82	0,036
A*D	1	18,72	18,72	3,54	0,069
B*C	1	128,52	128,52	24,30	0,000
B*D	1	511,00	511,00	96,63	0,000
C*D	1	56,37	56,37	10,66	0,003
Interacciones de 3 términos	4	692,35	173,09	32,73	0,000

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
A*B*C	1	460,69	460,69	87,12	0,000
A*B*D	1	72,49	72,49	13,71	0,001
A*C*D	1	7,28	7,28	1,38	0,249
B*C*D	1	151,88	151,88	28,72	0,000
Interacciones de 4 términos	1	795,34	795,34	150,40	0,000
A*B*C*D	1	795,34	795,34	150,40	0,000
Error	32	169,23	5,29		
Total	47	5376,59			

Nota. A; concentración de coagulantes, B; Velocidad de mezcla rápida, C; Velocidad de mezcla lenta, D;

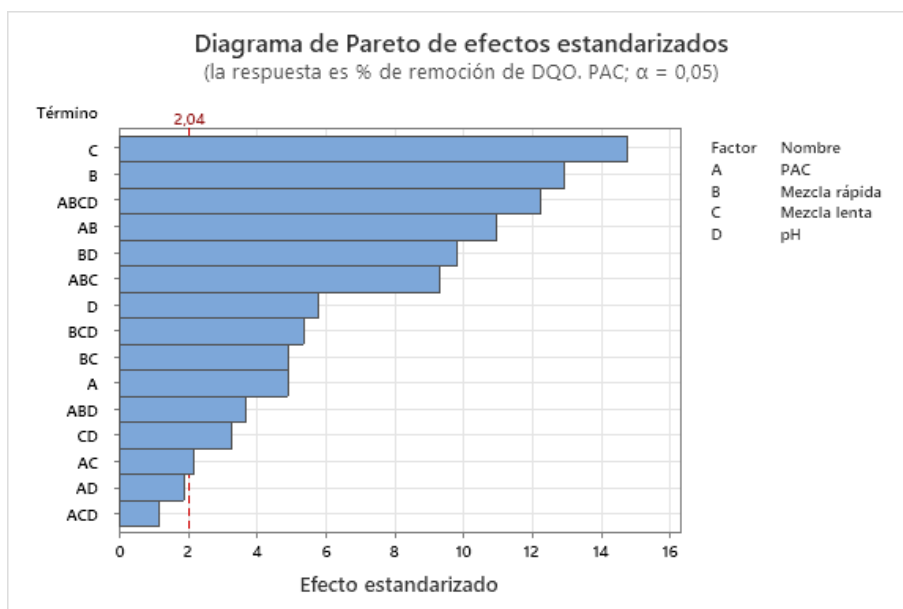
Concentración de pH.

De la tabla ANOVA, se identifica que las variables que tienen significancia con $p - \text{valor} < 0,05$ fueron la velocidad de mezcla lenta y la velocidad de mezcla rápida como variables independientes. También se encuentra una interacción entre los cuatro factores y una interacción entre la concentración de PAC y la velocidad de mezcla rápida para el parámetro % de remoción de DQO, confirmando esta significancia con el diagrama de Pareto. (ver figura 24).

A continuación, se presenta el diagrama de Pareto de efectos estandarizados donde se muestran las combinaciones entre factores que tienen efecto sobre la variable % de remoción de DQO con el uso de PAC.

Figura 24

Diagrama de Pareto de efectos estandarizados con variable de respuesta % de remoción de DQO



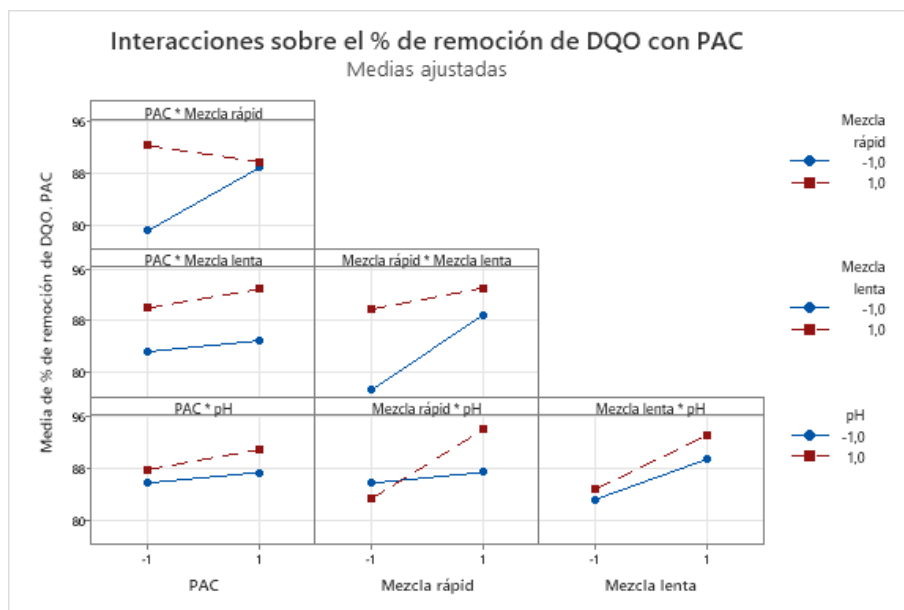
Fuente. Autoría propia

De acuerdo con el diagrama de Pareto, se observa que el efecto con mayor significancia se presenta con el factor velocidad de mezcla lenta. Sin embargo, la combinación entre la concentración de PAC y Velocidad de mezcla rápida presenta efecto con un p valor de 0,000. Por lo tanto, las combinaciones son estadísticamente significativas.

A continuación, se presenta la gráfica de interacción de factores que tienen significancia e inciden sobre la variable de respuesta % de remoción de DQO con el uso de PAC.

Figura 25

Gráfica de interacción con variable de respuesta % de remoción de DQO



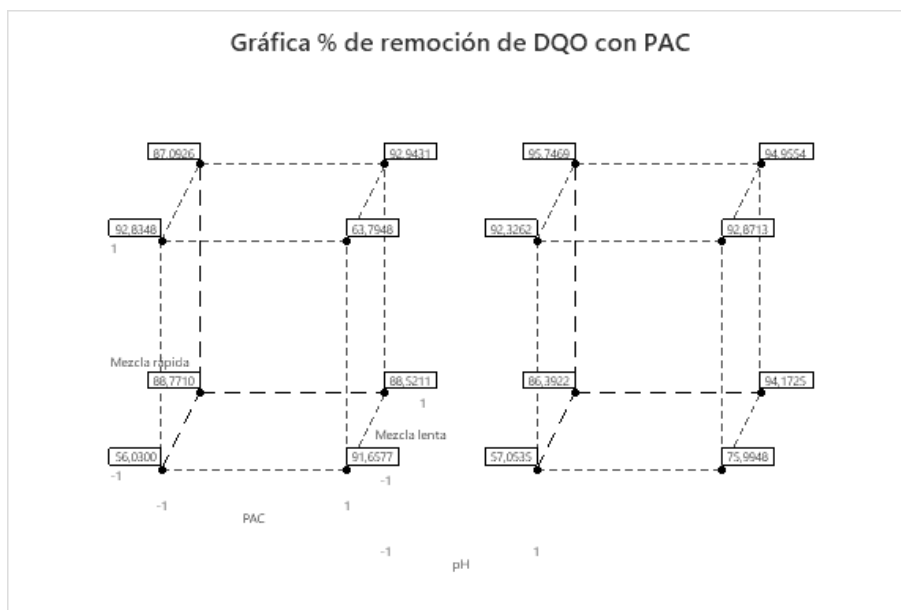
Fuente. Autoría propia

En la gráfica anterior, se puede observar que todas las combinaciones presentan altos rendimientos, sin embargo, la interacción con mayor eficiencia se presenta entre la velocidad de mezcla rápida cuando se encuentra en 150 rpm y el pH en 8 unidades, con un rendimiento mayor a 90% como se puede observar en el segundo recuadro de la última fila.

La figura 26, muestra las posibles combinaciones entre los factores y su incidencia en la variable de respuesta % de remoción de DQO.

Figura 26

Gráfica de cubos para medias ajustadas con variable de respuesta % de remoción de DQO



Fuente. Autoría propia

En la gráfica anterior se puede observar que las mejores combinaciones se presentan cuando el factor pH tiene un valor de 8 unidades, lo cual se puede observar en el cubo del lado derecho encontrando la mejor combinación con una eficiencia del 95.7 %.

La tabla 29 muestra la combinación de factores que presenta mayor rendimiento sobre la variable % de remoción de DQO.

Tabla 29

Combinaciones con mayor % de remoción de DQO.

Concentración de PAC ppm	velocidad de mezcla rápida	velocidad de mezcla lenta	Concentración de pH	Eficiencia %
500	150	70	8	95,7

Cumplimiento Normativo

De acuerdo con los ensayos con el sulfato de aluminio, se realizó una comparación de las concentraciones obtenidas de SST y DQO con la normatividad ambiental de vertimientos en Colombia según la actividad, para conocer el cumplimiento de cada corrida de la prueba de jarras.

Tabla 30

Concentraciones de SST y DQO obtenidas después del tratamiento con sulfato de aluminio.

Cumplimiento normativo de acuerdo con la actividad de elaboración de cerveza y malta para cada corrida con Sulfato de aluminio						
Orden del tratamiento	SST mg/l Concentración promedio	Res 4090/2017	RES 0631/2015	DQO mg/l Concentración promedio	Res 4090/2017	RES 0631/2015
		Cumple Límite 40 mg/l si/No	Cumple Límite 50 mg/l si/No		Cumple Límite 50 mg/l si/No	Cumple Límite 200 mg/l si/No
1	6	Cumple	Cumple	148	No Cumple	Cumple
2	30	Cumple	Cumple	73	No Cumple	Cumple
3	3	Cumple	Cumple	17	Cumple	Cumple
4	18	Cumple	Cumple	132	No Cumple	Cumple
5	6	Cumple	Cumple	25	Cumple	Cumple
6	21	Cumple	Cumple	57	No Cumple	Cumple
7	10	Cumple	Cumple	36	Cumple	Cumple
8	26	Cumple	Cumple	33	Cumple	Cumple
9	7	Cumple	Cumple	153	No Cumple	Cumple
10	1	Cumple	Cumple	103	No Cumple	Cumple
11	32	Cumple	Cumple	34	Cumple	Cumple
12	0	Cumple	Cumple	10	Cumple	Cumple
13	18	Cumple	Cumple	48	Cumple	Cumple
14	0	Cumple	Cumple	14	Cumple	Cumple
15	0	Cumple	Cumple	17	Cumple	Cumple
16	0	Cumple	Cumple	22	Cumple	Cumple

De acuerdo con los ensayos con el PAC, se realizó una comparación de las concentraciones obtenidas de SST y DQO con la normatividad ambiental que regula los vertimientos en Colombia según la actividad, para conocer el cumplimiento de cada corrida de la prueba de jaras.

Tabla 31

Concentraciones de SST y DQO obtenidas después del tratamiento con PAC.

Cumplimiento normativo de acuerdo con la actividad de elaboración de cerveza y malta para cada corrida con PAC						
Orden de tratamientos	SST mg/l	Res 4090/2017	RES 0631/2015	DQO mg/l	Res 4090/2017	RES 0631/2015
	Concentración promedio	Cumple Límite 40 mg/l si/No	Cumple Límite 50 mg/l si/No	Concentración promedio	Cumple Límite 50 mg/l si/No	Cumple Límite 200 mg/l si/No
1	4	Cumple	Cumple	183	No cumple	Cumple
2	2	Cumple	Cumple	25	Cumple	Cumple
3	7	Cumple	Cumple	14	Cumple	Cumple
4	1	Cumple	Cumple	173	No cumple	Cumple
5	4	Cumple	Cumple	29	Cumple	Cumple
6	2	Cumple	Cumple	31	Cumple	Cumple
7	2	Cumple	Cumple	33	Cumple	Cumple
8	4	Cumple	Cumple	18	Cumple	Cumple
9	0	Cumple	Cumple	179	No cumple	Cumple
10	0	Cumple	Cumple	123	No cumple	Cumple
11	3	Cumple	Cumple	20	Cumple	Cumple
12	0	Cumple	Cumple	19	Cumple	Cumple
13	9	Cumple	Cumple	42	Cumple	Cumple
14	0	Cumple	Cumple	12	Cumple	Cumple
15	0	Cumple	Cumple	11	Cumple	Cumple
16	0	Cumple	Cumple	19	Cumple	Cumple

En términos de cumplimiento normativo, se compararon los resultados obtenidos con la normatividad ambiental referente a vertimientos, encontrando que tanto los tratamientos con Sulfato de Aluminio, como los desarrollados con PAC, son eficientes y cumplen con la mayoría de las concentraciones establecidas. Sin embargo, es preciso mencionar, que con el uso de PAC se obtienen concentraciones máximo hasta 12 mg/l para SST, mientras que con Sulfato de Aluminio se tuvieron concentraciones mayores a 30 mg/l. Por otra parte, las concentraciones de DQO para los dos productos son similares en la diversidad de tratamientos realizados, no obstante, se detectan concentraciones menores con el uso de PAC (ver tablas 30 y 31).

Discusión

Con los resultados encontrados, se pudo observar que los mejores rendimientos para las cuatro variables de respuesta, se obtuvieron con el uso del coagulante PAC , encontrando eficiencias de remoción en un rango del 90% al 100% para SST en la diversidad de combinaciones de los factores , mientras que con el uso de Sulfato de Aluminio , se encontró que varias de las combinaciones tienen rendimientos entre el 50% y el 90% y solo algunas del 100% para la variable SST, lo que permite afirmar que para la remoción SST en el tipo de agua objeto de estudio , el mejor coagulante fue el PAC.

Para La variable de respuesta % de eficiencia de remoción de turbidez, se encontró que, en la variedad de combinaciones de los factores o tratamientos, los rendimientos con mayor eficiencia se presentan con el uso del PAC indicando eficiencias desde el 86.7% hasta el 99.5%. De otra parte, los resultados obtenidos con el diseño en el que se usó el Sulfato de aluminio muestran que, si bien se obtuvo un resultado del 99%, no se obtuvieron eficiencias mayores de 98% en las combinaciones, evidenciando rendimientos desde 26% y 46%, por lo que el mejor coagulante y el que mejores resultados presentó durante las pruebas realizadas para la variable turbidez, fue el PAC.

Ahora bien, evaluando los resultados para la variable Color, se continuó encontrando resultados de mayor eficiencia con el uso del PAC, ya que se obtuvieron rendimientos entre un 87.5% y un 100% de eficiencia, dejando ver resultados entre el 47.8% y el 98.7% con el uso de Sulfato de Aluminio.

Otra variable que se midió durante el diseño experimental, fue la DQO, observando que, para esta variable, los rendimientos con los dos tipos de coagulantes se comportaron de una forma similar, mostrando sus mayores eficiencias en rangos del 90% al 95%.

El desarrollo del estudio, mostró que como indica Anccasi (2019), el uso de coagulante PAC, es eficiente a diferentes unidades de pH en rango de 4 a 9 unidades, comprobando así lo dicho por este autor, al llevar a cabo las pruebas del diseño con el factor pH a valores de 5 y 8 unidades, mientras que con el Sulfato de Aluminio, los rendimientos más bajos se obtuvieron con pH de 5 unidades, no obstante, se demuestra la afirmación de Andía (2000), quien menciona que el rango óptimo de pH para el proceso de coagulación con sales de aluminio, se encuentra entre 6,5 y 8 unidades, ya que los mejores rendimientos para los dos coagulantes se dieron cuando se encontraban con el factor pH a su máximo nivel, el cual fue de 8 unidades de pH.

Las diversas combinaciones o tratamientos realizados, gracias al diseño experimental, permitieron identificar que, para este estudio, el comportamiento de las variables de respuesta presenta altos rendimientos cuando todos los factores se encuentran en un máximo nivel (concentración de coagulante en 1000 ppm, velocidad de mezcla rápida en 150 Rpm, velocidad de mezcla lenta en 70 Rpm y pH de 8 unidades). Sin embargo, se encontró que cuando la variable velocidad de mezcla lenta está en 40 Rpm, también se obtienen rendimientos entre el 99.59% y el 100% de eficiencia, lo cual permitió comprobar la afirmación de Trujillo et al., (2014) el cual mencionan que cuando se tienen gradientes de velocidad de mezcla lenta bajos, la floculación actúa de una forma más eficiente evitando que el floc se rompa o como afirma Acosta (2006) que para gradientes de velocidad de mezcla lenta es aconsejable manejar un valor máximo de 40 Rpm.

Se pudo observar que los factores pH y concentración de coagulante fueron los que tuvieron mayor interacción en los tratamientos, siendo posible apreciar que cuando el pH se encuentra en 8 unidades, valor cercano a la neutralidad, se pueden usar dosis hasta de 500 ppm

de coagulante permitiendo el cumplimiento legal y una eficiencia de remoción sobre el 90% para las 4 variables de respuesta establecidas en el estudio de caso

Conclusiones

Por medio un diseño experimental 2⁴ con policloruro de aluminio, se encontró que, al estar los niveles de cada factor en alto, se obtuvieron eficiencias de remoción de 100% en SST, 99% en turbidez, 100% en color y 95% en DQO, mientras que con el diseño experimental 2⁴ realizado con sulfato de aluminio, se alcanzaron eficiencias 100% en SST, 98% en turbidez, 98% en color y 92% en DQO cuando sus factores también estaban al nivel máximo. Por lo que se observa que las mayores eficiencias de remoción se presentan con el uso de policloruro de aluminio.

Al realizar un análisis de la totalidad de los tratamientos, se obtuvo que, con el uso de PAC se alcanzan eficiencias de remoción entre un 86% y 99%, mientras que con el uso de sulfato de aluminio se tienen eficiencias entre el 55% y el 97%. Indicando que el coagulante más eficiente sobre las variables de respuesta era el PAC.

Mediante una comparación de los resultados obtenidos en unidades de concentración, contra la resolución 4090 de 2017 de la CAR y la resolución la 0631 de 2015, se encuentra que la concentración de SST cumple en la totalidad de tratamientos con los dos coagulantes. Sin embargo, las concentraciones obtenidas con el coagulante PAC son menores a las obtenidas con el Sulfato de aluminio.

Recomendaciones

Se recomienda realizar una corrida en el test de jarras con la mejor combinación entre factores encontrada, donde se varíe la concentración de coagulante en un rango de 500 ppm a 1000 ppm con el fin de conocer las eficiencias de remoción.

Conocida la concentración de coagulante más eficiente, se recomienda realizar el ensayo de jarras variando la concentración de polímero en cada jarra para observar el comportamiento cuando se tienen diferentes dosis de floculante

Es recomendable aplicar los resultados obtenidos en la prueba piloto a escala de planta, con el fin de observar la eficiencia del sistema.

Se recomienda realizar el ensayo en planta con un ajuste de pH a 7 unidades con el policloruro de aluminio, ya que durante el ensayo preliminar se obtuvieron eficiencias de remoción mayores a las obtenidas en los demás casos.

Referencias Bibliográficas

Acosta, Y. L. (2006). Estado del arte del tratamiento de aguas por coagulación-floculación.

ICIDCA : Sobre Los Derivados de La Caña de Azúcar, 40(2), 10–17.

<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223120664002>

Agudelo, R. (2009). siglo XXI Water : strategic resource in the 21 st century. *Revista Facultad*

Nacional de Salud Pública, MEDELLIN, COLOMBIA, 23, 91–102.

<https://revistas.udea.edu.co/index.php/fnsp/article/view/522>

Ancasi, J. C. (2019). *Dosificación De Coagulantes Y Floculantes Para La Remoción De*

Sedimentos Del Agua En El Embalse Cuchoquesera ,Ayacucho [tesis de magister,

Universidad Nacional Agraria La Molina].

<http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/4158>

Andía, Y. (2000). Tratamiento de agua coagulación y floculación. *SEDAPAL, Evaluación de*

Plantas y Desarrollo Tecnológico.

[http://www.sedapal.com.pe/c/document_library/get_file?uuid=2792d3e3-59b7-4b9e-ae55-](http://www.sedapal.com.pe/c/document_library/get_file?uuid=2792d3e3-59b7-4b9e-ae55-56209841d9b8&groupId=10154)

[56209841d9b8&groupId=10154](http://www.sedapal.com.pe/c/document_library/get_file?uuid=2792d3e3-59b7-4b9e-ae55-56209841d9b8&groupId=10154)

Armaignac, O., & Cortón, H. (2009). Tratamiento por electrocoagulación y coagulación -

floculación de la vinaza de destilerías. *Revista Tecnología Química*, XXIX, 153–161.

<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=445543761019>

Bernal, L, L., Solís, C., Linares, I., Barrera, C., & Colín, A. (2011). Tratamiento De Agua

Residual Municipal Por Un Sistema Municipal Wastewater Treatment By Physicochemical

and Chemical. *Avances En Ciencias e Ingeniería*, 2(2), 69–81.

<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3678957>

Betancur, B., Jiménez, D., & Linares, G. (2012). Zeta potential (ζ) as a criterion for optimization of coagulant dosage in a drinking water treatment plant. *Dyna*, 79(175), 166–172.

<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49624958021>

Blanco, F., & De la Torre. (2017). Los recursos hídricos. *Cuadernos de Estrategia*, 186, 21–70.

<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6115629>

Cabrera, X., Fleites, M., & Contreras, A. (2009). Estudio Del Proceso De Coagulación-Floculación De Aguas Residuales De La Empresa Textil “Desembarco Del Granma” a Escala De Laboratorio. *Tecnología Química*, XXIX(3), 64–73.

<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=445543760009>

Cogollo, J. M. (2011). Clarificación de aguas usando coagulantes polimerizados: Caso del hidroxiclورو de aluminio. *DYNA*, Revista de La Facultad de Minas, 78(165), 18–27.

<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7761289>

Colombia Leyes y Decretos. (1984). *Decreto - Ley 1594 de 1984. Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9 de 1979, así- como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II y el Título III de la Parte III -Libro I- del Decreto - Ley 2811 de 1974 en cuanto a usos d* (No. 1594). Colombia. Leyes y Decretos.

https://oab.ambientebogota.gov.co/?post_type=dlm_download&p=3841

Constituyente, A. N. (1991). *Constitución Política de la República de Colombia*. Sistema Unico.

<https://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?ruta=Constitucion/1687988>

Dearmas Duarte, D., & Ramírez Hernández, L. F. (2015). Remoción de nutrientes mediante coagulantes naturales y químicos en planta de tratamiento de aguas residuales, Valledupar Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 6(2), 183.

<https://doi.org/10.22490/21456453.1415>

- Del Valle, J. (2017). El agua, un recurso cada vez más estratégico. In *Cuadernos de estrategia*.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6115630>
- Díaz Díaz, M. A., Rivas, T. L., Salazar, A. D., Teuteló, N. R., La Maza, P. N., & Sosa, M. C. (2019). Evaluación de tratamiento químico para aguas residuales provenientes de la elaboración de productos cárnicos. *Revista Centro Azúcar*, 46, 114–119.
http://centroazucar.uclv.edu.cu/index.php/centro_azucar/article/view/193%0A
- Díaz, J. N. (2016). *Coagulantes-floculantes orgánicos e inorgánicos elaborados de plantas y del reciclaje de la chatarra, para el tratamiento de aguas contaminadas* [tesis de maestría, Universidad Pedagógica Nacional Francisco Morazán].
<http://www.cervantesvirtual.com/nd/ark:/59851/bmch1516>
- Duran, Z., Roa, R., Coronel, D., & Alvarado, A. (2017). Análisis del proceso de coagulación de un agua residual usando un coagulante natural y un coagulante químico. *Documentos de Trabajo ECAPMA*, 2.
<https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/workpaper/article/view/1821/2034>
- Eliet, L., Llanes, J., Fernández, L., & Bataller, M. (2010). Evaluación de la eficiencia de los procesos de coagulación-floculación y ozonización a escala de laboratorio en el tratamiento de aguas residuales municipales. *Revista CENIC. Ciencias Químicas*, 41(1), 49–56.
<http://eds.b.ebscohost.com/bibliotecavirtual.unad.edu.co/eds/pdfviewer/pdfviewer?vid=20&sid=97f05d74-a217-49fa-a260-0c616a34aa4a%40sessionmgr103>
- Flórez, G., López, M., & Mannbash, L. (2016). Removal of total organic matter in municipal wastewater from coagulation-flocculation processes. *Revista Internacional de Investigación y Docencia*, 1, 33–39. <https://doi.org/10.19239/riidv1n4p33>
- Franco, F., & Carro, M. E. (2014). Remoción de arsénico en agua mediante procesos de

- coagulación – floculación. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 30(2), 177–190. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=37030754005>
- Fúquene, D., & Yate, A. (2018). Ensayo de jarras para el control del proceso de coagulación en el tratamiento de aguas residuales industriales. *Documentos de Trabajo ECAPMA*, 0(1), 1–7. <http://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/workpaper/article/view/2771/2857>
- Gilpavas, E., Arbeláez, P., Medina, J., & Gómez, C. (2018). Tratamiento de aguas residuales de la industria textil mediante coagulación química acoplada a procesos fentón intensificado con ultrasonido de baja frecuencia. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 34(1), 157–161. <https://doi.org/10.20937/RICA.2018.34.01.14>
- González, Y., & Falcón, J. (2013). Empleo de floculantes inorgánicos en el tratamiento de efluentes lácteos Toma de muestras y características medias. *Revista Tecnología Química*, 2, 126–133. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=445543779004>
- Ministerio de Ambiente, V. y D. T. (2010). *Decreto 3930 de 2010. Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9ª de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II del Decreto-ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposici.* http://observatorio.epacartagena.gov.co/wp-content/uploads/2016/11/dec_3930-2010_reglamenta_agua_y_residuos_liquidos.pdf
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (1974). *Decreto 2811 del 18 de Diciembre de 1974. Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección del Medio Ambiente.* <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/Decreto-2811-de-1974.pdf>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). *Resolución 0631 de 2015. Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos*

puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones. <https://www.rds.org.co/es/recursos/resolucion-631-de-2015-parametros-vertimientos>

Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo. (2014). *Guía Técnica para la formulación de los POMCAS.* <http://orarbo.gov.co/es/el-observatorio-y-los-municipios/guia-tecnica-para-la-formulacion-de-los-planes-de-ordenacion-y-manejo-de-cuencas-hidrograficas-pomcas>

Ministerio de Salud. (1979). *Ley 09 de 1979. Por la cual se dictan medidas sanitarias.* https://www.minsalud.gov.co/Normatividad_Nuevo/LEY_0009_DE_1979.pdf

Mohammadi, I., & Alireza, S. (2017). Study on the combined coagulation-flocculation method in wastewater treatment of raisin factory. *Revista QUID, Investigación, Ciencia y Tecnología*, 2(1), 605–611. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6131589>

OMS. (2019). *Agua, datos y cifras.* <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>

Ordóñez, R. V. A., Palacios Limones, C. E., López Vargas, A. F., & Suárez Escobar, I. E. (2020). Optimización del sistema de tratamiento fisicoquímico de una estación depuradora de aguas residuales de bebidas gaseosas. *Revista Industrial Data*, 22(2), 199–212. <https://doi.org/10.15381/idata.v22i2.16291>

Osorio, rivera M. A., Carrillo barahona, W. E., Loo lalvay, X. A., & Riera guachichullca, E. J. (2021). A qualidade das águas residuais domésticas. *Polo Del Conocimiento, Revista Científico - Profesional*, 6(3), 228–245. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7926905>

Paula, H. M. de, & Fernandes, C. E. (2018). Otimização do tratamento de água cinza a partir do uso combinado de coagulantes químicos. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 23(5), 951–

961. <https://doi.org/10.1590/s1413-41522018169155>

- Ramírez, L., & Sierra, L. (2018). Evaluation of Chemical Coagulants in the Removal of Suspended Solids, Chemical Oxygen and algae in the Salguero pond system. *Revista Tecciencia*, 13(24), 58–62. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6331054>
- Ramírez, Moreno D, A., Martínez B, A., & Orta, de Velásquez, M. . T. (1995). Proceso De Coagulación-Floculación Para El Tratamiento De Aguas Residuales: Desarrollo Y Utilización De Nuevos Compuestos Para La Reducción De Lodos. *Unam*, 1–10. <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/tratagua/mexicon/R-0199.pdf>
- Restrepo, H. (2009). Evaluación Del Proceso De Coagulación-Floculación De Una Planta De Tratamiento De Agua Potable [Tesis de pregrado, Universidad Nacional De Colombia]. In *universidad Nacional De Colombia*. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/2561>
- Rivas, S., Menés, G., & Rómulo, A. (2017). Tratamiento por coagulación-floculación a efluente de la Empresa del Níquel Comandante Ernesto Che Guevara. *Revista Tecnología Química*, 37(2), 19173–19183. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2224-61852017000200002&lng=es&nrm=iso
- Rodriguez Diaz, Y. J., Torregroza Mozo, A. A., Mejía Padilla, F., Atencia, J. J., & Villero, A. C. (2019). Eficiencia de la aplicación de policloruro de aluminio en post-tratamiento de aguas industriales en palma de aceite. *Temas Agrarios*, 24(2), 158–169. <https://doi.org/10.21897/rta.v24i2.2068>
- Rojas, R. (2002). Conferencia Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales. In *Gestion Integrarla De Tratamiento De Aguas Residuales*. <https://docplayer.es/11882686-Conferencia-sistemas-de-tratamiento-de-aguas-residuales.html>
- Romero, Z. L. E. (2001). Caracterización de las aguas residuales. In IWA publishing (Ed.),

Traamiento biológico de aguas residuales. <https://doi.org/10.17345/9788484241027>

Salas, C. (2003). Tratamiento Físico Químico de Aguas Residuales de la Industria Textil. *Revista de Química e Ingeniería Química*, 5(2), 73–80.

<https://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/quim/article/view/5078/4163>

Trujillo, D., Duque, L. F., Arcila, J. S., Rincón, A., Pacheco, S., & Herrera, O. F. (2014).

Remoción de turbiedad en agua de una fuente natural mediante coagulación/floculación usando almidón de plátano. *Revista Ion*, 27(1), 17–34.

http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-100X2014000100003&lang=es

Yagual, M., & Torres, F. (2013). Análisis comparativo del proceso de floculación – coagulación en la potabilización de agua de río, usando como fuente de captación del río Daule y el río Babahoyo en la provincia de Guayas [Tesis de grado, Instituto De Ciencias Químicas y Ambientales]. In *Repositorio Espol*.

<http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/24143>

Yanza, L. J., Rivera, H. R., Gómez, T. L., & Zafra, M. C. (2019). Evaluación de FeCl₃ y PAC para la potabilización de agua con alto contenido de color y baja turbiedad. *Tecnológicas*, 22(45), 9–21. <https://doi.org/10.22430/22565337.1085>