

UCUENCA

Universidad de Cuenca

Facultad de Ciencias Químicas

Carrera de Ingeniería Química

Dosificación del coagulante policloruro de aluminio (coagulante) - polímero aniónico (floculante) como sustituto del sulfato de aluminio en la planta de tratamiento de agua potable de Tixán


Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Químico

Autor:

David Sebastián Vásquez Saavedra

Director:

Marittza Eleanor Flores Zamora

ORCID:  0000-0001-9754-4538

Cuenca, Ecuador

2023-11-06

Resumen

El estudio se llevó a cabo en la Planta de Tratamiento de Agua Potable "Tixán" en Cuenca, con el objetivo de reemplazar el sulfato de aluminio por el policloruro de aluminio (PAC) como coagulante debido a su mayor eficiencia en la eliminación de turbidez, menor aluminio residual y un mayor rango de trabajo del pH. El objetivo principal es establecer la dosis óptima de PAC como coagulante para cumplir con los parámetros de color, pH y turbiedad de acuerdo con la norma establecida. Inicialmente, se estableció una dosis fija de un floculante polímero aniónico a base de poliacrilamida (PA) mediante pruebas de jarras, seguido de experimentos con el coagulante PAC. Se recolectaron muestras de agua de la planta en los meses de marzo, abril, mayo y junio de 2023. Se realizaron 11 ensayos para evaluar diversas cantidades de PAC (10, 15, 20, 25, 30 y 35 ppm) y determinar cuál lograba la mayor remoción de turbidez en el agua cruda. Los resultados de los 11 ensayos indicaron que las dosis óptimas de PAC se situaron entre 15 y 25 ppm, cumpliendo con los estándares establecidos para turbidez, color y pH según la Norma NTE INEN 1108:2020. Estos datos permitieron obtener una curva de dosificación óptima, que seguía una regresión logarítmica con un coeficiente de determinación del 0.6575. Además, se identificó que los parámetros más significativos para el porcentaje de remoción de turbidez eran la turbidez inicial y la dosis de PAC aplicada. La metodología de superficie de respuesta confirmó que a medida que la turbidez del agua cruda aumenta, se obtiene un porcentaje de remoción más elevado y la dosis de PAC también aumenta, pero siempre manteniéndose en el rango de 15 a 25 ppm.

Palabras clave: *dosis óptima, policloruro de aluminio, remoción de turbidez, tratamiento de agua, prueba de jarras*



El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Cuenca ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por la propiedad intelectual y los derechos de autor.

Repositorio Institucional: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

Abstract

This study was conducted at the "Tixán" Drinking Water Treatment Plant in Cuenca, with the objective of substituting aluminum sulfate with poly aluminum chloride (PAC) as a coagulant due to its enhanced efficiency in turbidity removal, reduced residual aluminum content, and a broader pH operational range. The primary goal is to determine the optimal PAC dosage as a coagulant to meet color, pH, and turbidity parameters in accordance with established standards. Initially, a fixed dosage of an anionic polyacrylamide-based (PA) flocculant was determined through jar tests, followed by experiments involving the PAC coagulant. Water samples were collected from the plant during the months of March, April, May and June 2023. Eleven trials were conducted to evaluate various amounts of PAC (10, 15, 20, 25, 30, and 35 ppm) and determine which achieved the highest turbidity removal in raw water.

The results from 11 trials indicated that the optimal PAC dosages fell within the range of 15 to 25 ppm, aligning with the prescribed standards for turbidity, color, and pH as per the NTE INEN 1108:2020 Standard. These findings enabled the development of an optimal dosing curve, following a logarithmic regression model with a coefficient of determination of 65.75%. Additionally, it was determined that the most influential parameters affecting turbidity removal percentage were the initial turbidity level and the applied PAC dosage. Response surface methodology confirmed that as raw water turbidity increases, higher removal percentages are achieved, and the PAC dosage also increases, consistently staying within the 15 to 25 ppm range.

Keywords: *optimal dose, poly aluminum chloride, turbidity removal, water treatment, jar test*



The content of this work corresponds to the right of expression of the authors and does not compromise the institutional thinking of the University of Cuenca, nor does it release its responsibility before third parties. The authors assume responsibility for the intellectual property and copyrights.

Institutional Repository: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

Lista de Abreviaturas

MRS: Metodología de Superficie de Respuesta

NTU: Unidad nefelométrica de turbiedad

ODS: Objetivo de Desarrollo Sostenible

PAC: Policloruro de Aluminio

PA: Polímero Aniónico

RPM: Revoluciones por minuto

PPM: Partes por millón

UC: Unidades de color platino-cobalto

Índice de contenido

Portada.....	1
Resumen.....	2
Abstract.....	3
Capítulo I.....	14
1.1. Introducción	14
1.1.1. Antecedentes	14
1.1.2. Problemática	15
1.1.3. Justificación.....	15
1.2. Objetivos.....	17
1.2.1. Objetivo General	17
1.2.2. Objetivos específicos	17
Capítulo II.....	18
2. Marco Teórico.....	18
2.1. Agua potable tratada	18
2.1.1. Objetivo de desarrollo sostenible (ODS)	18
2.1.2. Características fisicoquímicas del agua	18
2.1.3. Tratamiento de agua potable	19
2.2. Partículas en suspensión	20
2.2.1. Remoción de las partículas en suspensión	20
2.3. La coagulación-floculación	21
2.3.1. Dosificación óptima.....	21
2.4. Teoría de la coagulación	22
2.4.1. Doble capa eléctrica.....	22
2.4.2. Adsorción y neutralización de la carga de la partícula	23
2.4.3. Adsorción y puente entre partículas	24
2.4.4. Enredamiento de partículas en el precipitado	24
2.5. Teoría de la floculación	25
2.5.1. Floculación Ortocinética.....	25
2.5.2. Floculación Pericinética	26
2.6. Factores que influyen en la coagulación-floculación	26
2.6.1. Concentración de coloides.....	26

2.6.2.	Importancia de la cantidad de coagulante suministrada	26
2.6.3.	Sobre coagulación	27
2.6.4.	Afinidad de los coloides por el agua	27
2.6.5.	Valor de pH.....	28
2.6.6.	Cationes y aniones en solución	28
2.6.7.	Temperatura.....	28
2.7.	Prueba de Jarras	28
2.8.	Reactivos.....	29
2.8.1.	Policloruro de aluminio	29
2.8.2.	Polímero Aniónico	30
2.9.	Métodos y herramientas estadísticas.....	30
2.9.1.	Análisis de regresión	30
2.9.2.	Calidad del ajuste de la regresión	31
2.10.	Análisis multivariado	31
2.10.1.	Regresión lineal multivariado	32
2.10.2.	Selección de los mejores predictores	32
2.11.	Metodología de superficie de respuesta (MSR).....	32
2.11.1.	Modelos.....	32
Capítulo III	.....	34
3.	Metodología	34
3.1.	Muestreo.....	34
3.2.	Preparación de la muestra	34
3.3.	Preparación de reactivos.....	35
3.3.1.	Coagulante (Policloruro de Aluminio)	35
3.3.2.	Floculante (Polímero Aniónico).....	35
3.4.	Procedimiento de los ensayos	36
Capítulo IV	.....	37
4.	Resultados y discusión	37
4.1.	Determinación de la dosis óptima de floculante polímero aniónico	37
4.2.	Determinación de la dosis óptima del coagulante policloruro de aluminio.....	37
4.3.	Construcción de las curvas de dosificación óptima del policloruro de aluminio	41
4.4.	Pruebas estadísticas para evaluar el modelo	45

4.4.1.	Significancia de los coeficientes de regresión.....	45
4.4.2.	Prueba de la normalidad.....	45
4.4.3.	Detección de datos atípicos.....	45
4.4.4.	Ecuación de la curva de dosificación de coagulante.....	47
4.5.	Comportamiento del pH con la dosificación de PAC.....	48
4.5.1.	Rango óptimo de pH en relación con la dosificación de PAC.....	49
4.6.	Regresión multivariada.....	50
4.6.1.	Selección de los mejores predictores.....	50
4.6.2.	Significancia de las variables independientes.....	51
4.6.3.	Optimización del modelo de regresión multivariada.....	52
4.7.	Metodología de superficie de respuesta.....	55
4.7.1.	Creación del diseño de superficie de respuesta.....	55
4.7.2.	Resultados del modelo.....	55
4.7.3.	Gráfica de Superficie de respuesta.....	56
Capítulo V	.....	58
5.	Conclusión y recomendaciones.....	58
5.1.	Conclusiones.....	58
5.2.	Recomendaciones.....	60
Referencias	.....	62
Anexos	.....	66
Anexo A:	Tablas de resultados de las pruebas de jarras para el PA.....	66
Anexo B:	Tablas de resultados de las pruebas de jarras para el PAC.....	68
Anexo C:	Informes estadísticos adicionales de los softwares utilizados.....	74
Anexo D:	Materiales, equipos y reactivos.....	76
Anexo E:	Fichas técnicas de los reactivos utilizados.....	80
Anexo F:	Fotografías de ensayos de la prueba de jarras.....	84
Anexo G:	Fotografías de la Planta Potabilizadora de Agua de Tixán.....	91
Anexo H:	Autorizaciones para el uso de laboratorios y equipos.....	92
Anexo I:	Pasos para el desarrollo de los ensayos o pruebas de jarras.....	94

Índice de figuras

Figura 1. Proceso de coagulación-floculación en el tratamiento de agua potable.....	19
Figura 2. Doble capa y potencial zeta.	23
Figura 3. Mecanismo de absorción y neutralización de carga.....	24
Figura 4. Mecanismo de puente entre partículas.....	24
Figura 5. Mecanismo de coagulación por barrido.	25
Figura 6. Zonas de proceso de coagulación-floculación.	27
Figura 7. Comparación entre la turbiedad del agua cruda con la turbiedad después de cada uno de los ensayos.	39
Figura 8. Representación de la remoción de la turbiedad en función de la dosificación de coagulante para cada ensayo.	40
Figura 9. Representación de la dosis óptima en relación con el porcentaje de remoción de cada ensayo.....	41
Figura 10. Gráfica de dispersión de la dosificación óptima.	42
Figura 11. Ajuste de regresión lineal.	43
Figura 12. Ajuste de regresión de sexto grado.	44
Figura 13. Ajuste de regresión logarítmica.....	45
Figura 14. Gráfica de caja y bigotes.....	46
Figura 15. Gráfica de la distancia de Cook	46
Figura 16. Correlación entre el pH final y la dosis de PAC de los primeros 4 ensayos.	48
Figura 17. Gráfica 1 de superficie para el modelo de regresión multivariada.	54
Figura 18. Gráfica 2 de superficie para el modelo de regresión multivariada.	54
Figura 19. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados.	56
Figura 20. Gráfica 1 de superficie de respuesta de la interacción entre el % de remoción de turbiedad vs la T_0 ; D.....	57
Figura 21. Gráfica 2 de superficie de respuesta de la interacción entre el % de remoción de turbiedad vs la T_0 ; D.....	57
Figura 22. Envase de 20 litros.....	76
Figura 23. Policloruro de aluminio.....	77
Figura 24. Poliacrilamida Aniónica.	77
Figura 25. Equipo de Jarras.	78
Figura 26. Potenciómetro.	78
Figura 27. Balanza Analítica.....	78

Figura 28. Turbidímetro.	78
Figura 29. Colorímetro.	78
Figura 30. Agitador Magnético.	79
Figura 31. Ficha técnica del policloruro de aluminio (Página 1).	80
Figura 32. Ficha técnica del policloruro de aluminio (Página 2).	81
Figura 33. Ficha técnica del polímero aniónico (Página 1).	82
Figura 34. Ficha técnica del polímero aniónico (Página 2).	83
Figura 35. Pruebas de jarras usando el polímero aniónico (PA) con concentraciones de 1.25 y 1.5 ppm con duplicado.	84
Figura 36. Prueba de jarras en proceso del coagulante PAC con concentraciones de 10 y 15 ppm con duplicado.	85
Figura 37. Flóculos sedimentados después de la prueba de jarras con concentraciones de 10 y 15 ppm de coagulante PAC con duplicado.	86
Figura 38. Prueba de jarras en proceso del coagulante PAC con concentraciones de 20 y 25 ppm con duplicado.	87
Figura 39. Flóculos sedimentados después de la prueba de jarras con concentraciones de 20 y 25 ppm de coagulante PAC con duplicado.	88
Figura 40. Prueba de jarras en proceso del coagulante PAC con concentraciones de 30 y 35 ppm con duplicado.	89
Figura 41. Flóculos sedimentados después de la prueba de jarras con concentraciones de 30 y 35 ppm de coagulante PAC con duplicado.	90
Figura 42. Entrada del agua cruda del río Machángara a la Planta de Tixán.	91
Figura 43. Punto de recolección de muestras de agua cruda en la planta de Tixán.	91
Figura 44. Autorización para el uso del laboratorio de Bromatología y sus equipos.	92
Figura 45. Autorización para el uso del laboratorio de Suelos y sus equipos.	93

Índice de tablas

Tabla 1. Resultados de la remoción de turbiedad con la dosis óptima de PA (floculante) en cada ensayo.....	37
Tabla 2. Resultados de la remoción de turbiedad con la dosis óptima de PAC (coagulante) en cada ensayo.....	38
Tabla 3. Comparación de dosificaciones óptimas de PAC.....	47
Tabla 4. Comparación del pH antes y después de los ensayos de dosificación.	49
Tabla 5. Evaluación de la calidad del modelo de Stepwise.	51
Tabla 6. p-value de cada parámetro del modelo de regresión multivariada.	52
Tabla 7. Coeficientes del modelo de regresión multivariado corregido.....	53
Tabla 8. Análisis de la varianza del modelo de superficie de respuesta.	55
Tabla 9. Resultados de la prueba de Jarras 1 para el floculante (PA).....	66
Tabla 10. Resultados de la prueba de Jarras 2 para el floculante (PA).....	67
Tabla 11. Resultados de la prueba de Jarras 1 para el coagulante (PAC).....	68
Tabla 12. Resultados de la prueba de Jarras 2 para el coagulante (PAC).....	68
Tabla 13. Resultados de la prueba de Jarras 3 para el coagulante (PAC).....	69
Tabla 14. Resultados de la prueba de Jarras 4 para el coagulante (PAC).....	69
Tabla 15. Resultados de la prueba de Jarras 5 para el coagulante (PAC).....	70
Tabla 16. Resultados de la prueba de Jarras 6 para el coagulante (PAC).....	70
Tabla 17. Resultados de la prueba de Jarras 7 para el coagulante (PAC).....	71
Tabla 18. Resultados de la prueba de Jarras 8 para el coagulante (PAC).....	71
Tabla 19. Resultados de la prueba de Jarras 9 para el coagulante (PAC).....	72
Tabla 20. Resultados de la prueba de Jarras 10 para el coagulante (PAC).....	72
Tabla 21. Resultados de la prueba de Jarras 11 para el coagulante (PAC).....	73
Tabla 22. Informe de RStudio del modelo de regresión lineal de la curva de dosificación óptima de PAC.....	74
Tabla 23. Informe de RStudio del modelo de regresión polinómica de sexto grado de la curva de dosificación óptima de PAC.....	74
Tabla 24. Informe de RStudio del modelo de regresión logarítmica de la curva de dosificación óptima de PAC.....	75
Tabla 25. Varianza, coeficiente de determinación y coeficiente de determinación ajustado del modelo de superficie de respuesta.....	75
Tabla 26. Materiales utilizados en la investigación.....	76
Tabla 27. Reactivos utilizados en la investigación.....	77

Tabla 28. Equipos utilizados en la investigación..... 77

Agradecimientos

En la culminación de esta investigación y elaboración de la presente tesis, deseo expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas e instituciones que contribuyeron de manera significativa en este proceso, brindándome su apoyo, conocimientos y facilidades, y cuyo respaldo fue fundamental para alcanzar este logro académico.

En primer lugar, quiero agradecer a la Universidad de Cuenca, por brindarme la oportunidad de adquirir una formación sólida en el campo de la ingeniería química. El ambiente académico en esta prestigiosa institución ha sido inspirador y enriquecedor, proporcionándome las herramientas y conocimientos necesarios para llevar a cabo esta investigación.

Agradezco de manera especial a mi tutora de tesis, la Ingeniera Maritzza Flores, cuyo constante apoyo, orientación y paciencia fueron fundamentales para el desarrollo de este trabajo. Sus valiosas sugerencias, su dedicación y experiencia fueron una guía indispensable en cada etapa del proceso de investigación.

Asimismo, quiero expresar mi reconocimiento a la Planta de Potabilización de Agua de Tixán, por permitirme acceder a sus instalaciones y brindarme información relevante para mi investigación. Su colaboración y disposición fueron fundamentales para la recolección de datos y la comprensión del funcionamiento de la dosificación óptima del PAC en un contexto real.

Además, mi gratitud se extiende a la facultad de Ciencias Químicas que me brindaron acceso al Laboratorio de Suelos y Bromatología de la Universidad de Cuenca, por facilitarme la apertura a sus instalaciones y recursos, lo que permitió llevar a cabo los análisis necesarios para validar los resultados de este trabajo.

Finalmente, quiero agradecer a mi familia y amigos por su apoyo incondicional, su comprensión y motivación en los momentos de mayor exigencia durante este proceso. Sus palabras de aliento fueron un motor fundamental para mantenerme enfocado en el objetivo y superar los retos que surgieron en el camino. A todos ustedes, mi más sincero agradecimiento. Cada uno de ustedes ha dejado una huella imborrable en este proyecto, y su generosidad y colaboración han sido invaluable. Este logro no habría sido posible sin su apoyo, y me siento afortunado de contar con personas tan excepcionales en mi vida.

Dedicatoria

Esta tesis está dedicada con amor y gratitud a las personas que han sido mi mayor fuente de inspiración, apoyo y aliento a lo largo de este desafiante camino académico. Cada logro alcanzado en esta investigación ha sido posible gracias a su incondicional cariño y respaldo.

A mi familia, el pilar de mi vida, quiero dedicarles un agradecimiento especial. A ti, mamá, por ser mi mayor ejemplo de fortaleza y sacrificio. Tu incansable apoyo y confianza en mí me han impulsado a superar cada obstáculo con determinación. A mis queridas hermanas menores, por ser mis cómplices, confidentes y por llenar mi vida de alegría con su inquebrantable amor. Gracias por comprender mis ausencias y por celebrar cada logro con una sonrisa llena de orgullo.

Pero también quiero mirar hacia adentro y dedicarme a mí mismo una parte de este logro. Agradezco mi propia voluntad y esfuerzo, que me han permitido perseverar incluso cuando las dificultades parecían insuperables. Cada hora de estudio, cada análisis y cada decisión tomada, han sido el fruto de mi dedicación y pasión por la ingeniería química. Reconozco el coraje y la determinación que he cultivado, y me siento orgulloso de los límites que he sido capaz de traspasar.

En el vasto y misterioso universo de la astrofísica, he aprendido que las fuerzas gravitatorias entre los cuerpos celestes pueden ser tan sutiles y poderosas como las fuerzas invisibles que unen los corazones humanos. Así como la luz de las estrellas atraviesa el espacio para llegar a nuestros ojos, tu influencia ilumina mi camino y me inspira a explorar nuevos horizontes.

¡Gracias por ser mi motivación y mi fuerza en cada etapa de esta emocionante travesía!

Capítulo I

1. Introducción y objetivos

1.1. Introducción

1.1.1. Antecedentes

La planta de tratamiento de agua potable Tixán pertenece a la empresa ETAPA EP, esta se ubica en la ciudad de Cuenca en la parroquia de Chiquintad, al margen izquierdo del río Machángara, de donde se obtiene el agua cruda. Consta de dos módulos con una capacidad máxima de caudal de 1940 L/s. Con estos dos módulos pretende abastecer a la población de la ciudad de Cuenca hasta el 2045 (Abad Durán & Guaraca Vásquez, 2022).

El río Machángara presenta grandes fluctuaciones de caudal y de calidad a lo largo del año, ya que las condiciones climáticas hacen que los distintos parámetros del agua cruda fluctúen. Los datos que se obtienen de enero a diciembre del año 2015 (17516 registros) arrojan la existencia de un amplio rango en cuanto a la turbiedad, de 1.9 NTU a 4121 NTU, pero el 90% del tiempo se mantiene debajo de 11.4 NTU. El color tiene un rango de 24 UC a 1427 UC, en donde el 90% del tiempo se mantiene por debajo de 96 UC. También es importante mencionar que la turbiedad del agua cruda puede variar de manera abrupta el mismo día de registro debido a la presencia de precipitaciones. La temperatura a la que ingresa el agua cruda es de aproximadamente 15.82 °C (ETAPA EP, 2015).

Con respecto al pH, el parámetro varía entre 6.39 y 8.09, cerca del 95% del tiempo tiene un carácter básico y su percentil 50, tiene un pH de 7.74. En cuanto a la alcalinidad presenta una variación de 23.84 a 61.54 mg/L CaCO₃, en donde el 90% del tiempo tiene un valor por debajo de 41.66 mg/L CaCO₃. También es importante mencionar que el agua cruda contiene cierta cantidad de manganeso (ETAPA EP, 2015).

Dado que el propósito de este estudio es determinar la dosis óptima de PAC para sustituir al sulfato de aluminio, en el proceso de coagulación-floculación, estos datos proporcionan información relevante sobre los rangos y valores típicos de las variables, como la turbiedad y el color, en los cuales se llevarán a cabo los ensayos. Esto facilita la comprensión de los parámetros con los que se trabajará en el estudio. Además, proporciona los parámetros de trabajo del pH, demostrando que el uso del PAC es viable, ya que se mantiene dentro de los rangos de pH óptimos (entre 4 y 8).

Con los datos previos de la planta y considerando que se opera dentro de un rango de pH adecuado para el uso del PAC, este se toma como una alternativa que puede ayudar a la planta en un aspecto económico, mejorar el rendimiento y no perjudicar la salud de las personas que lo consumen.

1.1.2. Problemática

La Planta de tratamiento de Agua de Tixán, que utiliza sulfato de aluminio tiene el interés de usar como coagulante el policloruro de aluminio, ya que este ayuda a disminuir el gasto de un agente químico, como el hidróxido de calcio, para ajustar el pH del agua, ya que la adición de este coagulante tiene una muy ligera variación de la alcalinidad del agua, especialmente para dosis que dan una baja turbiedad (American Water Works Association, 2011; Sohrabi et al., 2018).

El sulfato de aluminio puede presentar la solubilización del aluminio el cual ha demostrado ser dañino para la salud humana, estudios demuestran que causa enfermedades como Alzheimer. La enfermedad de Alzheimer puede desarrollarse debido a una exposición gradual al aluminio presente en el agua potable, ya que se ha establecido una relación entre los niveles de aluminio en el agua y los casos de esta enfermedad (Matías Cervantez et al., 2018; Van Dyke et al., 2021). La OMS recomienda un límite máximo permisible de aluminio residual de 0.1 mg/l para grandes instalaciones y 0.2 mg/l para pequeñas (Krupińska, 2020). La principal presencia de aluminio en agua para el consumo humano se da en plantas de tratamiento en donde se utiliza como coagulante el sulfato de aluminio (Ospina Zúñiga & Cardona García, 2021).

Es muy común el uso de sulfato de aluminio como coagulante ya que es eficaz, rentable y de fácil obtención, pero este ha demostrado tener un menor rendimiento frente a otros coagulantes como el policloruro de aluminio (PAC). El PAC ha demostrado ser mejor con respecto a parámetros usuales en el tratamiento de agua, como en la demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales (SST), sólidos suspendidos volátiles (SSV) y turbidez (Díaz Mejía et al., 2017; Rodríguez-Díaz et al., 2019).

1.1.3. Justificación

La utilización de coagulantes de nueva generación como el policloruro de aluminio hacen que estos riesgos para la salud humana se minimicen ya que son más efectivos y tienen un menor riesgo de solubilización de aluminio en el agua tratada (Matías Cervantez et al., 2018).

Muchas plantas de tratamiento e industrias buscan el punto óptimo de dosificación de este, el cual es el punto en donde se tiene mayor eficiencia de los diferentes parámetros y menor cantidad de policloruro de aluminio agregado. Es por esto por lo que se recurre a un estudio que pueda encontrar este punto óptimo y así reducir costos en materiales que se utilicen para la operación de coagulación-floculación, reducir el impacto ambiental debido al uso de agentes químicos para el tratamiento y evitar que se añada una cantidad alta que pueda perjudicar a la salud humana o a la fauna.

En la planta de tratamiento de agua potable de Tixán el agua cruda proviene del río Machángara. El proceso de convertir agua en potable puede enfrentar varios desafíos, ya que estas fuentes de agua pueden contener compuestos orgánicos e inorgánicos perjudiciales para la salud, sólidos que incrementan la turbidez y microorganismos que pueden causar enfermedades. Por lo tanto, es crucial someter estas aguas a un tratamiento adecuado para que sean seguras y aptas para el consumo humano. (Abad Durán & Guaraca Vásquez, 2022).

El tratamiento primario del agua involucra un proceso de coagulación-floculación, el cual es de vital importancia, ya que su eficacia influye directamente en el éxito de los tratamientos subsiguientes para obtener agua potable de calidad. Este proceso se lleva a cabo después de eliminar los sólidos más grandes mediante un proceso de cribado. Si este proceso no es eficiente, quedan numerosos sólidos en suspensión, lo que dificulta los pasos posteriores, como la sedimentación y la filtración. Las partículas no se asientan en el fondo como deberían, y durante la filtración, las partículas que podrían haberse sedimentado previamente logran pasar a través del filtro (Wei Sheng et al., 2023).

Cuando se agrega la cantidad óptima de PAC, los niveles de pH en el agua se mantienen dentro de un rango adecuado, evitando así la necesidad de añadir más productos químicos para su neutralización. Entonces, a pesar de que el sulfato de aluminio pueda ser más económico en términos de costo inicial, la ventaja de evitar ajustes adicionales después de la coagulación-floculación al usar PAC hace que ambos métodos sean igualmente rentables. Además, la cantidad de PAC necesaria es menor, lo que reduce aún más el gasto económico. Por lo que se desea trabajar con el PAC debido a su mayor eficacia de separación, un rango superior de trabajo de pH y tiene una menor sensibilidad a las bajas temperaturas (Díaz Mejía et al., 2017; Rodríguez-Díaz et al., 2019).

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Determinar la dosis óptima de policloruro de aluminio para el proceso de coagulación en la planta de tratamiento de agua potable de “Tixán” mediante pruebas de laboratorio en función de la turbiedad, color y pH.

1.2.2. Objetivos específicos

Determinar una dosis adecuada de polímero aniónico como floculante, para posteriormente trabajar con las diferentes dosis de policloruro de aluminio como coagulante, en función de la remoción de turbidez del agua cruda.

Realizar pruebas de jarras en distintas turbiedades de agua cruda empleando el Policloruro de Aluminio como coagulante.

Obtener los resultados mediante curvas de dosificación de coagulante determinando la dosis óptima de policloruro de aluminio y la relación con los parámetros analizados.

Capítulo II

2. Marco Teórico

2.1. Agua potable tratada

El agua, siendo un nutriente esencial para la vida y el elemento más prevalente en nuestro organismo, desempeña un papel crucial en la regulación de numerosos procesos bioquímicos que son característicos de las células vivas. Investigaciones clínicas han demostrado en general que mantener una hidratación adecuada conlleva beneficios, mientras que los desequilibrios en la hidratación pueden tener efectos perjudiciales (Salas Salvadó et al., 2020). Es por eso por lo que el acceso al agua potable tratada es esencial para la salud pública y calidad de vida.

2.1.1. Objetivo de desarrollo sostenible (ODS)

El sexto objetivo del desarrollo sostenible (ODS 6), parte de la Agenda 2030 de las Naciones Unidas, se enfoca en "Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos". Su principal objetivo es lograr el acceso universal al agua potable y a servicios de saneamiento. Un aspecto crucial de este objetivo es mejorar la calidad del agua, lo cual es fundamental para la salud, la dignidad y el desarrollo sostenible. Esto se relaciona con el uso de coagulantes como el PAC en el tratamiento del agua, ya que el PAC ayuda a eliminar impurezas y mejorar la calidad del agua. Además, el ODS 6 promueve la gestión sostenible del agua, la eficiencia en su uso y la cooperación internacional, aspectos en los que el uso adecuado del PAC es esencial para alcanzar estos objetivos de manera efectiva (Organización de las Naciones Unidas, 2023).

2.1.2. Características fisicoquímicas del agua

Las características fisicoquímicas del agua son fundamentales para su distribución a la población, por lo que es importante tener en cuenta ciertos conceptos (Buitrago León et al., 2015):

- **Turbidez:** Es un aspecto estético del agua, que puede ser medido por la falta de luz o transparencia causado por partículas sólidas en suspensión. Se mide en unidad nefelométrica (NTU) y el equipo empleado es el Turbidímetro.
- **Color:** Presencia de partículas sólidas ya sean orgánicas e inorgánicas de un tamaño coloidal (1 nm a 1 µm). Se mide en unidades de platino cobalto (UPC) y el equipo empleado es el colorímetro.

- pH:** Es la medida universal de la acidez o basicidad del agua, su escala va del 1 al 14, en donde si es menor a 7 es ácida, mayor a 7 es alcalina y si es igual a 7 es neutra. El equipo empleado es el potenciómetro.

2.1.3. Tratamiento de agua potable

Una planta de tratamiento de agua utiliza procesos fisicoquímicos, mecánicos y biológicos para eliminar cualquier característica no deseada, convirtiendo el agua cruda en agua potable y dándole un valor agregado. Para esto las plantas de tratamiento de agua potable, como la de Tixán, llevan el agua cruda a diferentes operaciones unitarias que debe ser controladas de manera muy cuidadosa y buscando siempre el menor costo de producción. Durante el proceso de coagulación-floculación, no solo se eliminan la turbidez y el color del agua, sino que también se retiran algas, virus, organismos patógenos y ciertas sustancias que pueden causar sabores u olores indeseados (Buitrago León et al., 2015). El proceso coagulación-floculación en una planta de tratamiento de agua potable se describe en la Figura 1:

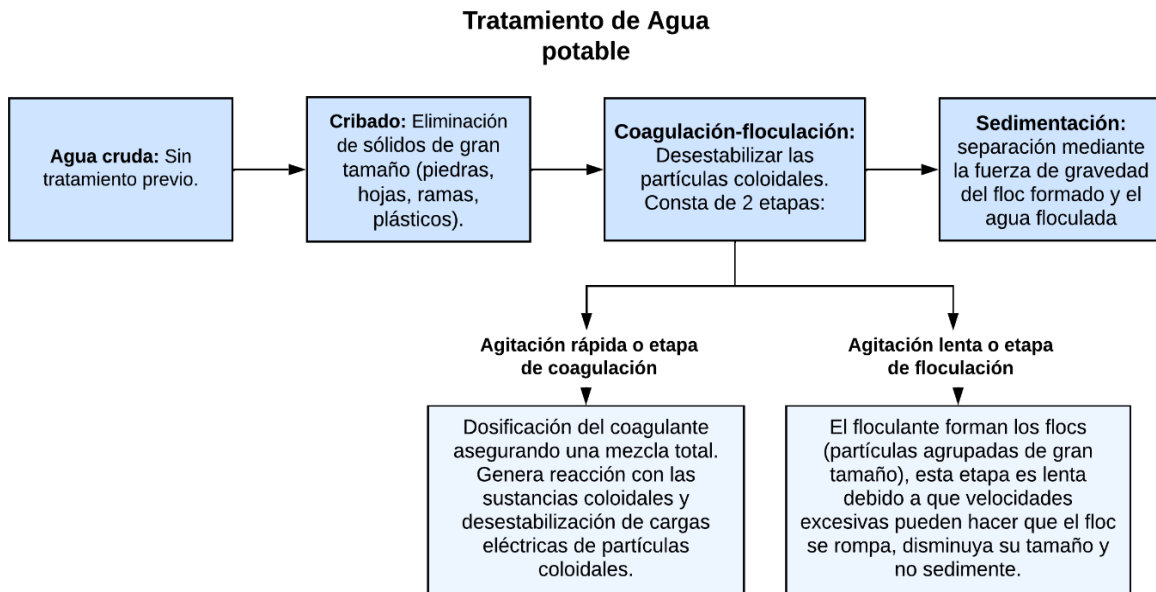


Figura 1. Proceso de coagulación-floculación en el tratamiento de agua potable.

Fuente: Autor.

Es importante diferenciar entre el proceso de coagulación y floculación, ya que a pesar de que estos van de la mano, es importante distinguir entre estos dos. La coagulación es la neutralización de carga de las partículas acondicionando la materia suspendida

(desestabilización de partículas) y la floculación es la agregación de las partículas desestabilizadas para formar partículas más grandes llamadas floc (partículas desestabilizadas chocan con otras y se aglomeran) (Bratby, 2016).

Este paso es de vital importancia, ya que la efectividad de este desencadenará en que los siguientes tratamientos tengan éxito o cumplan con la eficiencia necesaria. Este proceso es bastante rápido (fracciones de segundo) y depende mucho del pH del medio y de la concentración de coagulante (Díaz Mejía et al., 2017).

2.2. Partículas en suspensión

Las partículas pueden ser clasificadas como orgánicas, inorgánicas y biológicas, estas se depositan en el agua cruda (suministro de las plantas de tratamiento de agua potable) debido a procesos naturales o antrópicos y pueden ser clasificadas en tres categorías (American Water Works Association, 2011):

- En su mayoría las partículas orgánicas son el resultado de la degradación de materiales vegetales y animales. Esta materia orgánica también puede estar disuelta.
- La mayoría de las partículas inorgánicas en el agua natural son partículas minerales, por lo general estas partículas se derivan de la meteorización natural de los minerales (Calcitas, arcillas, óxidos de hierro y de aluminio) depositadas en el agua cruda debido a la erosión y la escorrentía.
- Partículas biológicas que son microorganismos como virus, bacterias y protozoos. Estas partículas ingresan al agua cruda debido a excrementos de animales, aguas residuales y algunos microorganismos pueden crecer y desarrollarse en el seno del agua. Cabe mencionar que algunos microorganismos están adheridos a las partículas en suspensión. Otro tipo de partícula biológica son las algas.

Las partículas en suspensión tienen naturaleza coloidal, es decir, que es un sistema en donde existe una fase fluida y una fase dispersa, esta fase dispersa se mantiene disuelta en el agua cruda en el caso del tratamiento de agua potable. No sedimentan por gravedad, por lo que se hace indispensable agregar un compuesto químico (coagulante y floculante) para poder extraer estas partículas (Junta de Castilla y León, 2016).

2.2.1. Remoción de las partículas en suspensión

La remoción de partículas en suspensión es importante debido a que las características organolépticas pueden ser alteradas, ya que estas pueden acarrear sabores, olores, colores, que son indeseables para el consumidor. Además, estas partículas pueden ser patógenas o tóxicas, por lo que su remoción también vela por la salud del usuario. En ocasiones, las partículas en suspensión protegen a los microorganismos de los desinfectantes, lo que reduce la eficiencia de la desinfección del agua, por lo que las operaciones necesarias para su eliminación son fundamentales para un correcto tratamiento del agua para su consumo (American Water Works Association, 2011).

2.3. La coagulación-floculación

El proceso de coagulación-floculación se emplea para lograr la remoción de turbiedad orgánica e inorgánica, la remoción del color verdadero y aparente, eliminación de sustancias productoras de sabor y olor, destrucción de algas y plancton, y la eliminación de bacterias, virus y organismos patógenos susceptibles a ser separados. Los coagulantes más utilizados son el sulfato de aluminio, cloruro y sulfato férricos. También se utilizan floculantes como polímeros catiónicos y aniónicos (Samaniego et al., 2020).

Coagulantes a base de aluminio y hierro como el cloruro férrico, sulfato de aluminio (Alumbre) y PAC generan hidróxidos metálicos cargados y disueltos, así como precipitados de hidróxidos metálicos en fase sólida (partículas de flóculos), estas reacciones reducen el pH del agua alcalina. Los coagulantes férricos y el alumbre disminuyen más el pH de lo que los hace el PAC, además el PAC es más soluble. El rango de pH y la solubilidad efectiva dependen de cada coagulante (Samaniego et al., 2020).

2.3.1. Dosificación óptima

La dosis óptima de coagulante es un parámetro fundamental en el tratamiento de agua potable para el consumo humano, esta busca precipitar la mayor cantidad de contaminantes antes mencionados, sin excederse de en una cantidad que no sea factiblemente económicamente, ya que su exceso puede afectar la calidad del agua o que pueda causar algún daño para la salud. Además, cantidades muy bajas de coagulante hacen que la formación de flóculos sea mínima ya que se impide la neutralización total de la carga del coloide, por el contrario, dosis muy altas del coagulante forma una gran cantidad de flóculos pequeños que tardan mucho tiempo en sedimentar ya que se invierte la carga de las partículas coloidales (Fúquene & Yate, 2018).

2.4. Teoría de la coagulación

Por lo general, los coloides en el agua están cargados negativamente, esto hace que se mantengan de una manera estable por las fuerzas electrostáticas. Esta fuerza de repulsión es mayor que la fuerza atractiva de Van der Waals, por lo que no se aglomeran y por lo tanto no precipitan. Es por esto por lo que es necesario alguna operación química que elimine esta repulsión y las partículas puedan ser eliminadas por simple sedimentación (American Water Works Association, 2011).

Los coagulantes se utilizan para contrarrestar las fuerzas electrostáticas y neutralizar la carga del coloide. Estos coagulantes suelen ser sales de aluminio o hierro, y los cationes trivalentes presentes en el aluminio o el hierro contrarrestan las cargas eléctricas negativas que normalmente rodean las partículas coloidales (Mackenzi, 2020).

El proceso de coagulación-floculación consta de etapas sucesivas. En primer lugar, se desestabiliza el coloide, lo que significa que se rompe su estabilidad. A continuación, se produce una colisión entre las partículas, lo que da lugar al crecimiento de microfloculos. Finalmente, estos microfloculos se agrupan para formar flóculos más grandes que pueden sedimentarse debido a su mayor peso. Cuando se forman los microfloculos, el agua alrededor de la partícula está clarificada, en caso contrario, se da a entender que todas las cargas de las partículas no han sido neutralizadas y por tanto la coagulación no se ha completado, por lo que se debe añadir más coagulante (Bratby, 2016; Mackenzi, 2020).

2.4.1. Doble capa eléctrica

En una suspensión coloidal, no puede existir un desequilibrio neto en la carga eléctrica total, lo que significa que en este sistema la carga eléctrica está neutralizada o compensada. La partícula coloidal está cargada negativamente y tiene una nube de iones de contrapeso (la "capa difusa") alrededor de la partícula. Dado que la partícula posee una carga negativa, los iones con una carga opuesta (positiva) en exceso se acumulan en su región interfacial. Estos iones positivos que se acumulan en la superficie, en conjunto con la carga principal, forman lo que se conoce como una doble capa eléctrica (Caviedes Rubio et al., 2015; Pabón et al., 2020).

- La capa difusa resulta de la atracción electrostática de iones de carga opuesta a la partícula ("contraiones"), la repulsión electrostática de iones de la misma carga que la partícula ("coiones").

- La difusión molecular que actúa contra los gradientes de concentración producidos por los efectos electrostáticos.

Las fuerzas de atracción (fuerzas de Van der Waals) existen entre todos los tipos de partículas, estas surgen de interacciones entre dipolos, ya sean permanentes o inducidos, en los átomos que componen las superficies de interacción y el agua. La magnitud de la energía atractiva de interacción disminuye al aumentar la distancia de separación, esto se representa mediante curvas en la Figura 2 (Ghernaout, 2020).

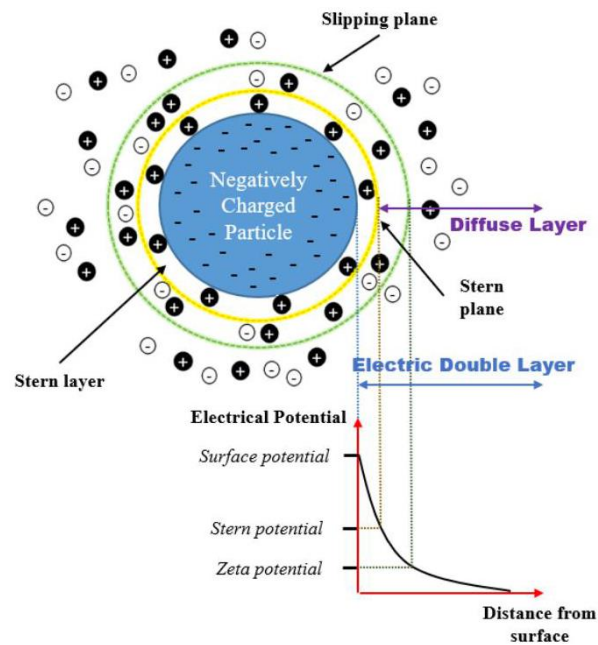


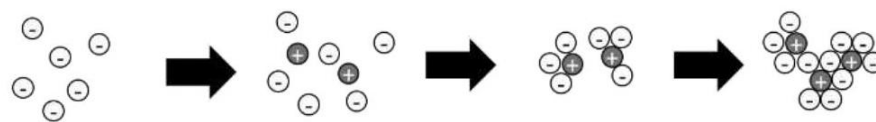
Figura 2. Doble capa y potencial zeta.
Fuente: (Wei Sheng et al., 2023).

En la Figura 3 se observa que el coloide negativo atrae a contraiones (iones positivos) a su superficie que mantienen un enlace firme, esta es llamada la capa de Stern. A medida que más contraiones son atraídos por el coloide, otros contraiones son repelidos por la capa de Stern formada o por otros contraiones cerca del coloide, dando como resultado la llamada capa difusa. Por lo que la doble capa comprende estos contraiones unidos a la capa de Stern y la atmósfera cargada de la capa difusa.

2.4.2. Adsorción y neutralización de la carga de la partícula

La neutralización de carga es la capacidad de un coagulante para desestabilizar y coagular partículas coloidales. Al entrar en acción la etapa de adsorción y neutralización de carga del

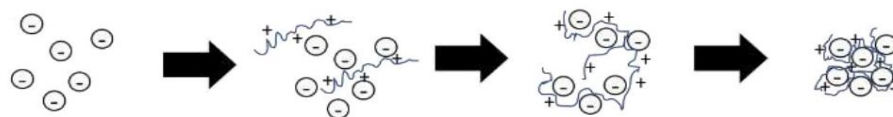
coloide, la carga de la partícula es neutralizada y la repulsión electrostática es reducida o eliminada, generando que el coloide se desestabilice y se aglomere. En este proceso, los iones cargados positivamente cubren los coloides cargados negativamente, disminuyendo así la carga superficial y por lo tanto la barrera de energía. Esto se realiza mediante coagulantes o polímeros orgánicos, debido a que los polímeros poseen hilos y fibras que unen las partículas en aglomerados grandes y compactos. Finalmente, el producto final de la hidrólisis de coagulantes inorgánicos son los precipitados de hidróxido que atrapan los coloides. Es importante destacar que el coagulante puede hacer que la carga del coloide se invierta y se redistribuya como un coloide positivo (reestabilización) (Gheraout, 2020; Kurniawan et al., 2020).



*Figura 3. Mecanismo de absorción y neutralización de carga.
Fuente: (Kurniawan et al., 2020).*

2.4.3. Adsorción y puente entre partículas

La inestabilidad de puentes entre partículas se produce cuando se agrega flocculantes, como el polímero aniónico que tiene superficies activas y estructuras lineales o ramificadas que aumentan la agregación de microfloculos. Esta etapa se debe a cuatro interferencias, la interacción coulombica, relación dipolar, enlace de hidrógeno y fuerzas de Van der Waals. La parte restante de la cadena polimérica se estira hacia el agua y se absorbe en la superficie de otras partículas, esto crea un puente de unión, formando una molécula más pesada que se sedimenta fácilmente. Es importante mencionar que al igual que el coagulante, una cantidad excesiva de flocculante puede volver a estabilizar la partícula (Wei Sheng et al., 2023).

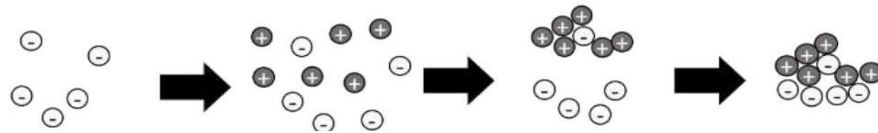


*Figura 4. Mecanismo de puente entre partículas.
Fuente: (Kurniawan et al., 2020).*

2.4.4. Enredamiento de partículas en el precipitado

Cuando se agrega una cantidad suficiente de coagulante, los coloides quedan atrapados en los precipitados durante su formación o justo después. A este atrapamiento de coloides en los precipitados se lo denomina “coagulación por barrido” y existen tres elementos que influyen en esta etapa, esta está representada en la Figura 5 (Wang et al., 2005):

- **Sobresaturación:** La tasa de precipitación es una función de la sobresaturación con el hidróxido metálico.
- **Presencia de aniones:** La tasa de precipitación mejora con la presencia de varios aniones en el agua. Los aniones más efectivos a este respecto son los iones sulfato.
- **Concentración de coloides:** La tasa de precipitación también mejora con una mayor concentración de partículas coloidales. La razón de esto es que los mismos coloides podrían actuar como núcleos para la formación de precipitados, por lo que se puede concluir que se requerirá una dosis de coagulante más baja en lugar de una más alta para coagular agua que tenga una concentración de partículas coloidales más alta.



*Figura 5. Mecanismo de coagulación por barrido.
Fuente: (Kurniawan et al., 2020).*

2.5. Teoría de la floculación

La formación de los flóculos se puede formar cuando las partículas están lo suficientemente cerca unas de otras y colisionan entre sí (Wang et al., 2005). La floculación se divide en dos partes:

2.5.1. Floculación Ortocinética

La floculación ortocinética es la energía mecánica transferida al agua mediante fuerzas externas (paletas giratorias) y es cuando los contactos son producidos por el movimiento del fluido. La floculación ortocinética es donde las partículas se aglomeran si chocan y se acercan lo suficiente como para estar dentro de una zona de influencia entre sí (Bratby, 2016).

También considera que las partículas tienen una velocidad de sedimentación despreciable, por lo tanto, existe la necesidad de agitación del agua o de un gradiente de velocidad para promover las colisiones. La tasa de floculación es proporcional al gradiente de velocidad (cizallamiento), el volumen de la zona de influencia y la concentración de partículas (Wang et al., 2005).

2.5.2. Floculación Pericinética

La floculación pericinética o microfloculación se realiza dentro del agua por el movimiento que tienen las partículas, inducida por la gravedad, el peso de las partículas y la agitación, esto produce la aglomeración y sedimentación, además el contacto entre partículas es producido por el movimiento Browniano. Para aumentar este agregado de partículas (floc) es necesarios aumentar su volumen, su peso y especialmente su cohesión, mediante agitación homogénea y lenta, incrementando las posibilidades de que las partículas descargadas eléctricamente se encuentren con una partícula o flóculo (Bratby, 2016).

2.6. Factores que influyen en la coagulación-floculación

2.6.1. Concentración de coloides

La dosificación de coagulantes que se necesita para la desestabilización de un sistema coloidal está relacionada estequiométricamente con la cantidad de partículas coloidales presentes en la solución. No obstante, para un sistema coloidal diluido, el proceso de coagulación-floculación es muy lento por la pequeña cantidad de sólidos en suspensión, por lo tanto, no existe suficiente contacto entre coloides (Wang et al., 2005).

2.6.2. Importancia de la cantidad de coagulante suministrada

A través de una serie de investigaciones, la dosificación del coagulante se divide en tres zonas. Estas zonas se han definido de la siguiente manera:

- Zona 1: La cantidad de coagulante es insuficiente para la desestabilización de los coloides.
- Zona 2: La cantidad de coagulante es suficiente para que se produzca la desestabilización.
- Zona 3: Un exceso de concentración de coagulante puede provocar la inversión de carga y la reestabilización de partículas (sobre coagulación).

El rango de dosis de coagulante que desencadena el inicio, el final o la eliminación de cualquiera de los zonas anteriores depende de la concentración de partículas coloidales y el valor de pH, la delimitación de las zonas puede observarse en la Figura 6 (Wei Sheng et al., 2023).

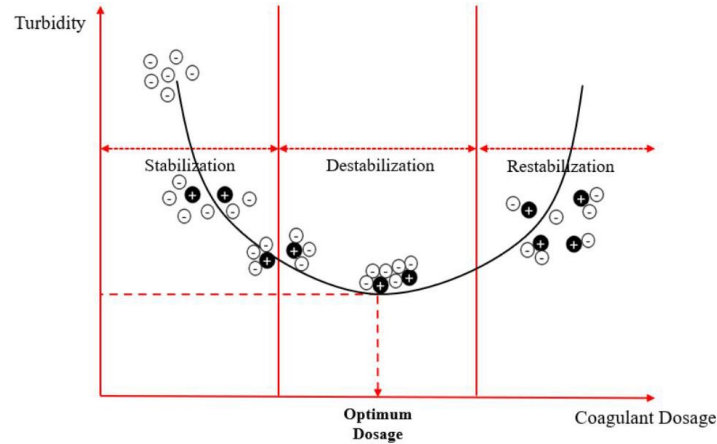


Figura 6. Zonas de proceso de coagulación-floculación.
Fuente: (Wei Sheng et al., 2023).

2.6.3. Sobre coagulación

La sobre coagulación ocurre cuando se agrega demasiado coagulante al tratamiento del agua potable, esto se ocasiona debido a que se forman flóculos muy pequeños rápidamente, que no se separan del agua (no sedimentan), además algunas moléculas de coagulante quedan sin reaccionar y se disuelven en el agua sin cumplir su función de neutralizar las partículas. Esto tiene un efecto negativo en el tratamiento del agua potable, debido a que las moléculas de coagulante pueden reaccionar con compuestos disueltos en el agua cruda, formando compuestos indeseables o interferir en los procesos posteriores al reaccionar con otros compuestos usados en la potabilización del agua. Los coagulantes modifican el pH del agua y si se agregan en exceso este cambio puede ser mayor. Este fenómeno produce en el agua un aumento de turbidez, debido a que se forman flóculos pequeños que siguen en suspensión (American Water Works Association, 2011).

2.6.4. Afinidad de los coloides por el agua

Los coloides hidrofílicos son muy estables debido a su capa de hidratación, es por lo que los compuestos químicos no pueden reemplazar fácilmente las moléculas de agua absorbidas, es por lo que los coloides son difíciles de coagular y eliminar del sistema. La estabilidad de las dispersiones hidrófilas depende más de su afinidad por el agua que de su carga electrostática. Se ha encontrado que los sistemas que contienen partículas hidrofílicas necesitan de 10 a 20 veces más coagulante que el que usualmente se necesita para desestabilizar las partículas hidrofóbicas (materiales que producen color, óxidos metálicos, etc.) (El-taweel et al., 2023).

2.6.5. Valor de pH

El pH juega un papel crucial en el comportamiento y la eficacia de los polímeros utilizados en la coagulación debido a su interacción con la carga del electrolito. La extensión del cambio de carga con el pH depende del tipo de grupo activo presente en el polímero (carboxilo, amino, etc.) y su composición química. Se ha observado que altas concentraciones de aniones, como sulfato, silicato y fosfato, pueden suprimir o eliminar la inversión de carga y la reestabilización de los coloides (Dwarapureddi & Saritha, 2015; El-taweel et al., 2023).

2.6.6. Cationes y aniones en solución

La presencia de una alta concentración de iones como el silicato, sulfato y fosfato elimina el comportamiento de reestabilización de la carga de los coloides. Por ejemplo, en estudios se demuestra que el aumento de la concentración de sulfato (SO_4^{2-}) en el sistema es eficaz para prevenir la reestabilización de las cargas. La presencia de cationes divalentes, como Ca^{2+} y Mg^{2+} en el agua cruda, es necesaria en la coagulación de partículas de arcilla coloidal cargadas negativamente por polímeros aniónicos. Los efectos beneficiosos por la presencia de estas partículas son (El-taweel et al., 2023):

- Compresión de la doble capa coloidal.
- Reducción de la carga negativa coloidal y minimización del potencial repulsivo.
- Reducción del rango de barrera repulsiva entre polímeros adsorbidos.

2.6.7. Temperatura

El proceso de coagulación mediante sales metálicas se ven perjudicados por la baja temperatura. El sulfato de aluminio es menos soluble a temperaturas más bajas, por lo que a medida que el agua se enfría, es más probable que este coagulante se precipite en forma de sólidos en lugar de permanecer en solución. Además, a temperaturas más bajas, el agua tiende a volverse más viscosa, lo que puede dificultar la mezcla y la agitación del coagulante y el agua (El-taweel et al., 2023).

2.7. Prueba de Jarras

Esta es una operación que permite simular la coagulación, floculación y sedimentación. Esta consiste en duplicar a baja escala los procesos que ocurren en una planta de tratamiento de agua potable. Este enfoque se emplea para varias finalidades, incluyendo la selección de coagulantes alternativos, la adición de ayudas de floculación poliméricas, y la evaluación de los

efectos resultantes de modificaciones en las dosis químicas y los puntos de aplicación, implementar una preoxidación alternativa, variar las intensidades y los tiempos de mezcla, y cambiar las tasas de desbordamiento en la eliminación de partículas, materia orgánica natural u otros parámetros de calidad del agua a tratar. Debido a que la prueba de jarras es una simulación de las operaciones antes mencionadas, en este ensayo también se tiene una etapa de rápida (coagulación), mezcla lenta (floculación) y la sedimentación o clarificación. Los rangos de velocidad van de 5 hasta 500 revoluciones por minuto (rpm) (American Water Works Association, 2011).

El equipo de jarras es un equipo que consiste en 4 a 6 espacios en donde se pueda colocar un vaso de precipitados transparente de 1 a 2 litros de capacidad. Cuenta con un sistema con paletas que giran al mismo tiempo y a la misma velocidad. Estas paletas deben ser iguales en cuanto a su tamaño, material y configuración.

2.8. Reactivos

2.8.1. Policloruro de aluminio

El coagulante que se utiliza en el presente trabajo es el policloruro de aluminio, es ampliamente utilizado ya que sus propiedades de coagulación demuestran ser muy buenas. En general, los coagulantes prepolimerizados tienen una menor sensibilidad a los cambios de composición del agua cruda. Esto ha generado un gran interés en su aplicación en el tratamiento de aguas potables, ya que han demostrado un desempeño superior en diversos parámetros analizados durante el proceso de tratamiento. Este tiene un margen superior de pH de trabajo (sulfato de aluminio trabaja en un rango de 5.5 a 7.5 de pH y el PAC entre 4 a 8 de pH). Además, tiene una menor sensibilidad a bajas temperaturas ya que el PAC no se ve afectado negativamente por la baja temperatura como otros coagulantes (American Water Works Association, 2011; Torra et al., 1998).

Tiene una mayor eficacia de purificación, ya que ha demostrado ser 30 % más eficiente que el sulfato de aluminio en la eliminación de carbono orgánico disuelto (DOC) y muy eficaz en la eliminación de la turbidez (Wei Sheng et al., 2023). Genera una mayor eficiencia de separación, es decir, una mejor separación del flóculo frente a los coagulantes tradicionales en lo que se refiere a la rapidez de filtrabilidad, decantación y deshidratación de fangos. Una de las ventajas clave del uso del coagulante PAC es la reducción de aluminio residual, en contraste con el sulfato de aluminio, que tiende a dejar niveles más altos de aluminio residual. Esto es importante ya que

el aluminio residual se considera tóxico para la salud humana y está fuertemente relacionado con enfermedades como el Alzheimer (Torra et al., 1998).

2.8.2. Polímero Aniónico

Se suele utilizar floculantes sintéticos, principalmente poliacrilamidas, en el tratamiento del agua. Estos polímeros tienen la capacidad de tener cargas eléctricas o grupos ionizables, lo que les permite generar una disociación electrolítica y formar iones altamente cargados. Estos floculantes pueden ser de carga positiva (catiónicos) o de carga negativa (aniónicos). Los floculantes sintéticos son altamente efectivos en concentraciones bajas y mejoran la velocidad de sedimentación. Además, optimizan la cohesión de los flóculos y generan flóculos más grandes, lo que aumenta el tamaño de los lodos. En comparación con los floculantes naturales, los floculantes sintéticos tienen mayor eficiencia, calidad, pureza y estabilidad, además de que no alteran las propiedades fisicoquímicas del agua (Grenda et al., 2020; Wei Sheng et al., 2023).

El polímero aniónico ayuda a tener una mayor eficiencia de floculación y velocidad de sedimentación, obtener una reducción del volumen de lodos en un 42 %, minimizar la cantidad de coagulante requerido y, por lo tanto, un costo reducido del proceso de coagulación-floculación (Wei Sheng et al., 2023).

2.9. Métodos y herramientas estadísticas

2.9.1. Análisis de regresión

El análisis de regresión busca modelar matemáticamente una variable de respuesta en relación con una o varias variables independientes llamadas factores, este se utiliza para predecir, optimizar o controlar, y su desarrollo implica la recopilación de datos, que pueden obtenerse mediante observaciones, registros históricos o experimentos planificados (Melo et al., 2020).

- **Regresión lineal simple:** Se recopilan n pares de valores (X, Y) al medir Y en función de diferentes valores de X . El objetivo de la regresión simple es determinar si es posible predecir los valores de Y basándose en los datos de X con la siguiente ecuación: " $Y = \beta_0 + \beta_1 X + \varepsilon$ " (Gutiérrez & De la Vara, 2012).
- **Regresión Polinómica:** En ocasiones existen varias variables que influyen a la variable de respuesta Y . La regresión polinómica puede usarse para una función de orden n para conseguir un mejor ajuste que con el modelo de regresión lineal (Vargas Rodríguez et al., 2015). Basándose en la siguiente ecuación: " $Y = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 X^2 + \dots + \beta_n X^n + \varepsilon$ ".

- **Regresión Logarítmica:** Es adecuada para modelar fenómenos o comportamientos en los que se observa un crecimiento rápido al principio, seguido de una desaceleración gradual a lo largo del tiempo, lo que se refleja en una tendencia lineal horizontal aproximada (Gutiérrez & De la Vara, 2012). Basándose en la siguiente ecuación: “ $Y = \beta_0 + \beta_1 \ln(X)$ ”.

2.9.2. Calidad del ajuste de la regresión

Se debe establecer si la relación entre las variables permite hacer estimaciones con una precisión estable, por lo que se deben tener en cuenta los siguientes puntos:

- **Coeficientes de determinación R^2 y R^2 ajustado:** Evalúan la calidad del ajuste de una recta en un modelo de regresión. Representan la proporción de la variabilidad en los datos (Y) que puede ser explicada por el modelo (Gutiérrez & De la Vara, 2012).
- **Error estándar de estimación:** Nos da la calidad de ajuste de un modelo, es una estimación de la desviación estándar del error, representado por $\hat{\sigma}$. Mientras menor sea su medida, mejor será el ajuste del modelo de regresión (Spiegel & Stephens, 2018).
- **Prueba de Shapiro-Wilks para la normalidad:** Se compara este estadístico con los valores críticos de la distribución de Shapiro-Wilk para determinar si hay suficiente evidencia para rechazar que los datos proceden de una distribución normal (Gutiérrez & De la Vara, 2012).
- **Valor p:** Para llevar a cabo una prueba de hipótesis utilizando este enfoque, se elige un nivel de significancia α . Se calcula el valor de p (p-value) y si el valor de $p \leq \alpha$, se rechaza H_0 , de lo contrario, no se rechaza H_0 (Spiegel & Stephens, 2018).

2.10. Análisis multivariado

El análisis multivariado es un método estadístico que nos ayuda a analizar datos en los cuales influyen más de una variable, este se puede utilizar para obtener patrones en los datos, describir las relaciones entre las variables y hacer predicciones. Los principales objetivos del análisis multivariado son (Afifi et al., 2020; Hair et al., 2019):

- **Identificar patrones de tendencia:** Ayudando a comprender cómo se relacionan las variables entre sí y detectar asociaciones. Esto puede ayudar a identificar patrones en la eficacia de la coagulación a diferentes dosis de PAC.
- **Reducir las dimensiones de variables:** Transforma un conjunto grande de variables en un conjunto más pequeño de variables que retiene la mayoría de información relevante.
- **Evaluación de impacto:** Se evalúa el impacto de múltiples variables sobre una variable de interés, ayudando a comprender cuales son los factores más influyentes y cómo

interactúan entre sí. Se puede evaluar cual es el impacto de la dosis de PAC en las demás variables, determinando cual es la dosis de PAC que maximiza la remoción de turbiedad.

- **Análisis factorial y exploratorio:** Ayuda a identificar factores latentes que influyen en la eficacia del tratamiento de agua potable. Estos factores podrían incluir la temperatura, el pH y otros parámetros. Esto te ayudaría a entender mejor las variables que afectan la dosificación óptima de PAC.

2.10.1. Regresión lineal multivariado

Este modelo trata de explicar una cantidad p de variables denominadas respuesta mediante una relación de tipo lineal con otras q variables denominadas explicativas. Se generaliza tanto la regresión lineal múltiple, que involucra una única variable respuesta y múltiples variables explicativas, como la regresión lineal simple, que utiliza solo una variable explicativa para predecir la variable respuesta (Afifi et al., 2020). La Ecuación 1 describe este modelo:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon \quad \text{Ec. 1}$$

2.10.2. Selección de los mejores predictores

El método Stepwise se basa en seleccionar y eliminar variables de manera secuencial para obtener el mejor modelo que explique los datos. El criterio para evaluar la calidad del modelo y guiar el proceso de selección de variables es el criterio de Akaike (AIC), que califica el modelo según su ajuste, teniendo en cuenta su complejidad, en donde se busca un equilibrio entre un buen ajuste del modelo y su simplicidad (número de variables del modelo) (Hair et al., 2019).

2.11. Metodología de superficie de respuesta (MSR)

La metodología de superficie de respuesta (MSR) permite ajustar la región experimental para explorar de manera detallada las condiciones óptimas de un proceso, el objetivo es identificar las condiciones ideales de operación, proporcionando resultados que representan los valores óptimos de características del producto o sistema. En este estudio, se aplica la MSR para analizar la relación entre la turbiedad del agua cruda, la dosis de PAC y el porcentaje de remoción de turbiedad, permitiendo evaluar la influencia de la variable independiente con las variables de respuesta (Nath Das, 2014).

2.11.1. Modelos

Los modelos que se utilizan en MSR son básicamente polinomios, por lo que, si tiene k factores, el modelo de primer orden está dado por la Ecuación 2 y el modelo de segundo orden está dado por la Ecuación 3:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \varepsilon$$

Ec. 2

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{<j=1}^k \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon$$

Ec. 3

Capítulo III

3. Metodología

3.1. Muestreo

Las muestras analizadas son de agua cruda que se obtuvo de la Planta de tratamiento de Agua de Tixán. Se aseguró que la muestra sea representativa, que esta no se deteriore o contamine antes de realizar las pruebas en laboratorio. Para la toma de muestra se ha considerado la norma NTE: INEN 2176:2013, la muestra es instantánea, puntual e individual, es decir que con relación al tiempo y/o volumen de agua, esta se toma al azar (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2013).

Se utilizó un contenedor de 20 litros hecho de polietileno de alta densidad (HDPE) equipado con una tapa de plástico hermética con rosca. Cada muestra se etiquetó con la fecha y la hora de recolección para su identificación. Se tomó la muestra a 2 metros de la orilla y de 15 a 30 cm de profundidad. Al momento de su transporte, se dejó un espacio mayor al 1% de aire de la capacidad del envase con el fin de permitir la variación de volumen por efectos térmicos. El envase se limpiaba completamente antes y después de cada muestreo. No se usaban detergentes, hipoclorito de sodio u otros compuestos, solamente se lavó con agua y al momento de tomar la muestra se enjuagó al menos tres veces con el agua a muestrear, siguiendo estrictamente las normas y recomendaciones establecidas para el muestreo de agua potable (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2013). Se llevó a cabo el muestreo durante la época del año con mayor turbidez, que coincide con la temporada de alta precipitación, comprendida entre el 16 de enero y el 12 de mayo. La recolección de muestras se efectuó específicamente en los meses de marzo, abril, mayo y junio.

3.2. Preparación de la muestra

Desde la recolección de la muestra hasta su llegada al laboratorio, transcurre aproximadamente una hora. Además, hubo muestras que se analizaron al día siguiente debido a la disponibilidad del laboratorio. Estas muestras se mantuvieron almacenadas en refrigeración a 4 °C para preservar sus propiedades, asegurando que no excedieran las 24 horas de almacenamiento. Una vez en el laboratorio, se llevaron a cabo las mediciones de turbidez en NTU utilizando un turbidímetro, así como la determinación del color mediante un colorímetro. Además, se registraron los valores de pH y temperatura utilizando un potenciómetro. Todos los equipos y materiales están en la sección 5 de Anexos. Esto con el objetivo de tener las propiedades

fisicoquímicas antes de realizar el análisis para compararlas después del tratamiento de floculación (Wei et al., 2015).

3.3. Preparación de reactivos

3.3.1. Coagulante (Policloruro de Aluminio)

El coagulante PAC de la marca Quimicalzen, que fue adquirido, se presenta en forma de partículas pequeñas (polvo) y con una concentración del 90%. Su pH en solución al 1% se sitúa en el rango de 3.5 a 5, tal como se especifica en su ficha técnica en las Figuras 31 y 32 en la sección 6 de Anexos. Para su preparación y utilización como coagulante se dispersó en agua desionizada con el fin de obtener una solución madre y a partir de esta, soluciones más diluidas para cada conjunto de pruebas. Se preparaba una nueva solución de PAC al 1% (p/v) cada vez que se realizaban los ensayos, con el fin de evitar el deterioro de la solución y mantener su eficiencia.

Para realizar las pruebas con el PAC, en cada jarra se adiciona una cantidad entre 35 a 10 ppm (el procedimiento se detalla más adelante en la Sección 3.4), cómo nuestra solución madre es de 1% (10000 ppm) y el volumen de cada jarra es de 1 L (1000 mL), con la Ecuación 4 se encuentra el volumen que se debe adicionar a cada jarra.

$$V_C * C_C = V_D * C_D \quad \text{Ec. 4}$$

Siendo V_C y C_C el volumen y la concentración de la solución madre o solución concentrada, respectivamente, y V_D y C_D el volumen y la concentración de la solución que se desea obtener o solución diluida. Se observa un ejemplo para obtener el volumen necesario para la concentración de 35 ppm.

$$V_C = \frac{1000\text{mL} * 35 \text{ ppm}}{10000 \text{ ppm}} = 3.5 \text{ mL}$$

3.3.2. Floculante (Polímero Aniónico)

El floculante PA de la marca Quimicalzen, que fue adquirido, se presenta en forma de partículas pequeñas (polvo) y con una concentración del 90%, tal como se especifica en su ficha técnica en las Figuras 33 y 34 en la sección de 6 Anexos.

Se preparó una solución de PA al 0.1% (peso/volumen) cada vez que se realizaban los ensayos, lo que resultó en una concentración de 1000 mg/L. Para realizar las pruebas con el PA, en cada jarra se adiciona una cantidad entre 2 a 0.25 ppm, como nuestra solución madre es de 1000 ppm y el volumen de cada jarra es de 1 L (1000 mL), se utilizó la Ecuación 4 para encontrar el volumen a adicionar a cada jarra. Se observa un ejemplo para obtener el volumen necesario para la concentración de 2 ppm.

$$V_c = \frac{1000 \text{ mL} * 2 \text{ ppm}}{1000 \text{ ppm}} = 2 \text{ mL}$$

3.4. Procedimiento de los ensayos

Después de llevar la muestra al laboratorio, se realizaron mediciones de los parámetros del agua cruda, incluyendo la turbidez, el color, el pH, la temperatura y la conductividad. El proceso se llevó a cabo de la siguiente manera:

- Se comenzó por evaluar el floculante PA con la intención de determinar la cantidad adecuada. Inicialmente se llevaron a cabo dos ensayos, para estudiar su comportamiento en conjunto con el PAC. Las dosificaciones del pretest fueron de 0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.25, 1.5, 1.75 y 2 ppm de PA.
- Después de establecer una cantidad fija de floculante PA, se procedió a realizar los ensayos con PAC, que constituyen el enfoque principal de este estudio. Las dosificaciones de estudio fueron de 10, 15, 20, 25, 30 y 35 ppm de PAC.
- En cada serie de pruebas, se agitó la muestra a 120 rpm durante 1 minuto inmediatamente después de agregar el coagulante PAC. Luego, se incorporó el floculante PA y se redujo la velocidad de agitación a 60 rpm durante 15 minutos. Finalmente, se detuvo la agitación y se permitió que los flóculos formados se sedimentaran.
- Después de cada serie de pruebas se volvieron a medir los parámetros que se habían medido en el agua cruda.

Los pasos de manera más detallada se encuentran en la sección 9 del apartado de Anexos.

Capítulo IV

4. Resultados y discusión

4.1. Determinación de la dosis óptima de floculante polímero aniónico

Se desea usar una misma cantidad de polímero aniónico-base poliacrilamida (floculante) para tratar agua a cualquier turbiedad, por lo que se hace una determinación de la dosis óptima con una prueba de jarras. Esto se realiza con una dosis de PAC (coagulante) fija de 20 mg/L que ha demostrado tener un comportamiento ideal con el polímero aniónico-base poliacrilamida (floculante). La dosis de polímero aniónico-base poliacrilamida (floculante) va variando de 2, 1.75, 1.5, 1.25, 1, 0.75, 0.5 y 0.25 mg/L. Después de obtener los datos acerca de la dosificación de floculante se determina la dosis que tuvo un mejor resultado en porcentajes de remoción.

Después de realizar dos ensayos para evaluar la interacción entre el PAC y el PA, se determinó que la dosis óptima para el floculante PA, que funciona mejor en conjunto con el PAC, fue de 1.5 ppm, como se muestra en la Tabla 1. Esto se asemeja al estudio realizado por Guzmán Rivas (2017), en donde se encontró que la dosificación óptima es de 3 ppm y en el estudio realizado por Chaves Vásquez (2013) en donde la dosificación óptima fue de 0.5 ppm, finalmente en el estudio realizado por Zarei Mahmudabadi et al. (2018) se encontró una dosis óptima de 1.5 ppm de PA. Dado que los ensayos demostraron que 1.5 ppm de floculante PA resulta en la mayor remoción de turbiedad, respaldando la evidencia bibliográfica, esta concentración se seleccionó para todos los ensayos. Los resultados detallados de estos ensayos se encuentran en la Tabla 9 y 10 en la sección 1 del apartado de Anexos.

Tabla 1. Resultados de la remoción de turbiedad con la dosis óptima de PA (floculante) en cada ensayo.

Número de Ensayo	Fecha de ensayo	Turbiedad Inicial (NTU)	Turbiedad Final (NTU)	Dosis óptima	Porcentaje de Remoción (%)
1	02-marzo-2023	1.97	0.33	1.5	83.25%
2	03-marzo-2023	2.1	0.35	1.5	83.33%

4.2. Determinación de la dosis óptima del coagulante policloruro de aluminio

Durante el período en el que se llevaron a cabo las pruebas, no se registraron lluvias intensas, por lo que no se alcanzaron turbiedades iniciales altas. Las turbiedades del agua cruda fueron en su mayoría de 1.35 NTU a 2.69 NTU y solamente dos pruebas tuvieron una turbiedad por encima de este rango, alcanzando el máximo en 6.89 NTU. Esto concuerda con el histórico de la planta, en donde el 90% del tiempo se mantiene debajo de 11.4 NTU. En total, se realizaron

11 ensayos. La Tabla 2 presenta la jarra que mejor resultados obtuvo de cada uno de los ensayos, es decir, presenta la dosis óptima de cada ensayo. Todos los datos se pueden encontrar en la sección 2 del apartado de Anexos en la parte de Índice de Tablas, de la Tabla 11 a la Tabla 21.

Tabla 2. Resultados de la remoción de turbiedad con la dosis óptima de PAC (coagulante) en cada ensayo.

Número de Ensayo	Fecha de ensayo	Turbiedad Inicial (NTU)	Turbiedad Final (NTU)	Dosis óptima (ppm)	Porcentaje de Remoción (%)
1	06-marzo-2023	1.73	0.39	20	77.46%
2	07-marzo-2023	4.25	0.53	25	87.53%
3	09-marzo-2023	1.96	0.37	20	81.12%
4	14-marzo-2023	1.85	0.46	20	75.14%
5	16-marzo-2023	2.69	0.46	25	82.90%
6	23-marzo-2023	2.51	0.48	25	80.88%
7	29-abril-2023	6.89	0.54	25	92.16%
8	13-mayo-2023	1.85	0.52	20	71.89%
9	16-mayo-2023	1.35	0.53	15	60.74%
10	20-mayo-2023	1.5	0.59	15	60.67%
11	03-junio-2023	1.95	0.61	20	68.72%

En la Figura 7 se puede apreciar una comparación entre la turbiedad del agua cruda (línea azul) y la turbiedad después de realizar el ensayo (línea roja).

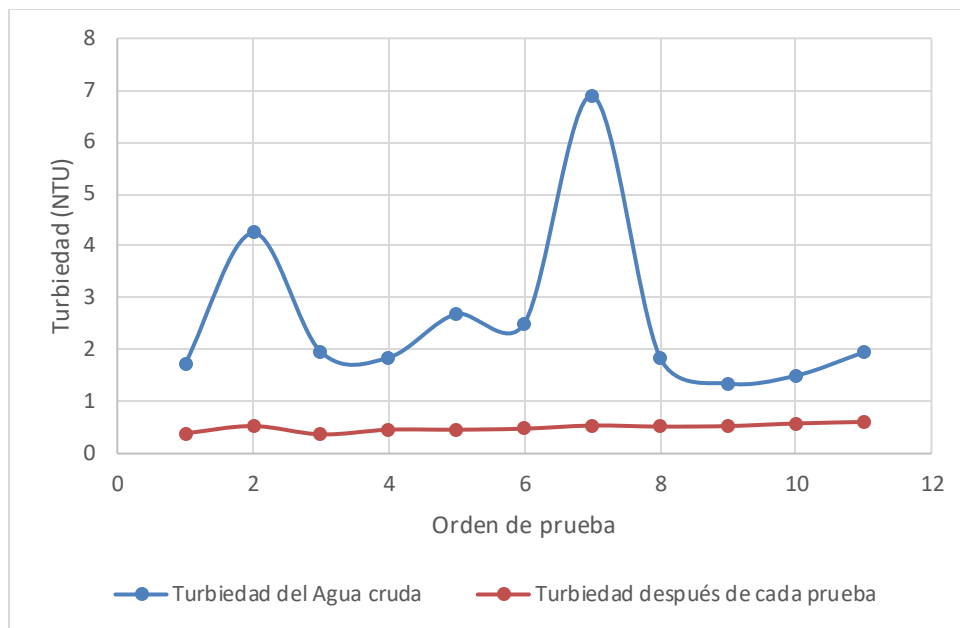


Figura 7. Comparación entre la turbiedad del agua cruda con la turbiedad después de cada uno de los ensayos.

En la Figura 8 se representa el porcentaje de remoción de turbiedad y la dosificación de PAC de cada uno de los 11 ensayos, se puede observar que las máximas remociones de turbiedad se mantienen en 15, 20 y 25 ppm, ya que concentraciones mayores o menores de PAC disminuyen la remoción de turbidez debido a la falta de coagulante o por efecto de la sobre coagulación.

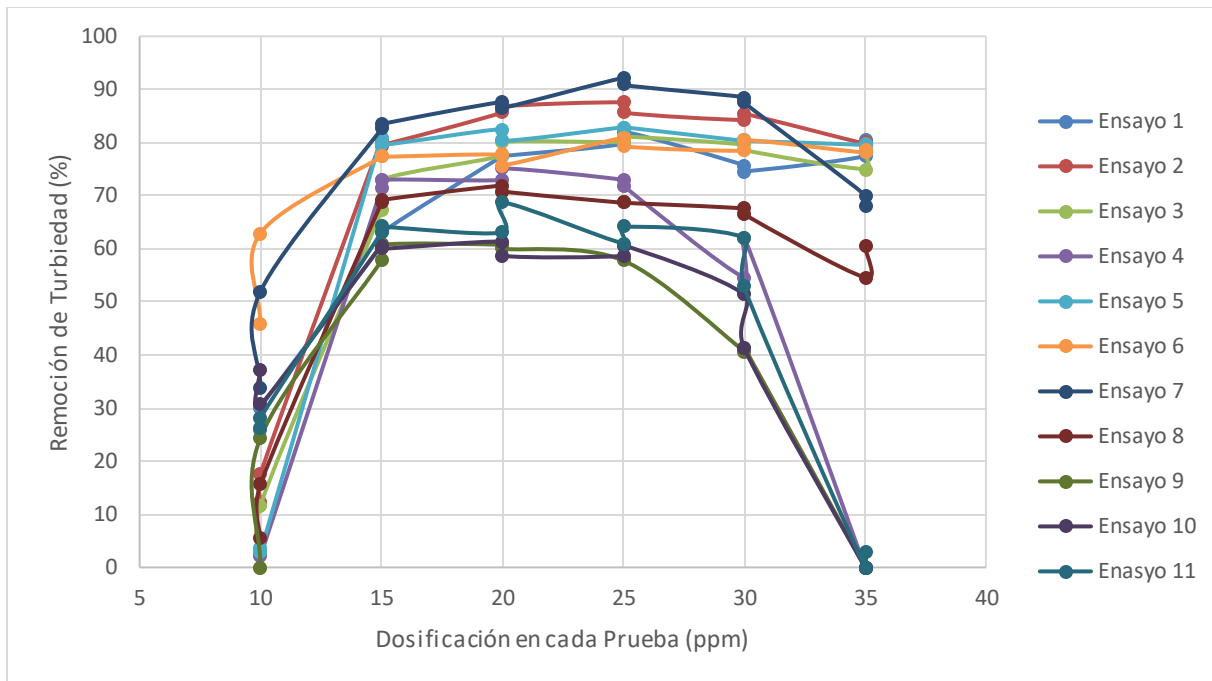


Figura 8. Representación de la remoción de la turbiedad en función de la dosificación de coagulante para cada ensayo.

Se obtuvieron los mejores resultados de cada uno de los ensayos en función del porcentaje de remoción de la turbiedad. Las dosificaciones se mantuvieron en 15, 20 y 25 ppm, toda dosificación diferente a esta arrojaba valores más altos de turbiedad. En la Figura 9 se puede observar el porcentaje de remoción de cada una de las dosificaciones óptimas, es preciso señalar que el porcentaje de remoción es más bajo en las dosis de PAC de 15 ppm debido a que se parte de una turbiedad del agua cruda muy baja, por lo que no se puede remover más turbiedad como en los demás ensayos.

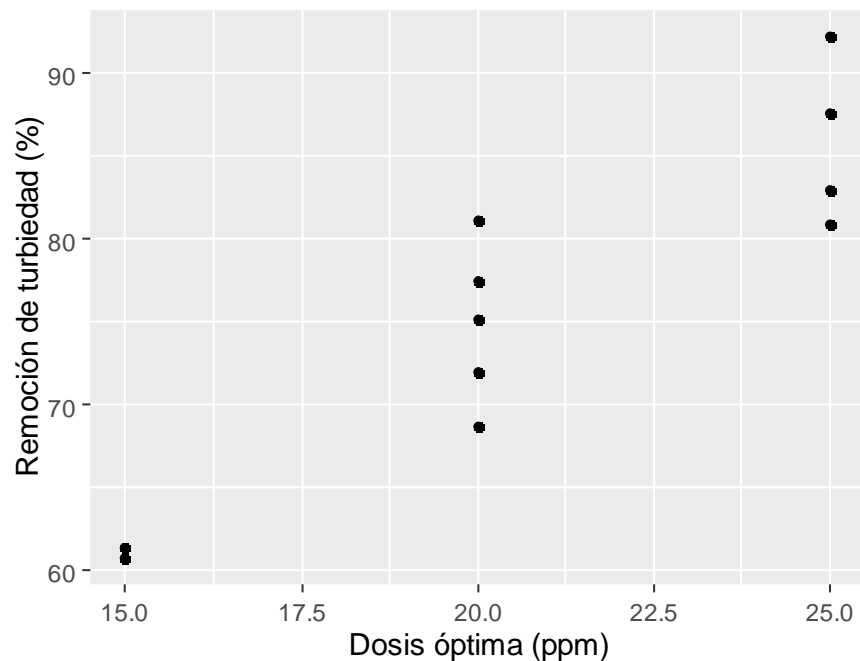


Figura 9. Representación de la dosis óptima en relación con el porcentaje de remoción de cada ensayo.

4.3. Construcción de las curvas de dosificación óptima del policloruro de aluminio

Con los datos obtenidos en la Tabla 2, se pudieron obtener datos solamente con turbiedades bajas. Se realiza el análisis del comportamiento PAC en este rango de turbiedades. Se utiliza el software estadístico RStudio para este análisis. En la Figura 10 se muestra el diagrama de dispersión creado a partir de estos datos.

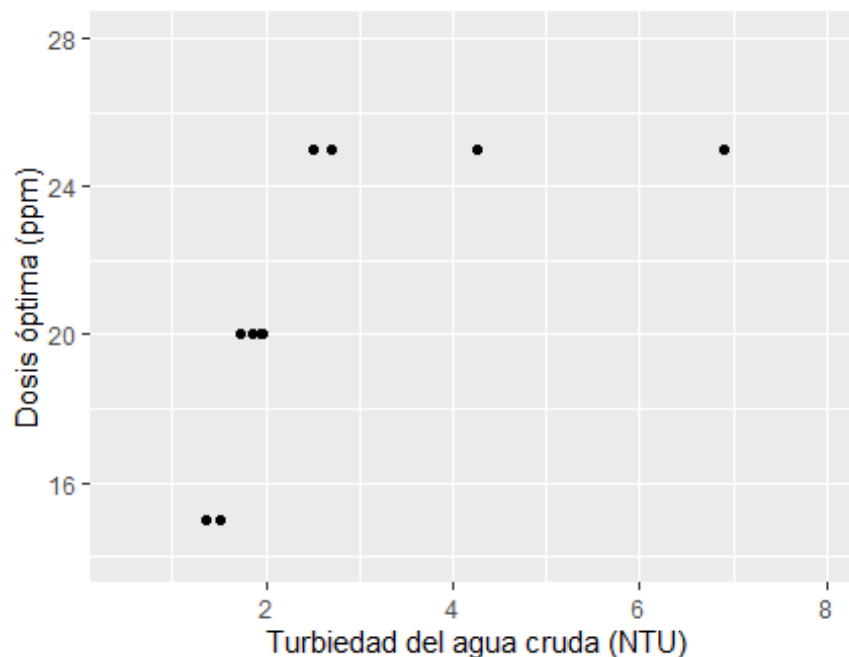


Figura 10. Gráfica de dispersión de la dosificación óptima.

Se prueban varios modelos de regresión, con el fin de ver cuál se ajusta mejor a los datos. En la Figura 11 se representa el modelo de regresión lineal, debido a que existen datos solamente en las dosis de 15, 20 y 25 ppm de concentración de dosis óptima, el modelo tiene un coeficiente de determinación de 0.4593, por lo que el 45.93% de los datos y la varianza son explicados por el modelo, el 54.07% no se explica con el modelo lineal. Este modelo tiene una desviación estándar de los residuos de 2.91, con el fin de poder compararlo con los otros modelos. Al tener un coeficiente de determinación bajo este modelo puede descartarse, para construir la curva de dosificación. En el apartado de Anexos, en la Tabla 22 se adjunta la tabla con el informe completo brindado por RStudio.

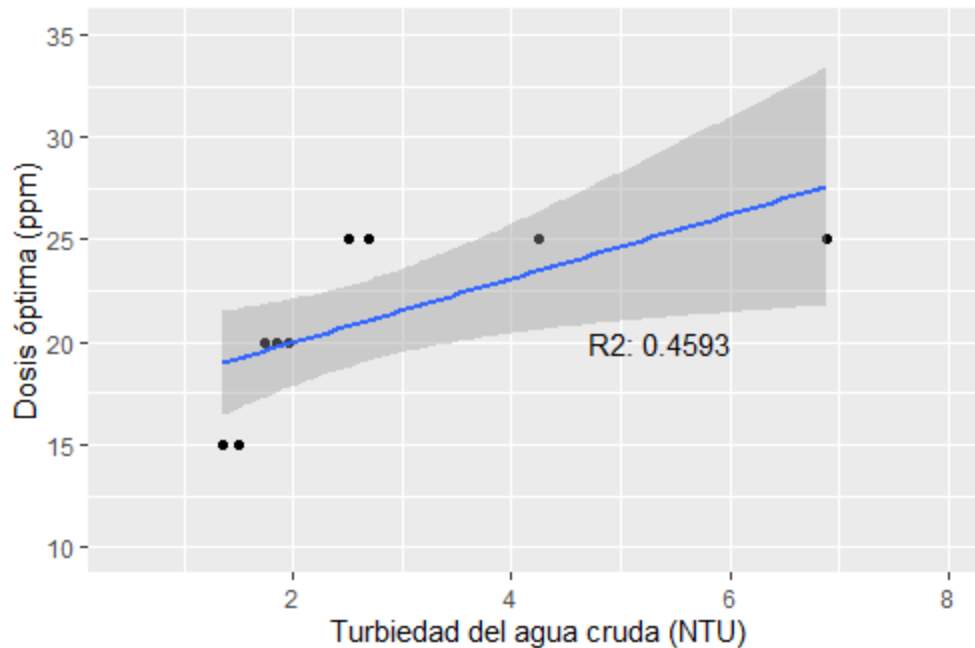


Figura 11. Ajuste de regresión lineal.

Al analizar cada uno de los grados polinómicos, se observa que el modelo de sexto grado presenta el coeficiente de determinación más alto. Sin embargo, en el gráfico se pueden apreciar muchas curvas que muestran variaciones no coherentes con la naturaleza del experimento ni con el comportamiento del coagulante. Es importante destacar que ninguno de los modelos polinómicos se ajusta adecuadamente al patrón de una curva de dosificación óptima. Incluso se identificaron tramos en los cuales se muestra una dosificación negativa, como se evidencia en el modelo de sexto grado representado en la Figura 12. El modelo tiene un coeficiente de regresión de 0.9643, por lo que el 96.43% de los datos y la varianza son explicados por el modelo, el 3.57% no se explica con el modelo de sexto grado. Este modelo tiene una desviación estándar de los residuos de 1.12. A pesar de que tenga un buen ajuste, los modelos polinómicos son descartados debido a que ninguno de ellos sigue la naturaleza del experimento por presentar subidas y bajadas en su gráfico que darían resultados erróneos. En el apartado de Anexos, en la Tabla 23 se adjunta la tabla con el informe completo brindado por RStudio.

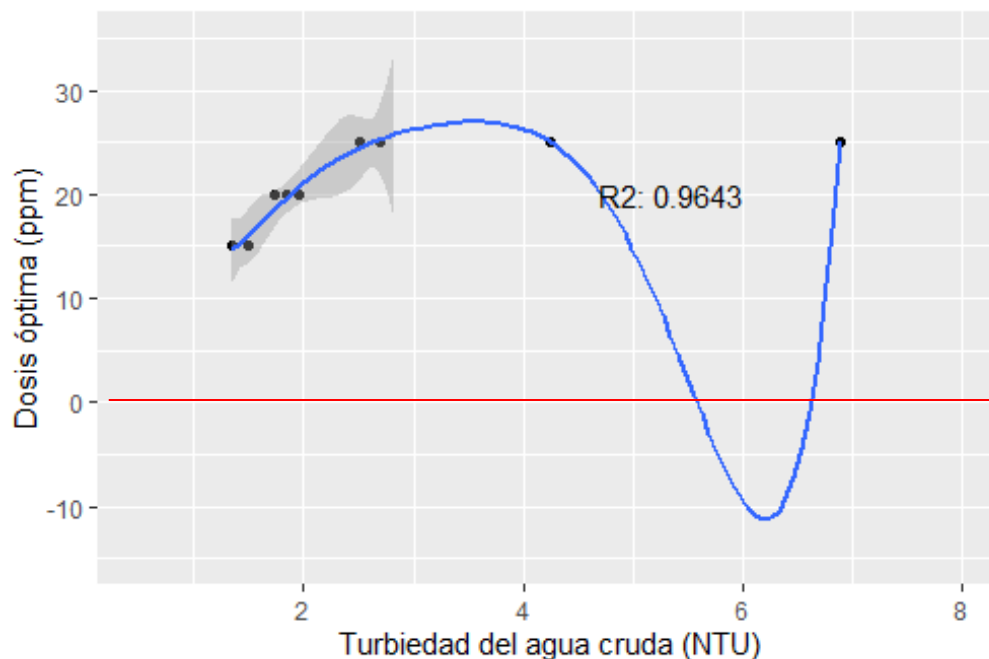


Figura 12. Ajuste de regresión de sexto grado.

Para el modelo logarítmico representado en la Figura 13, se tiene un coeficiente de determinación de 0.6575, por lo que el 65.75% de los datos y la varianza son explicados por el modelo, el 34.25% no se explica con el modelo logarítmico. Este modelo tiene una desviación estándar de los residuos de 2.32 que mide la dispersión de los residuos, que son las diferencias entre los valores reales y los valores estimados por el modelo, es decir, la desviación estándar de los residuos representa cuánto "error" hay en las predicciones del modelo. Se observa que gráficamente el modelo logarítmico se acopla de mejor manera a los datos, ya que no tiene curvas y su desviación estándar de residuos es más baja que la regresión lineal. En el apartado de Anexos, en la Tabla 23 se adjunta la tabla con el informe completo brindado por RStudio.

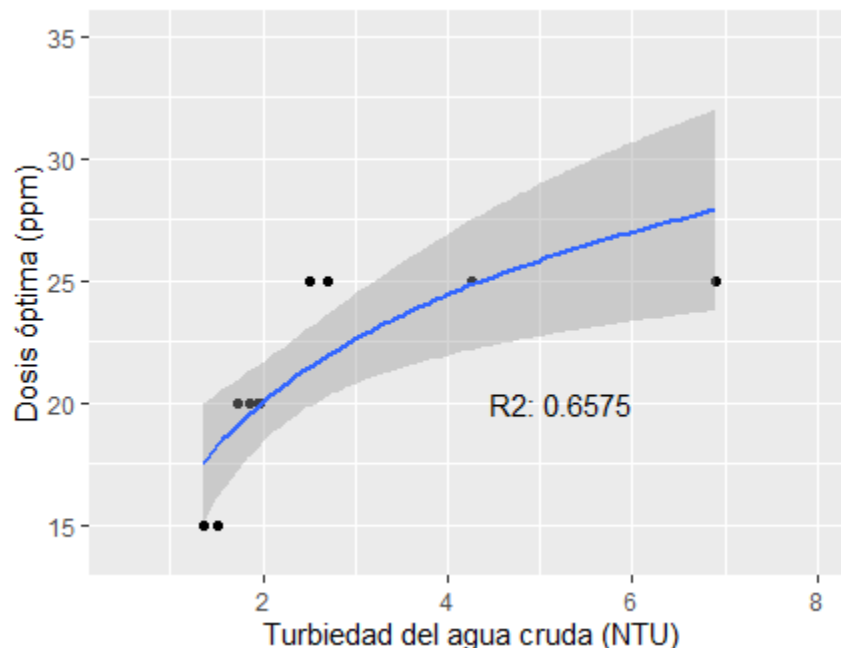


Figura 13. Ajuste de regresión logarítmica.

4.4. Pruebas estadísticas para evaluar el modelo

4.4.1. Significancia de los coeficientes de regresión

Los resultados indican que tanto el p-value de 1.8×10^{-6} para el intercepto como el p-value de 0.000246 para $\ln(\text{Turbiedad del agua cruda})$ son estadísticamente significativos en el contexto del modelo de regresión logarítmica seleccionado. Estos valores se encuentran detallados en la Tabla 24 de la sección de Anexos.

4.4.2. Prueba de la normalidad

Mediante la prueba de Shapiro-Wilk, se comprueba la normalidad de los residuos. Esta prueba nos da un valor de estadístico de prueba (W) de 0.90242 y p-value de 0.1978, por lo que no se rechaza la hipótesis nula y se tiene una variable con distribución normal.

4.4.3. Detección de datos atípicos

En el diagrama de caja y bigotes de la Figura 14, no se observan datos atípicos. Analizando la distancia de Cook en la Figura 15, se observa que el dato 11 se señala como atípico, pero analizando detenidamente este parámetro se observa que corresponde a la turbiedad de 6.89

NTU, que solamente es la turbiedad del agua cruda más elevada de los ensayos, por lo que no se descarta.

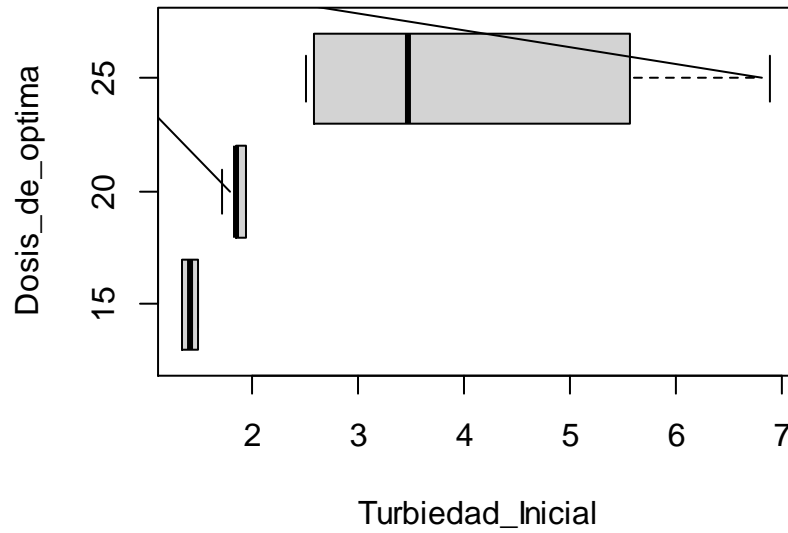


Figura 14. Gráfica de caja y bigotes.

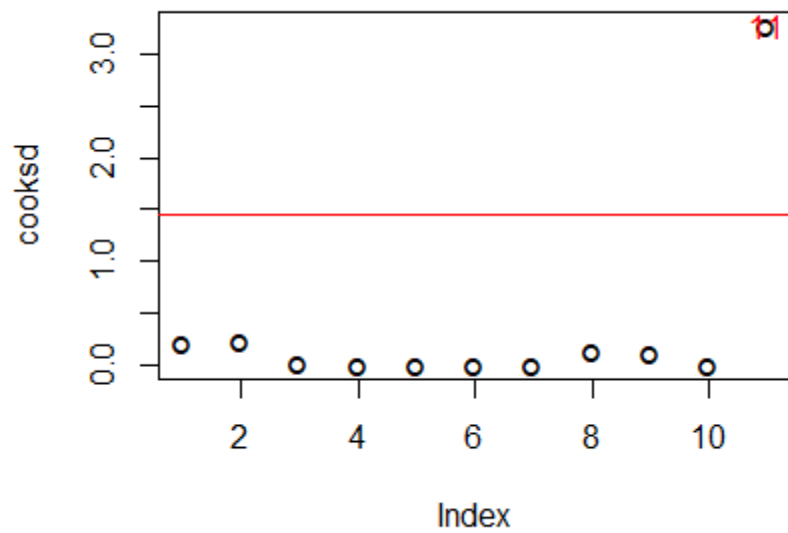


Figura 15. Gráfica de la distancia de Cook

También se obtiene la prueba Bonferroni, que nos indica si un valor está catalogado como atípico y nuevamente nos muestra el valor 11 (6.89 NTU), pero su p-value es de 0.3669, por lo que no existe evidencia suficiente para eliminar este dato y reajustar el modelo.

4.4.4. Ecuación de la curva de dosificación de coagulante

El modelo logarítmico es el que mayor ajuste tiene de los modelos probados y que además sigue con la naturaleza de los datos, asimismo los datos se ajustan a un modelo normal y no existen datos atípicos, por lo que el modelo es escogido para representar la curva de dosificación de coagulante, por lo que se obtiene la Ecuación 5 representada a continuación:

$$D = 15.661 + 6.336 * \ln (T_0) \quad \text{Ec. 5}$$

En donde:

D: Dosis de PAC suministrada al agua cruda.

T₀: Turbiedad del agua cruda.

Para comparar la dosis óptima aplicada con otro autor, consulte la Tabla 3. En el estudio realizado por Guzmán Rivas (2017), se empleó la prueba de jarras para determinar la dosificación óptima. En este estudio, se logró una turbidez de 5.97 NTU, y se observó que la dosis óptima oscilaba entre 10 y 20 ppm de PAC. Luego, se realizaron mediciones dentro de este rango (10 y 20 ppm), obteniendo una dosis óptima de 16 ppm de PAC cuando la turbidez alcanzó los 4.01 NTU. Cabe destacar que, en este estudio, la dosis óptima de polímero aniónico fue de 3 ppm.

Tabla 3. Comparación de dosificaciones óptimas de PAC.

Autor	Turbiedad del Agua Cruda (NTU)	Dosis óptima de PAC (ppm)	Eficiencia
(Guzmán Rivas, 2017)	5.97	20	80.40 %
	4.01	16	78.55 %
(Vásquez Saavedra, 2023)	6.89	25	92.16 %
	4.25	25	87.53 %

4.5. Comportamiento del pH con la dosificación de PAC

En la Figura 16 se muestra el pH final en relación con la dosis de PAC para los primeros 4 ensayos, ya que los demás siguen la misma tendencia. Los detalles de los ensayos adicionales se encuentran en la sección 2 del apartado Anexos. Se observa claramente que a medida que aumenta la dosis de PAC, el pH disminuye, lo que indica una correlación negativa entre estos dos parámetros.

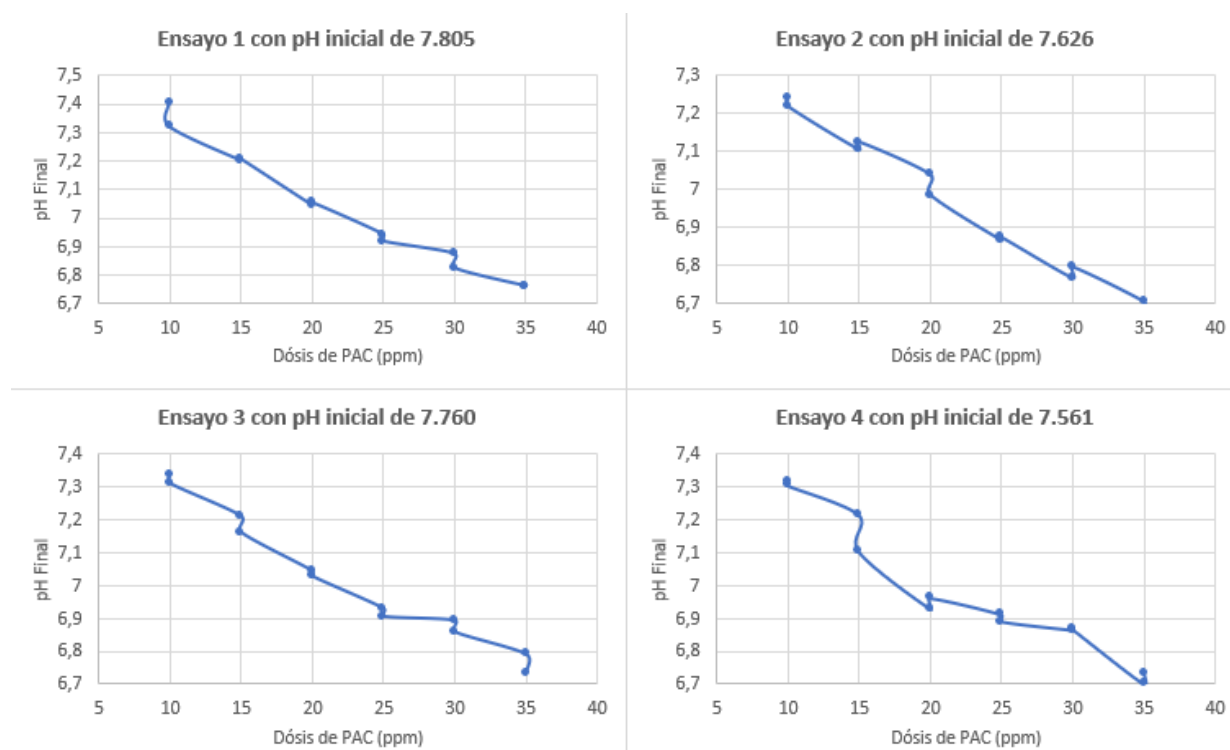


Figura 16. Correlación entre el pH final y la dosis de PAC de los primeros 4 ensayos.

Mediante un análisis de regresión lineal múltiple realizado con el software RStudio, se generó el modelo de correlación, representado en la Ecuación 6. Los p-value, obtenidos en este análisis, fueron de 1.77×10^{-8} para el pH del agua cruda y de 2×10^{-16} para la dosis de coagulante en relación con el pH final. Estos resultados indican claramente la existencia de una correlación entre el pH final con el pH del agua cruda y la cantidad de PAC utilizada. Esta correlación se respalda con un coeficiente de determinación de 0.7214.

$$pH_{Final} = 1.13 + 0.82 * pH_{Inicial} - 6.336 * Dosis \quad \text{Ec. 6}$$

4.5.1. Rango óptimo de pH en relación con la dosificación de PAC

Es importante mencionar que el rango de pH óptimo del PAC está entre 4 y 8, y en ninguno de los ensayos el pH del agua cruda sale de estos límites, por lo que en cada una de las pruebas se trabajó con un pH óptimo para usar el PAC, esto se puede evidenciar en la Tabla 4.

De acuerdo con la norma NTE INEN 1108:2020 el rango de pH para el agua potable se debe mantener entre 6.5 y 8, y analizando el pH después de los ensayos en la Tabla 4 en las dosificaciones óptimas se puede observar que se mantienen en un rango entre 6.63 y 7.045. Por lo que al aplicar la dosificación óptima en cada una de las pruebas mantiene el pH estipulado en norma, por lo que no hace falta realizar correcciones de pH después de la aplicación del coagulante.

Tabla 4. Comparación del pH antes y después de los ensayos de dosificación.

Número de ensayo	pH Inicial	pH Final	Diferencia de pH
1	7.805	7.045	1.004
2	7.626	6.866	0.899
3	7.76	6.906	0.76
4	7.561	6.962	0.599
5	7.62	6.759	0.765
6	7.685	6.919	0.878
7	7.489	6.63	0.854
8	7.623	6.858	0.766
9	7.681	6.677	0.861
10	7.645	6.746	0.76
11	7.568	6.69	0.859
Promedio	7.642	6.823	0.819

Realizando el promedio de pH del agua cruda y el pH después de cada una de las pruebas de la dosificación óptimas, se tiene una diferencia de 0.819 de pH.

Se observa el comportamiento de disminución de pH en otros estudios como en el de Chávez & Salazar (2019) que su pH disminuyó en 0.34 unidades o en el estudio realizado por Patiño Ullauri

& Vallejo Chuchuca (2022) en donde su pH disminuyó a 0.48 unidades. Esta diferencia puede deberse a que en los dos estudios se usa una concentración menor de PAC y también se utilizan floculantes distintos, lo que puede modificar esta diferencia. En cambio, en el estudio realizado por Wei et al. (2015), se observa que en dosificaciones de PAC de entre 0.125 a 32 ppm, la diferencia de pH es de alrededor de 1 unidad, lo que se asemeja a los resultados obtenidos.

4.6. Regresión multivariada

Para establecer la relación que existe entre un conjunto de variables y una variable dependiente se utiliza la regresión multivariada. Como en la regresión logarítmica se observa la relación entre dosis de PAC y la turbiedad final después de las pruebas, se desea saber la relación que existe con las demás variables como color del agua cruda, turbiedad del agua cruda, pH del agua cruda, la temperatura del agua cruda y la conductividad del agua cruda. En este caso se decide usar el porcentaje de remoción de la turbiedad como variable dependiente, por el hecho de que se está analizando cómo estos distintos parámetros afectan a la eficiencia del PAC y esta eficiencia está mejor expresada en el porcentaje de remoción de la turbiedad.

4.6.1. Selección de los mejores predictores

Con el software Minitab y mediante la metodología de Stepwise se observa la relación que existe entre el porcentaje de remoción de la turbiedad con los parámetros iniciales, es decir, la relación con la turbiedad del agua cruda, color del agua cruda, pH del agua cruda, temperatura del agua cruda, conductividad del agua cruda y dosis de PAC suministrada al agua cruda. Es decir, en este análisis se toman en cuenta todos los datos obtenidos (un total de 132 datos, contando los duplicados). Estos datos están expresados en la parte de Anexos, desde la Tabla 11 hasta la Tabla 21. En donde se modeló la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Remoción de } T = \beta_0 + \beta_1 D + \beta_2 T_0 + \beta_3 C_0 + \beta_4 pH_0 + \beta_5 Tem_0 + \beta_6 Con_0 \quad \text{Ec. 7}$$

En donde:

β_i : El coeficiente que acompaña a cada parámetro.

% Remoción de T: Es el porcentaje de remoción de turbiedad.

D: Dosis de PAC suministrada al agua cruda.

T_0 : Turbiedad del agua cruda.

C₀: Color del agua cruda.

pH₀: pH del agua cruda.

Tem₀: Temperatura del agua cruda.

Con₀: Conductividad del agua cruda.

Se realizan las combinaciones de cada factor, evaluando la calidad de su ajuste y su simpleza con el fin de determinar los parámetros más influyentes. Para evaluar la calidad del modelo y guiar el proceso de selección de variables se utiliza el criterio de Akaike (AIC), que mientras menor es su valor, mejor es el ajuste del modelo y aumenta la simpleza de este. En la Tabla 5 se analiza lo mencionado:

Tabla 5. Evaluación de la calidad del modelo de Stepwise.

Iteración	Variables Independientes analizadas	Valor de AIC	Variables Independientes eliminadas
1	D, T ₀ , C ₀ , pH ₀ , Tem ₀ , Con ₀	-365.77	Con ₀
2	D, T ₀ , C ₀ , pH ₀ , Tem ₀	-367.88	C ₀
3	D, T ₀ , pH ₀ , Tem ₀	-368.73	Tem ₀
4	D, T ₀ , pH ₀	-368.9	

Las combinaciones de las variables independientes analizadas que proporcionan el mejor ajuste se mantienen en D, T₀ y pH₀. Eliminar cualquiera de ellas resulta en un aumento del valor de AIC, lo que indica un empeoramiento en el ajuste del modelo. Por lo tanto, se concluye que las variables que tienen el mayor impacto en el porcentaje de remoción de turbiedad son la dosis de PAC agregada al agua cruda, la turbiedad inicial del agua cruda y el pH del agua cruda.

$$\% \text{ Remoción de } T = -7.345484 + 0.00702 * D + 0.087883 * T_0 + 0.988408 * pH_0 \quad \text{Ec. 8}$$

4.6.2. Significancia de las variables independientes

Los coeficientes de regresión son estadísticamente significativos para el modelo de regresión multivariada escogido. El modelo tiene un p-value es de 5.353×10^{-7} , lo que significa que se rechaza la hipótesis nula y se concluye que existe una relación significativa entre las variables

independientes (D, T₀, pH₀) asociada a ese coeficiente y la variable de respuesta (porcentaje de remoción de turbiedad) en el modelo. En la Tabla 6 se puede observar los p-value de cada una de las variables, en donde se observa que las tres variables independientes tienen un p-value menor a 0.05 por lo que las tres tienen una relevancia significativa en el porcentaje de remoción de la turbiedad.

Tabla 6. p-value de cada parámetro del modelo de regresión multivariada.

Variable independiente	p-value
Intercepto	0.00204
T ₀	4.99 x10 ⁻⁷
pH ₀	0.00137
D	0.00546

Para el modelo de regresión multivariada representado en la Ecuación 8, que nos brinda el software RStudio se obtiene un coeficiente de determinación de 0.2202, por lo que el 22.02% de los datos y la varianza y los modelos son explicados por el modelo, el 77.98% no se explica con el modelo de regresión.

4.6.3. Optimización del modelo de regresión multivariada

Debido a que el ajuste presentado en la Ecuación 8 es bastante bajo, se utiliza el software Minitab para tener un mayor número de interacciones entre variables. Se va a tomar en cuenta las interacciones cuadráticas de cada variable y la interacción entre variables, es decir, las interacciones presentadas en la Ecuación 9.

$$\% \text{ Remoción de } T = \beta_0 + \beta_1 D + \beta_2 T_0 + \beta_3 pH_0 + \beta_4 D * pH_0 + \beta_5 T_0 * pH_0 + \beta_6 D * T_0 + \beta_7 D^2 + \beta_8 T_0^2 + \beta_9 pH_0^2 \quad \text{Ec. 9}$$

A la par también se utiliza una metodología de “Stepwise”, que ayuda a seleccionar el mejor modelo de regresión entre varias combinaciones posibles de variables independientes. Aplicando este método en el software Minitab se obtiene el modelo presentado en la Ecuación 10:

$$\% \text{ Remoción de } T = -2079 - 78.4 D + 1798 T_0 + 250 pH_0 + 0.733 D * T_0 - 226.2 T_0 * pH_0 + 11.92 D * pH_0 - 0.3129 D^2 + 12.82 T_0^2 \quad \text{Ec. 10}$$

En la Tabla 7 se puede observar el p-value de cada uno de los parámetros y sus interacciones, en donde cada una de ellas son muy significativas para el modelo. Se puede observar que el pH₀ y el intercepto son dos parámetros no significativos, pero las interacciones del pH₀ si lo son.

Tabla 7. Coeficientes del modelo de regresión multivariado corregido.

Término	Coeficiente	Error estándar del coeficiente	T-value	p-value
Constante	-2079	1114	-1.87	0.064
Turbiedad _l	1798	533	3.37	0.001
Dosis	-78.4	20.5	-3.82	0.000
pH_Inicial	250	143	1.75	0.083
Turbiedad _l *Turbiedad _l	-12.82	3.04	-4.22	0.000
Dosis*Dosis	-0.3129	0.0255	-12.28	0.000
Turbiedad _l *Dosis	0.733	0.146	5.03	0.000
Turbiedad _l *pH_Inicial	-226.2	67.7	-3.34	0.001
Dosis*pH_Inicial	11.92	2.65	4.49	0.000

Para el modelo de regresión multivariada representado en la Ec. 10, que nos brinda el software Minitab se obtiene un coeficiente de determinación ajustado de 0.6912, por lo que el 69.12 % de los datos y la varianza y los modelos son explicados por el modelo, el 30.88% no se explica con el modelo de regresión. Este tiene un ajuste de regresión bastante mayor al modelo presentado en la Ecuación 8, por lo que se elige para representar las variables que influyen en el porcentaje de remoción de la turbiedad.

Para este modelo también se puede obtener las gráficas de la metodología de superficie como se expresa en la Figura 17 y Figura 18, en donde se mantiene el pH₀ fijo, ya que no es estadísticamente significativo, y se grafica el porcentaje de remoción de la turbiedad, D y T₀.

Gráfica de superficie de Remoción de Turbiedad vs. T0;D

Valores fijos
pH_Inicial 7,64209090909091

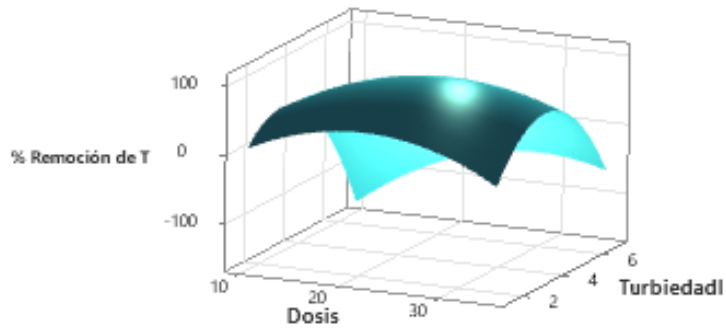


Figura 17. Gráfica 1 de superficie para el modelo de regresión multivariada.

Gráfica de superficie de Remoción de Turbiedad vs. T0;D

Valores fijos
pH_Inicial 7,64209090909091

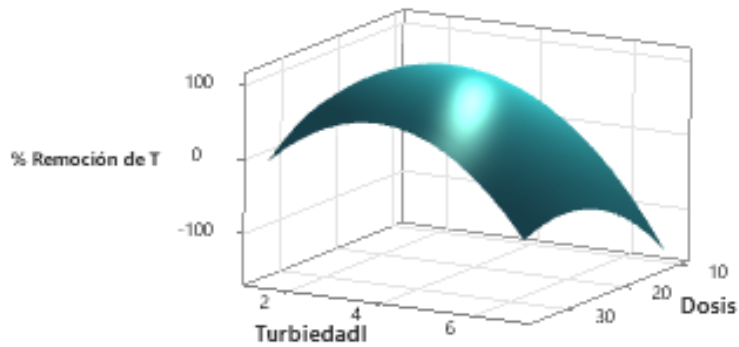


Figura 18. Gráfica 2 de superficie para el modelo de regresión multivariada.

4.7. Metodología de superficie de respuesta

4.7.1. Creación del diseño de superficie de respuesta

Como variable de respuesta se va a analizar el porcentaje de remoción de la turbiedad, con el fin de tener la eficiencia de remoción en cada ensayo, y como variables independientes la turbiedad del agua cruda y la dosis de PAC aplicada, que son dos de las tres variables más importantes del análisis de regresión multivariado, se omite el pH del agua cruda ya que resultó no ser significativo estadísticamente en la regresión multivariada. En donde:

Remoción_de_Turbiedad: Es el porcentaje de remoción de turbiedad.

TurbiedadI: Turbiedad del agua cruda.

Dosis: Dosis de PAC suministrada al agua cruda.

4.7.2. Resultados del modelo

En la Tabla 8 se observa que en el modelo (la variable de turbiedad del agua cruda y de la dosis de PAC aplicada), la interacción cuadrática y la interacción entre ellas es significativa, ya que tienen un p-value menor a 0.05, por lo que el modelo explica cómo varía la remoción de la turbiedad con respecto a las dos variables de respuesta mencionadas de manera significativa.

Tabla 8. Análisis de la varianza del modelo de superficie de respuesta.

Término	Coefficiente	Error estándar del coeficiente	T-value	p-value
Constante	-123.9	19.0	-6.52	0.000
TurbiedadI	25.68	7.40	3.47	0.001
Dosis	13.60	1.40	9.74	0.000
TurbiedadI*TurbiedadI	-3.353	0.811	-4.13	0.000
Dosis*Dosis	-0.3129	0.0296	-10.57	0.000
TurbiedadI*Dosis	0.359	0.139	2.59	0.011

Se obtiene la ecuación del modelo con cada una de sus interacciones:

$$\text{Remoción_de_Turbiedad} = -123.9 + 25.68 \text{ TurbiedadI} + 13.60 \text{ Dosis} - 3.353 \text{ TurbiedadI} * \text{TurbiedadI} - 0.3129 \text{ Dosis} * \text{Dosis} + 0.359 \text{ TurbiedadI} * \text{Dosis} \quad \text{Ec.11}$$

Con la Ecuación 11 se obtiene un coeficiente de determinación de 0.5738, por lo que el 57.38% de los datos y la varianza y los modelos son explicados por el modelo, el 42.62% no se explica

con el modelo de superficie de respuesta. Este resumen se puede observar en la Sección 3 de Anexos, en la Tabla 25.

En la Figura 19 se representa el diagrama de Pareto de efectos estandarizados, que nos permite observar qué parámetros tienen mayor influencia en el modelo. Como se mencionó anteriormente, cada uno de los parámetros y sus combinaciones tienen una influencia significativa, pero la relación cuadrática de la dosis tiene un mayor peso, seguida de la relación lineal de la turbiedad inicial, la relación lineal de la dosis, la relación cuadrática de la turbiedad inicial y finalmente con menor influencia, pero aún significativa, el producto de estos dos parámetros.

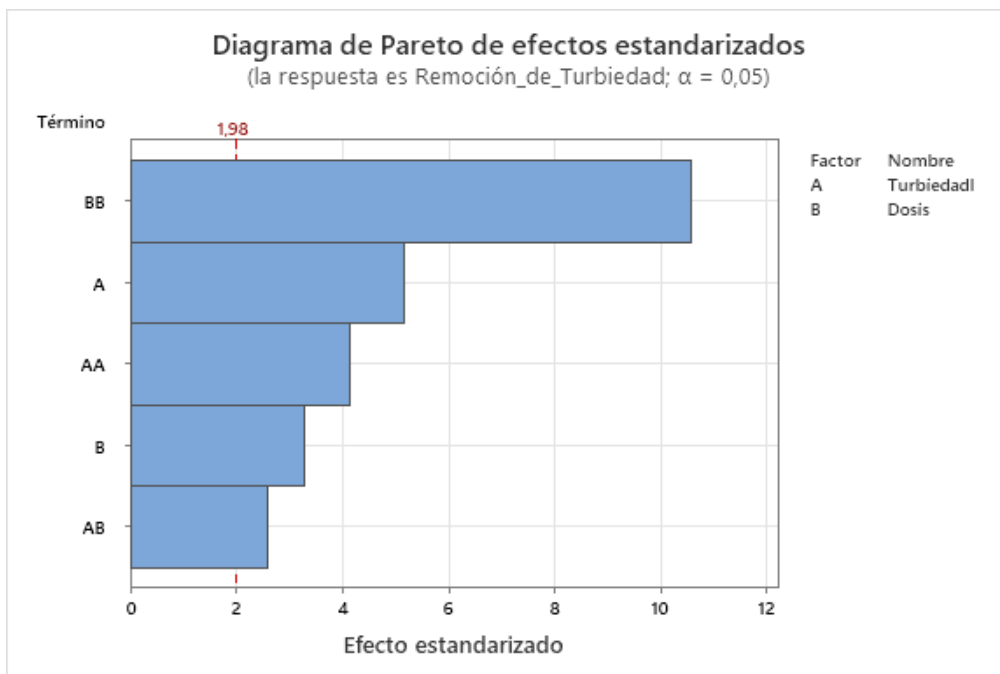


Figura 19. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados.

4.7.3. Gráfica de Superficie de respuesta

En la Figura 20 y Figura 21, se observan las Gráficas de superficie de respuesta, en donde se puede evidenciar que a medida que la turbiedad del agua cruda aumenta, se obtiene un porcentaje de remoción más elevados y la dosis de PAC también aumenta, pero siempre manteniéndose en el rango de 15 a 25 ppm.

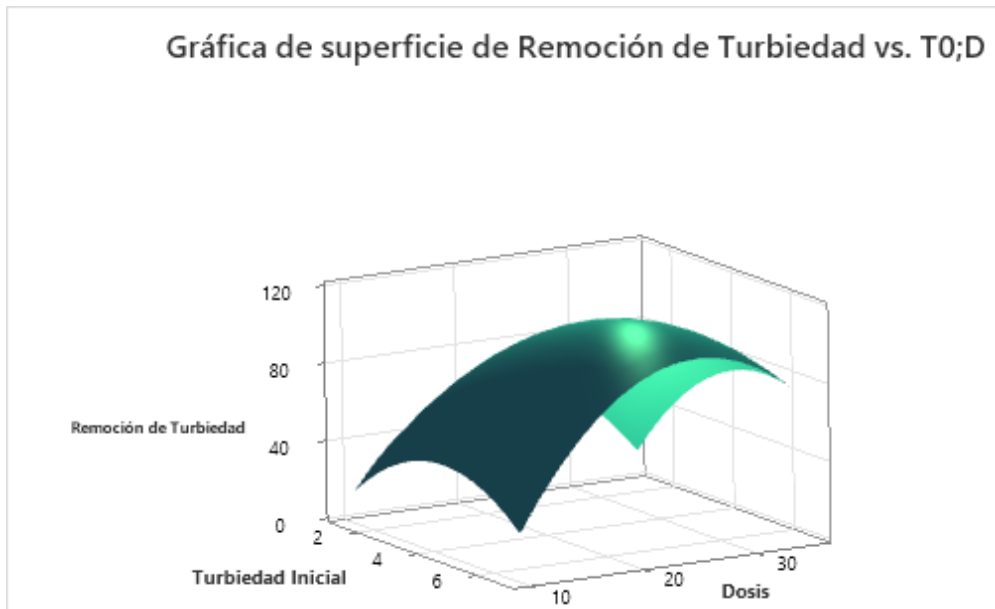


Figura 20. Gráfica 1 de superficie de respuesta de la interacción entre el % de remoción de turbiedad vs la T₀; D.

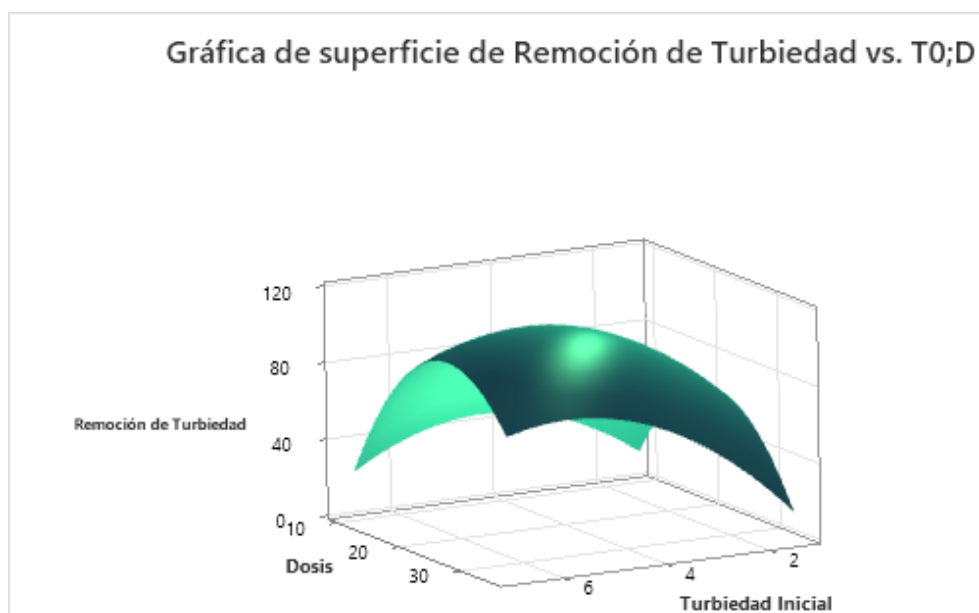


Figura 21. Gráfica 2 de superficie de respuesta de la interacción entre el % de remoción de turbiedad vs la T₀; D.

Los resultados indican que la regresión multivariada permite identificar los parámetros que influyen en el porcentaje de remoción de turbiedad y determinar cuándo alcanza sus niveles óptimos. Esto se respalda mediante gráficas de superficie de respuesta que facilitan la visualización de esta relación de manera más efectiva.

Capítulo V

5. Conclusión y recomendaciones

5.1. Conclusiones

La prueba de jarras permitió replicar el proceso de coagulación-floculación, esto posibilitó la obtención de la dosis óptima de coagulante dependiendo de la turbiedad que tenga el agua cruda. Mediante estas pruebas con el agua cruda recogida en la Planta de Tratamiento de Agua Potable de Tixán se obtuvo las siguientes conclusiones:

- Se determinó la dosis óptima de floculante PA que funciona mejor en conjunto con el PAC a través de la prueba de jarras. Los resultados indicaron una concentración de 1.5 ppm, la cual coincide con los hallazgos de otros autores en estudios previos.
- Se obtuvieron datos de un rango de turbiedades relativamente bajas, ya que a pesar de que se realizó la recolección de las muestras en los días en donde se tenía mayor precipitación, no fue lo suficiente para aumentar la turbidez del agua de manera abrupta, por lo que se obtuvieron turbiedades menores a 6.89 NTU. Esto concuerda con el histórico de la planta, en donde el 90% del tiempo se mantiene debajo de 11.4 NTU.
- Se observó que las remociones máximas de turbidez se mantienen a concentraciones de 15, 20 y 25 ppm de PAC. Concentraciones superiores o inferiores de PAC resultan en una disminución en la eficacia de la remoción de turbidez, ya sea debido a la insuficiente presencia de coagulante o al efecto de la sobrecoagulación.
- Se observó que concentraciones muy bajas no lograban una reducción significativa de la turbidez, mientras que concentraciones excesivamente altas conducían a la sobrecoagulación. La sobrecoagulación resultaba en un aumento de la turbidez del agua debido a la presencia de microflóculos que permanecían en suspensión. Además, el exceso de coagulante puede obstaculizar los procesos de potabilización subsiguientes.
- Se comprobó que el pH del agua cruda se mantiene en el rango óptimo de trabajo del PAC en cada uno de los ensayos, es decir, se mantiene siempre en un pH entre 4 y 8. Esto coincide con los registros del histórico de la planta, por lo que, con respecto al pH, puede usar el PAC de manera óptima en el agua cruda de la planta.
- A pesar del carácter ácido del PAC, en ninguna de las dosificaciones óptimas el pH se salía del rango estipulado en la norma NTE INEN 1108:2020 AGUA PARA

CONSUMO HUMANO. REQUISITOS, ya que se mantenía en rango entre 6.63 y 7.045. Por lo que no hace falta realizar correcciones de pH después de su aplicación.

- El pH disminuyó a medida que la dosis de coagulante aumentaba, por lo que se hacía evidente que existía una correlación entre el pH final con las dosis de PAC suministrada y el pH del agua cruda, además, mediante un análisis de regresión multivariado, se demostró que estos dos factores son significativos. Esto es debido a que el PAC en solución al 1% tiene un carácter ácido, entre 3.5 y 5 según su ficha técnica (Figura 31 y 32 en Anexos), por lo que disminuye el pH de cada jarra a medida que aumenta su dosificación.
- Se puede usar la curva de dosificación óptima de coagulante para determinar la cantidad a aplicar cuando se tenga una determinada turbiedad del agua cruda, pero se recomienda utilizar la ecuación en conjunto con la curva, con el fin de obtener una buena clarificación del agua cruda.
- Se demostró que es primordial trabajar con la dosificación óptima de coagulante, ya que con dosis menores no hay suficiente cantidad de PAC para neutralizar las partículas y formar flóculos efectivos. Por otro lado, una dosis excesiva de PAC puede causar la inversión de la carga de las partículas y su reestabilización, lo que resulta en flóculos más pequeños y menos densos. En ambos casos, en lugar de reducir la turbidez, se observa un aumento en la misma.
- Se determinó la eficiencia de remoción de la turbiedad y el color del agua cruda con el policloruro de aluminio en conjunto con el polímero aniónico, en donde en todos los ensayos cumplieron los parámetros de la Norma NTE INEN 1108:2020 AGUA PARA CONSUMO HUMANO. REQUISITOS. Todos los ensayos tuvieron una turbiedad menor a 5 NTU y color menor a 15 UC. Incluso, todos los ensayos nos permitieron tener una turbiedad menor a 0.62 NTU con la dosis óptima, lo que es 8 veces menor que lo estipulado en la norma, teniendo un promedio de 0.5 NTU de turbiedad final con la dosis óptima.
- Se obtuvo una curva de dosificación óptima que se ajustó a un modelo logarítmico, con el cual puede proveerse el uso de la dosificación de coagulante en un determinado rango de turbiedad de agua cruda.
- Mediante la regresión multivariada se obtuvo que, de todos los parámetros iniciales, la dosificación de PAC, la turbiedad del agua cruda y sus algunas interacciones son

estadísticamente significativas para el porcentaje de remoción de la turbiedad. Por lo que estos parámetros se deben tomar en cuenta al realizar la dosificación.

- Mediante el modelo de regresión multivariada y sus respectivas gráficas de superficie de respuesta, se puede observar que, a mayor turbiedad inicial, mayor es la dosis de PAC que se debe suministrar y mayor es el porcentaje de remoción de turbiedad, destacando que la dosis siempre se debe mantener entre 15 y 25 ppm de PAC.
- Se demostró que los principales parámetros que afectan el porcentaje de remoción de turbiedad son la dosis de PAC suministrada y la turbidez del agua cruda. Con la ecuación y las gráficas de superficie de respuesta se puede observar que la eficiencia de remoción es mayor a turbiedades más elevadas.
- Se observa que muchas de las turbiedades del agua cruda cumplen con el estándar de turbidez (menos de 5 NTU) de la Norma NTE INEN 1108:2020 AGUA PARA CONSUMO HUMANO. REQUISITOS sin realizar el proceso de coagulación-floculación, pero este proceso sigue siendo necesario, ya que existen sólidos en suspensión, partículas no detectadas, microorganismos y patógenos que deben eliminarse. Estas partículas entorpecen los siguientes procesos de sedimentación y filtración, debido a que las partículas no se sedimentan en el fondo y en los procesos de filtración las partículas que pudieron ser sedimentadas pasan a través del filtro y pueden interferir con otros procesos y reactivos. Además, el proceso de coagulación-floculación mejora la calidad del agua tratada al reducir la carga de sólidos y mejorar su apariencia, sabor y olor como se ha demostrado en este estudio.

5.2. Recomendaciones

- Con el motivo de observar la rentabilidad se recomienda que se compare los costos que tiene trabajar con el sulfato de aluminio y con el PAC, ya que la parte económica es de vital importancia para la operación de la planta.
- Si se decide utilizar el PAC, se recomienda seguir con los análisis de prueba de jarras para mejorar los resultados obtenidos y observar el comportamiento del compuesto en diferentes turbiedades, sobre todo en turbiedades más elevadas.
- El proceso de coagulación mediante sales metálicas se ven perjudicados por la baja temperatura, sobre todo el sulfato de aluminio, por lo que es recomendable trabajar con coagulantes que se vean menos afectados por la temperatura como el PAC, por las bajas temperaturas a las que puede llegar la ciudad de Cuenca. Esto debido a que

en el análisis multivariada el PAC no mostró ser significativo con respecto a su rendimiento, por lo que su influencia no fue significativa en este estudio.

Referencias

- Abad Durán, D. I., & Guaraca Vásquez, J. E. (2022). *Evaluación técnica del proceso de filtración rápida y cloración en la Planta de Tratamiento de Agua Tixán*. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/39400>
- Afifi, A., May, S., Donatello, R., & Clark, V. (2020). *Practical Multivariate Analysis* (6 th). CRC Press.
- American Water Works Association. (2011). *Operational control of coagulation and filtration processes*. (3rd ed.). American Water Works Association.
- Bratby, J. (2016). *Coagulation and Flocculation in Water and Wastewater Treatment* (3 rd). IWA.
- Buitrago León, I., Corzo Delgado, C., & Cardona Lindo, C. (2015). *Guía básica para operadores de plantas de tratamiento de agua* (Primera). Gente Nueva.
- Caviedes Rubio, D. I., Muñoz Calderón, R. A., Perdomo Gualtero, A., Rodríguez Acosta, D., & Sandoval Rojas, I. J. (2015). Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales. Una Revisión. *Ingeniería y Región*, 13(1), 73. <https://doi.org/10.25054/22161325.710>
- Chaves Vásquez, D. (2013). *DETERMINACIÓN DE LAS MEJORES CONDICIONES TÉCNICAS A UTILIZAR EN LA UNIDAD DE ACONDICIONAMIENTO PARA EL AGUA DE ENFRIAMIENTO DEL CENTRO DE GENERACIÓN MOÍN* [Ciudad Universitaria Rodrigo Facio]. <http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/bitstream/123456789/1865/1/35324.pdf>
- Chávez, C., & Salazar, E. (2019). *EFICIENCIA DEL FLOCULANTE SULFATO DE ALUMINIO Y POLIFLOC (POLICLORURO DE ALUMNIO) EN LA REMOCION DE METALES Y DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES DE UNA EMPRESA MINERA EN CAJAMARCA, 2019* [Universidad Privada del Norte]. <https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/23840/Ch%C3%A1vez%20Villanueva%20Cristian%20-%20Salazar%20Torres%20Edgar%20Javier.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Díaz Mejía, W. H., Gonzaga Linares, B., & Contreras Coronel, N. (2017). Determinación del coagulante que permita la máxima remoción de fosfatos en agua cruda del río Otún. *Scientia Et Technica*, 607–612. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84934103>
- Dwarapureddi, B., & Saritha, V. (2015). Evaluation of factors affecting coagulation of water with Natural Polymers. *Advanced Research in Biological Sciences*, 2(6), 98–113. https://www.researchgate.net/publication/312595597_Evaluation_of_factors_affecting_coagulation_of_water_with_Natural_Polymers

- El-taweel, R. M., Mohamed, N., Alrefaey, K. A., Husien, S., Abdel-Aziz, A. B., Salim, A. I., Mostafa, N. G., Said, L. A., Fahim, I. S., & Radwan, A. G. (2023). A review of coagulation explaining its definition, mechanism, coagulant types, and optimization models; RSM, and ANN. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 6, 100358. <https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2023.100358>
- ETAPA EP. (2015). *Diseño hidráulico y sanitario de la ampliación de la planta de tratamiento de agua potable de Tixán - Módulo II*. https://www.etapa.net.ec/Portals/0/Documentos/convocatoriatican/12.MEMORIAS_TECNICAS_PARTE_1.pdf
- Fúquene, D. M., & Yate, A. V. (2018). *Ensayo de jarras para el control del proceso de coagulación en el tratamiento de aguas residuales industriales*. <https://doi.org/10.22490/ECAPMA.2771>
- Ghernaout, D. (2020). Water Treatment Coagulation: Dares and Trends. *OALib*, 07(08), 1–18. <https://doi.org/10.4236/oalib.1106636>
- Grenda, K., Gamelas, J. A. F., Arnold, J., Cayre, O. J., & Rasteiro, M. G. (2020). Evaluation of Anionic and Cationic Pulp-Based Flocculants With Diverse Lignin Contents for Application in Effluent Treatment From the Textile Industry: Flocculation Monitoring. *Frontiers in Chemistry*, 8. <https://doi.org/10.3389/fchem.2020.00005>
- Gutiérrez, H., & De la Vara, R. (2012). *Análisis y diseño de experimentos* (3era ed.). McGraw-Hill.
- Guzmán Rivas, J. (2017). *EVALUACIÓN TÉCNICA DE LA ETAPA COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN PARA EL MEJORAMIENTO EN EL PROCESO DE POTABILIZACIÓN DE LA PLANTA GALÁN DE LA EAAAZ* [Fundación Universidad de América]. <http://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/6580/1/6102499-2017-2-IQ.pdf.pdf>
- Hair, J., Black, W., Babin, B., & Anderson, R. (2019). *Multivariate Data Analysis* (8 th). Cengage.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2013). *NTE INEN 2176: AGUA. CALIDAD DEL AGUA. MUESTREO. TÉCNICAS DE MUESTREO*. <https://gestionambiental.pastaza.gob.ec/download/nte-inen-2176-1-agua-calidad-de-agua-muestreo-y-tecnicas-de-muestreo/>
- Junta de Castilla y León. (2016). *Manual de tratamientos del agua de consumo humano*. <https://www.saludcastillayleon.es/es/aguasdeconsumo/manual-tratamientos-agua-consumo-humano>
- Krupińska, I. (2020). Aluminium Drinking Water Treatment Residuals and Their Toxic Impact on Human Health. *Molecules*, 25(3), 641. <https://doi.org/10.3390/molecules25030641>

- Kurniawan, S., Abdullah, S., Imron, M., Said, N., Ismail, N., Hasan, H., Othman, A., & Purwanti, I. (2020). Challenges and Opportunities of Biocoagulant/Bioflocculant Application for Drinking Water and Wastewater Treatment and Its Potential for Sludge Recovery. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(24), 9312. <https://doi.org/10.3390/ijerph17249312>
- Mackenzi, D. (2020). *Water and Wastewater Engineering: Design Principles and Practice* (McGraw-Hill/INTERAMERICANA EDITORES, Ed.; 2 nd). McGraw-Hill.
- Matías Cervantez, C., López León, S., Matías Pérez, D., & García Montalvo, I. (2018). El aluminio empleado en el tratamiento de aguas residuales y su posible relación con enfermedad de Alzheimer. *Negative & No Positive Results*, 139–143. <https://doi.org/10.19230/jonnpr.1704>
- Melo, O., López, L., & Melo, S. (2020). *Diseño de Experimentos Métodos y Aplicaciones*. Universidad Nacional de Colombia.
- Nath Das, R. (2014). *Robust Response Surfaces, Regression, and Positive Data Analyses* (1st ed.). CRC Press.
- Organización de las Naciones Unidas. (2023). *Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>
- Ospina Zúñiga, O. E., & Cardona García, O. H. (2021). Evaluación de la contaminación por aluminio del agua para consumo humano, región central de Colombia. *Julio-Diciembre*, 17(2), 31–41. <https://doi.org/10.17981/ingecuc.17.2.2021.04>
- Pabón, S., Benítez, R., Sarria-Villa, R., & Gallo, J. (2020). Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción. Una revisión. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 14(27), 9–18. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-83672020000100009
- Patiño Ullauri, M. R., & Vallejo Chuchuca, B. A. (2022). *Evaluación de la dosificación de policloruro de aluminio sobre el rendimiento de la coagulación –floculación en la planta potabilizadora de la Junta Administradora de Agua Potable Regional Bayas* [Universidad de Cuenca]. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/39745>
- Rodríguez-Díaz, Y. J., Torregroza-Mozo, A. A., Mejía-Padilla, F., Atencia-Vargas, J. J., & Villero-González, 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>
- Salas Salvadó, J., Maraver Eizaguirre, F., Rodríguez-Mañas, L., Saenz de Pipaón, M., Vitoria Miñana, I., & Moreno Aznar, L. (2020). The importance of water consumption in health and disease prevention: the current situation. *Nutrición Hospitalaria*, 37(5), 1072–1086. <https://doi.org/10.20960/nh.03160>

- Samaniego, H., Arauco Esquivel, E., Rojas Bujaico, R., & Rojas Buaico, J. (2020). Optimización de la cantidad de coagulantes para la producción de agua potable en zonas de la sierra del Perú. *UCV-Scientia*, 12. <https://doi.org/10.18050/ucvs.v.12i1.2598>
- Sohrabi, Y., Rahimi, S., Nafez, A. H., Mirzaei, N., Bagheri, A., Ghadiri, S. K., Rezaei, S., & Charganeh, S. S. (2018). Chemical Coagulation Efficiency in Removal of Water Turbidity. *International Journal of Pharmaceutical Research*, 10(03), 188–194. <https://doi.org/10.31838/ijpr/2018.10.03.071>
- Spiegel, M., & Stephens, L. (2018). *Statistics* (McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, Ed.; 6 th). McGraw-Hill.
- Torra, A., Valero, F., Bisbal, L., & Tous, J. (1998). Policloruro de aluminio en el proceso de potabilización de aguas superficiales su comportamiento como coagulante dentro del ámbito de la química del aluminio. *Tecnología del agua*, 58–67. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=82024>
- Valdivia-Medina, R., Pedro-Valdés, S., & Laurel-Gómez, M. (2010). AGUA PARA USO EN LABORATORIOS. *INIMET*, 1, 3–10. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223017807002>
- Van Dyke, N., Yenugadhati, N., Birkett, N. J., Lindsay, J., Turner, M. C., Willhite, C. C., & Krewski, D. (2021). Association between aluminum in drinking water and incident Alzheimer's disease in the Canadian Study of Health and Aging cohort. *NeuroToxicology*, 83, 157–165. <https://doi.org/10.1016/j.neuro.2020.04.002>
- Vargas Rodríguez, Y., Obaya Valdivia, A., & Vargas Rodríguez, I. (2015). *Regresión polinómica, una competencia indispensable para el tratamiento de datos en Cinética Química*. <http://www2.izt.uam.mx/newpage/contactos/revista/98/pdfs/regresion.pdf>
- Wang, L., Hung, Y.-T., & Shammass, N. (2005). *Physicochemical Treatment Processes* (3rd ed.). Human Press Inc.
- Wei, N., Zhang, Z., Liu, D., Wu, Y., Wang, J., & Wang, Q. (2015). Coagulation behavior of polyaluminum chloride: Effects of pH and coagulant dosage. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 23(6), 1041–1046. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2015.02.003>
- Wei Sheng, D., Roil Bilad, M., & Shamsuddin, N. (2023). Assessment and Optimization of Coagulation Process in Water Treatment Plant: A Review. *ASEAN*, 3(1), 79–100. <https://ejournal.upi.edu/index.php/AJSE/article/view/45035>
- Zarei Mahmudabadi, T., Ebrahimi, A. A., Eslami, H., Mokhtari, M., Salmani, M. H., Ghaneian, M. T., Mohamadzadeh, M., & Pakdaman, M. (2018). Optimization and economic evaluation of modified coagulation–flocculation process for enhanced treatment of ceramic-tile industry wastewater. *AMB Express*, 8(1), 172. <https://doi.org/10.1186/s13568-018-0702-4>

Anexos

Anexo A: Tablas de resultados de las pruebas de jarras para el PA.

Tabla 9. Resultados de la prueba de Jarras 1 para el floculante (PA).

Fecha de Toma de Muestra		2/3/2023		Fecha de la Prueba de Jarras		2/3/2023	
Hora de Toma de Muestra		9:00		Hora de la Prueba de Jarras		11:15	
Muestra	Turbiedad (NTU)	Color (UC)	pH	Temperatura (°C)	Conductividad (mV)	Prueba 1 de PA	
Agua Cruda	1,97	30	7,623	18,4	31,5		
Muestra	Turbiedad (NTU)	Color (UC)	pH	Temperatura (°C)	Conductividad (mV)	Remoción de Turbiedad (%)	
0,25	0,41	10	7,062	1111	63,3	79,1878%	
0,25	0,41	15	7	18,7	66,8	79,1878%	
0,5	0,43	5	7,111	18,7	60,5	78,1726%	
0,5	0,58	5	7,116	18,8	60,2	70,5584%	
0,75	0,61	10	7,084	18,8	62	69,0355%	
0,75	0,34	5	7,096	18,8	61,3	82,7411%	
1	0,71	10	7,106	18,9	60,8	63,9594%	
1	0,58	10	7,111	19	60,5	70,5584%	
1,25	0,48	5	7,091	19,1	61,6	75,6345%	
1,25	0,47	5	7,049	19,1	64	76,1421%	
1,5	0,41	5	7,073	19,2	62,6	79,1878%	
1,5	0,33	5	7,044	19,2	64,3	83,2487%	
1,75	0,53	15	7,039	19,3	64,5	73,0964%	
1,75	0,46	15	7,022	19,3	65,6	76,6497%	
2	0,44	10	7,018	19,3	65,7	77,6650%	
2	0,49	10	7,048	19,4	64	75,1269%	
Observaciones:		Ninguna					
Dosis óptima de PA (mg/ml)		1,5					

Tabla 10. Resultados de la prueba de Jarras 2 para el floculante (PA).

Fecha de Toma de Muestra		6/3/2023	Fecha de la Prueba de Jarras			6/3/2023	Prueba 2 de PA
Hora de Toma de Muestra		8:30	Hora de la Prueba de Jarras			11:20	
Muestra	Turbiedad (NTU)	Color (UC)	pH	Temperatura (°C)	Conductividad (mV)		
Agua Cruda	2,1	30	7,768	18	23,3		
Muestra	Turbiedad (NTU)	Color (UC)	pH	Temperatura (°C)	Conductividad (mV)		Remoción de Turbiedad (%)
0,25	0,39	10	7,062	18,8	63,3		81,4286%
0,25	0,37	15	7	18,7	66,8		82,3810%
0,5	0,42	5	7,111	18,7	60,5		80,0000%
0,5	0,51	5	7,116	18,8	60,2		75,7143%
0,75	0,44	10	7,084	18,8	62		79,0476%
0,75	0,46	5	7,096	18,8	61,3		78,0952%
1	0,4	10	7,106	18,9	60,8		80,9524%
1	0,46	10	7,111	19	60,5		78,0952%
1,25	0,54	5	7,091	19,1	61,6		74,2857%
1,25	0,5	5	7,049	19,1	64		76,1905%
1,5	0,35	5	7,073	19,2	62,6		83,3333%
1,5	0,37	5	7,044	19,2	64,3		82,3810%
1,75	0,51	15	7,039	19,3	64,5		75,7143%
1,75	0,45	15	7,022	19,3	65,6		78,5714%
2	0,45	10	7,018	19,3	65,7		78,5714%
2	0,41	10	7,048	19,4	64		80,4762%
Observaciones:		Ninguna					
Dosis óptima de PA (mg/ml)		1,5					

Anexo B: Tablas de resultados de las pruebas de jarras para el PAC.

Tabla 11. Resultados de la prueba de Jarras 1 para el coagulante (PAC).

Fecha de Toma de Muestra		3/3/2023		Fecha de la Prueba de Jarras		3/3/2023		Prueba 1 de PAC
Hora de Toma de Muestra		8:45		Hora de la Prueba de Jarras		11:00		
Muestra	Turbiedad (NTU)	Color (UC)	pH	Temperatura (°C)	Conductividad (mV)			
Agua Cruda	1,73	20	7,805	19,8	20,9			
Dosis de PAC por pr	Turbiedad (NTU)	Color (UC)	pH	Temperatura (°C)	Conductividad (mV)	Remoción de Turbiedad (%)		
10	1,28	15	7,404	19,8	43,7	26,01%		
10	1,21	15	7,32	19,8	48,6	30,06%		
15	0,68	10	7,201	19,9	55,3	60,69%		
15	0,64	10	7,207	19,9	51,6	63,01%		
20	0,39	5	7,045	20,1	64,2	77,46%		
20	0,39	5	7,054	20,2	66	77,46%		
25	0,4	5	6,942	20,1	70	76,88%		
25	0,41	5	6,918	20,3	71,4	76,30%		
30	0,42	5	6,874	20,5	73,8	75,72%		
30	0,44	5	6,824	20,5	76,6	74,57%		
35	0,39	5	6,761	20,5	80,1	77,46%		
35	0,34	5	6,762	20,5	80	80,35%		
Observaciones:		Ninguna						
Dosis óptima de PAC (mg/ml)		20						

Tabla 12. Resultados de la prueba de Jarras 2 para el coagulante (PAC).

Fecha de Toma de Muestra		9/3/2023		Fecha de la Prueba de Jarras		9/3/2023		Prueba 2 de PAC
Hora de Toma de Muestra		9:00		Hora de la Prueba de Jarras		11:45		
Muestra	Turbiedad (NTU)	Color (UC)	pH	Temperatura (°C)	Conductividad (mV)			
Agua Cruda	4,25	30	7,626	18,6	31,3			
Muestra	Turbiedad (NTU)	Color (UC)	pH	Temperatura (°C)	Conductividad (mV)	Remoción de Turbiedad (%)		
10	3,73	20	7,242	18,5	53	12,24%		
10	3,5	20	7,219	18	54,4	17,65%		
15	0,83	10	7,105	18,4	60,8	80,47%		
15	0,87	10	7,125	18,5	59,7	79,53%		
20	0,61	10	7,039	18,5	64,5	85,65%		
20	0,56	10	6,986	18,6	67,5	86,82%		
25	0,53	10	6,866	18,7	74,2	87,53%		
25	0,61	10	6,874	18,6	73,8	85,65%		
30	0,67	10	6,767	18,8	79,7	84,24%		
30	0,62	10	6,796	18,8	78,1	85,41%		
35	0,86	10	6,705	18,8	83,1	79,76%		
35	0,85	10	6,686	18,7	84,5	80,00%		
Observaciones:		Ninguna						
Dosis óptima de PAC (mg/ml)		25						

Tabla 13. Resultados de la prueba de Jarras 3 para el coagulante (PAC).

Fecha de Toma de Muestra		7/3/2023		Fecha de la Prueba de Jarras		7/3/2023		Prueba 3 de PAC
Hora de Toma de Muestra		8:35		Hora de la Prueba de Jarras		11:00		
Muestra	Turbiedad (NTU)	Color (UC)	pH	Temperatura (°C)	Conductividad (mV)	Remoción de Turbiedad (%)		
Agua Cruda	1,96	20	7,76	17,8	27,2			
10	2,04	15	7,337	17,8	47,7	-4,08%		
10	1,73	15	7,31	17,9	49,3	11,73%		
15	0,64	15	7,21	17,9	54,6	67,35%		
15	0,53	15	7,161	18,1	57,6	72,96%		
20	0,44	10	7,044	18,2	64,3	77,55%		
20	0,39	10	7,028	18,1	65,2	80,10%		
25	0,39	10	6,93	18,2	70,6	80,10%		
25	0,37	10	6,906	18,3	72	81,12%		
30	0,4	10	6,894	18,5	72,6	79,59%		
30	0,42	10	6,859	18,5	74,5	78,57%		
35	0,49	10	6,791	18,5	78,3	75,00%		
35	0,43	10	6,735	18,6	81,5	78,06%		
Observaciones:		Ninguna						
Dosis óptima de PAC (mg/ml)		25						

Tabla 14. Resultados de la prueba de Jarras 4 para el coagulante (PAC).

Fecha de Toma de Muestra		14/3/2023		Fecha de la Prueba de Jarras		14/3/2023		Prueba 4 de PAC
Hora de Toma de Muestra		9:20		Hora de la Prueba de Jarras		11:30		
Muestra	Turbiedad (NTU)	Color (UC)	pH	Temperatura (°C)	Conductividad (mV)	Remoción de Turbiedad (%)		
Agua Cruda	1,85	20	7,561	18,6	35			
10	1,8	15	7,316	17,7	48,9	2,70%		
10	1,81	15	7,306	17,7	49,4	2,16%		
15	0,53	10	7,216	17,7	54,5	71,35%		
15	0,5	10	7,104	17,8	57,5	72,97%		
20	0,5	10	6,93	18,1	70,7	72,97%		
20	0,46	10	6,962	18,1	68,9	75,14%		
25	0,5	10	6,912	18,2	71,6	72,97%		
25	0,52	10	6,891	18,2	72,8	71,89%		
30	0,84	10	6,865	18	74,2	54,59%		
30	0,7	10	6,867	18	74,6	62,16%		
35	2,01	10	6,7	17,7	83,4	-8,65%		
35	1,94	10	6,735	17,8	81,4	-4,86%		
Observaciones:		Ninguna						
Dosis óptima de PAC (mg/ml)		20						

Tabla 15. Resultados de la prueba de Jarras 5 para el coagulante (PAC).

Fecha de Toma de Muestra		16/3/2023		Fecha de la Prueba de Jarras		16/3/2023	
Hora de Toma de Muestra		8:00		Hora de la Prueba de Jarras		14:00	
Muestra	Turbiedad (NTU)	Color (UC)	pH	Temperatura (°C)	Conductividad (mV)	Prueba 5 de PAC	
Agua Cruda	2,69	30	7,62	15,7	32		
Muestra	Turbiedad (NTU)	Color (UC)	pH	Temperatura (°C)	Conductividad (mV)	Remoción de Turbiedad (%)	
10	2,59	20	7,233	17,6	53,16	3,72%	
10	2,61	20	7,248	17,5	52,7	2,97%	
15	0,51	10	7,049	17,6	63,9	81,04%	
15	0,55	10	7,057	17,7	63,5	79,55%	
20	0,47	10	6,959	18	69,6	82,53%	
20	0,53	10	6,892	17,8	72,8	80,30%	
25	0,46	10	6,759	17,8	80,1	82,90%	
25	0,46	10	6,771	17,8	79,4	82,90%	
30	0,53	10	6,765	18	79,7	80,30%	
30	0,53	10	6,727	18,1	81,9	80,30%	
35	0,55	10	6,651	18	86,1	79,55%	
35	0,56	10	6,614	18	88,1	79,18%	
Observaciones:				Ninguna			
Dosis óptima de PAC (mg/ml)				25			

Tabla 16. Resultados de la prueba de Jarras 6 para el coagulante (PAC).

Fecha de Toma de Muestra		23/3/2023		Fecha de la Prueba de Jarras		23/3/2023	
Hora de Toma de Muestra		8:25		Hora de la Prueba de Jarras		13:45	
Muestra	Turbiedad (NTU)	Color (UC)	pH	Temperatura (°C)	Conductividad (mV)	Prueba 6 de PAC	
Agua Cruda	2,51	20	7,685	20,3	27,6		
Muestra	Turbiedad (NTU)	Color (UC)	pH	Temperatura (°C)	Conductividad (mV)	Remoción de Turbiedad (%)	
10	1,36	15	7,358	19,8	46,3	45,82%	
10	0,93	15	7,308	19,8	49,1	62,95%	
15	0,57	15	7,13	19,9	59,4	77,29%	
15	0,57	15	7,106	20	60,7	77,29%	
20	0,56	10	7,074	19,8	62,5	77,69%	
20	0,61	10	7,029	19,8	65,1	75,70%	
25	0,48	5	6,919	19,9	71,3	80,88%	
25	0,52	5	6,892	19,9	72,8	79,28%	
30	0,54	5	6,773	20,5	79,5	78,49%	
30	0,49	5	6,782	20,5	78,8	80,48%	
35	0,55	10	6,703	20,5	83,3	78,09%	
35	0,54	10	6,661	20,5	85,7	78,49%	
Observaciones:				Ninguna			
Dosis óptima de PAC (mg/ml)				25			

Tabla 17. Resultados de la prueba de Jarras 7 para el coagulante (PAC).

Fecha de Toma de Muestra		28/4/2023	Fecha de la Prueba de Jarras			29/4/2023	Prueba 7 de PAC
Hora de Toma de Muestra		13:00	Hora de la Prueba de Jarras			8:00	
Muestra	Turbiedad (NTU)	Color (UC)	pH	Temperatura (°C)	Conductividad (mV)		
Agua Cruda	6,89	30	7,489	18,1	39,1		
Muestra	Turbiedad (NTU)	Color (UC)	pH	Temperatura (°C)	Conductividad (mV)		Remoción de Turbiedad (%)
10	4,56	20	7,098	18	61,2		33,82%
10	3,31	20	6,998	18	66,9		51,96%
15	1,2	15	6,847	18	75,3		82,58%
15	1,14	15	6,811	18	77,3		83,45%
20	0,85	10	6,809	18,1	77,3		87,66%
20	0,93	10	6,807	18,1	77,4		86,50%
25	0,54	5	6,63	18,2	87,3		92,16%
25	0,63	5	6,612	18,2	88,3		90,86%
30	0,79	10	6,575	18,4	90,3		88,53%
30	0,86	10	6,535	18,3	92,5		87,52%
35	2,06	15	6,437	18,3	98,3		70,10%
35	2,2	15	6,394	18,4	100,4		68,07%
Observaciones:		Ninguna					
Dosis óptima de PAC (mg/ml)		25					

Tabla 18. Resultados de la prueba de Jarras 8 para el coagulante (PAC).

Fecha de Toma de Muestra		12/5/2023	Fecha de la Prueba de Jarras			13/5/2023	Prueba 8 de PAC
Hora de Toma de Muestra		13:00	Hora de la Prueba de Jarras			7:30	
Muestra	Turbiedad (NTU)	Color (UC)	pH	Temperatura (°C)	Conductividad (mV)		
Agua Cruda	1,85	20	7,623	13	32,1		
Muestra	Turbiedad (NTU)	Color (UC)	pH	Temperatura (°C)	Conductividad (mV)		Remoción de Turbiedad (%)
10	1,75	15	7,115	13,1	60,4		5,41%
10	1,56	15	7,015	13,1	66		15,68%
15	0,58	10	6,873	13,4	73,7		68,65%
15	0,57	10	6,83	13,4	76,4		69,19%
20	0,52	5	6,858	14,5	74,5		71,89%
20	0,54	5	6,754	14,4	80,3		70,81%
25	0,58	10	6,635	14,6	86,7		68,65%
25	0,58	10	6,608	14,8	88,2		68,65%
30	0,6	10	6,555	15,6	91,2		67,57%
30	0,62	10	6,554	15,5	91,3		66,49%
35	0,84	10	6,452	15,6	96,9		54,59%
35	0,73	10	6,483	16	95,2		60,54%
Observaciones:		Ninguna					
Dosis óptima de PAC (mg/ml)		20					

Tabla 19. Resultados de la prueba de Jarras 9 para el coagulante (PAC).

Fecha de Toma de Muestra		15/5/2023		Fecha de la Prueba de Jarras		16/5/2023	
Hora de Toma de Muestra		11:30		Hora de la Prueba de Jarras		8:00	
Muestra	Turbiedad (NTU)	Color (UC)	pH	Temperatura (°C)	Conductividad (mV)	Prueba 9 de PAC	
Agua Cruda	1,35	20	7,681	13,8	28,8		
Muestra	Turbiedad (NTU)	Color (UC)	pH	Temperatura (°C)	Conductividad (mV)	Remoción de Turbiedad (%)	
10	1,44	15	6,994	12,5	67,2	-6,67%	
10	1,02	15	6,93	12,1	70,6	24,44%	
15	0,54	10	6,815	12,4	76,9	60,00%	
15	0,53	10	6,814	14	77	60,74%	
20	0,53	5	6,677	15,5	84,5	60,74%	
20	0,57	5	6,763	15,2	79,8	57,78%	
25	0,57	10	6,574	15,5	90,2	57,78%	
25	0,92	10	6,606	16,5	88,8	31,85%	
30	0,8	10	6,537	16,4	92,3	40,74%	
30	0,79	10	6,469	16,4	96	41,48%	
35	2,19	20	6,365	16,3	101,8	-62,22%	
35	2,19	20	6,348	16,6	102,7	-62,22%	
Observaciones:				Ninguna			
Dosis óptima de PAC (mg/ml)			15				

Tabla 20. Resultados de la prueba de Jarras 10 para el coagulante (PAC).

Fecha de Toma de Muestra		15/5/2023		Fecha de la Prueba de Jarras		16/5/2023	
Hora de Toma de Muestra		11:30		Hora de la Prueba de Jarras		8:00	
Muestra	Turbiedad (NTU)	Color (UC)	pH	Temperatura (°C)	Conductividad (mV)	Prueba 10 de PAC	
Agua Cruda	1,5	20	7,645	14,8	30,6		
Muestra	Turbiedad (NTU)	Color (UC)	pH	Temperatura (°C)	Conductividad (mV)	Remoción de Turbiedad (%)	
10	0,94	15	7,051	13,7	63,9	37,33%	
10	1,04	15	7,019	13,7	65,7	30,67%	
15	0,59	10	6,821	13,9	76,4	60,67%	
15	0,6	10	6,839	14,7	75,6	60,00%	
20	0,58	10	6,746	15,3	80,6	61,33%	
20	0,62	10	6,664	15,1	85,2	58,67%	
25	0,62	10	6,566	15,4	90,6	58,67%	
25	0,59	10	6,503	15,5	94,1	60,67%	
30	0,73	10	6,515	16,4	93,4	51,33%	
30	0,88	10	6,497	16,3	94,5	41,33%	
35	2	20	6,449	16,5	97,1	-33,33%	
35	1,99	20	6,429	16,6	98,2	-32,67%	
Observaciones:				Ninguna			
Dosis óptima de PAC (mg/ml)			15				

Tabla 21. Resultados de la prueba de Jarras 11 para el coagulante (PAC).

Fecha de Toma de Muestra		2/6/2023	Fecha de la Prueba de Jarras			3/6/2023	Prueba 11 de PAC
Hora de Toma de Muestra		11:00	Hora de la Prueba de Jarras			8:00	
Muestra	Turbiedad (NTU)	Color (UC)	pH	Temperatura (°C)	Conductividad (mV)		
Agua Cruda	1,95	20	7,568	13,1	36,2		
Muestra	Turbiedad (NTU)	Color (UC)	pH	Temperatura (°C)	Conductividad (mV)	Remoción de Turbiedad (%)	
10	1,44	15	7,088	12,6	62,3	26,15%	
10	1,4	15	7,094	12,3	61,9	28,21%	
15	0,72	10	6,909	13,5	72,2	63,08%	
15	0,7	10	6,923	14	71,4	64,10%	
20	0,72	10	6,731	14,5	82	63,08%	
20	0,61	10	6,69	14,6	84,5	68,72%	
25	0,76	10	6,591	15,4	90,1	61,03%	
25	0,7	10	6,605	15,7	89,3	64,10%	
30	0,74	10	6,576	16,1	90,9	62,05%	
30	0,92	10	6,514	16,1	94,4	52,82%	
35	2,05	15	6,414	16,3	100,1	-5,13%	
35	1,89	15	6,445	16,8	98,4	3,08%	
Observaciones:		Ninguna					
Dosis óptima de PAC (mg/ml)		20					

Anexo C: Informes estadísticos adicionales de los softwares utilizados.

Tabla 22. Informe de RStudio del modelo de regresión lineal de la curva de dosificación óptima de PAC.

Residuales:					
Min	1Q	Median	3Q	Max	
-4.2041	-1.2641	0.2502	0.9730	4.2213	.
Coeficientes:					
	Estimate	Std. Error	t value	Pr(>|t|)	
(Intercept)	16.8657	1.7053	9.890	3.92e-06	***
Turbiedad_Inicial	1.5590	0.5638	2.765	0.0219	*
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1					
Residual standard error: 2.91 on 9 degrees of freedom					
Multiple R-squared: 0.4593, Adjusted R-squared: 0.3992					
F-statistic: 7.645 on 1 and 9 DF, p-value: 0.02193					

Tabla 23. Informe de RStudio del modelo de regresión polinómica de sexto grado de la curva de dosificación óptima de PAC.

Residuales:					
1	2	3	4	5	6
3.774 e-01	-1.139	1.447	2.540 e-01	2.540 e-01	-6.742 e-01
7	8	9	10	11	
-7.632 e-01	5.059 e-01	-2.634 e-01	1.039 e-03	-9.256 e-06	
Coeficientes:					
	Estimate	Std. Error	t value	Pr(>|t|)	
(Intercept)	20.90909	0.33795	61.870	4.09 e-07	***
poly(Turbiedad_Inicial, 6)1	8.04479	112.086	7.177	0.002	**
poly(Turbiedad_Inicial, 6)2	-7.21166	112.086	-6.434	0.003	**
poly(Turbiedad_Inicial, 6)3	4.33455	1.12086	3.867	0.018	*
poly(Turbiedad_Inicial, 6)4	0.58556	1.12086	0.522	0.629	
poly(Turbiedad_Inicial, 6)5	-0.14955	1.12086	-0.133	0.900	
poly(Turbiedad_Inicial, 6)6	0.05998	1.12086	0.054	0.960	
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1					
Residual standard error: 1.121 on 4 degrees of freedom					
Multiple R-squared: 0.9643, Adjusted R-squared: 0.9108					
F-statistic: 18.03 on 6 and 4 DF, p-value: 0.007273					

Tabla 24. Informe de RStudio del modelo de regresión logarítmica de la curva de dosificación óptima de PAC.

Residuales:					
Min	1Q	Median	3Q	Max	
-3.2300	-1.2435	0.1718	0.6538	3.5083	.
Coefficientes:					
	Estimate	Std. Error	t value	Pr(>|t|)	
(Intercept)	15.661	1.443	10.855	1.8 e-06	***
log(Turbiedad_Inici	6.336	1.524	4.156	0.00246	**
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1					
Residual standard error: 2.319 on 9 degrees of freedom					
Multiple R-squared: 0.6575, Adjusted R-squared: 0.6194					
F-statistic: 17.28 on 1 and 9 DF, p-value: 0.002461					

Tabla 25. Varianza, coeficiente de determinación y coeficiente de determinación ajustado del modelo de superficie de respuesta.

S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)
21.2021	57.38%	55.69%

Anexo D: Materiales, equipos y reactivos

Tabla 26. Materiales utilizados en la investigación.

Fuente: Autor.


Material	Cantidad	Objetivo
Vasos de precipitados de 100 ml	10	Se utilizaron para recoger las muestras de agua después de cada ensayo y trasvasar una cantidad pequeña del reactivo para la alícuota.
Vasos de precipitados de 250 ml	2	Se utilizaron para calentar ligeramente agua destilada para realizar las soluciones de los reactivos.
Balones de aforo de 250 ml	3	Se utilizaron para preparar las soluciones de coagulante y floculante.
Jeringas hipodérmicas desechables de 5 ml	16 en cada ensayo	Se utilizaron para retener cada alícuota y poder aplicar cada dosificación de reactivo de manera rápida.
Luna de vidrio	1	Se utilizaron para pesar los reactivos para realizar las soluciones.
Espátula metálica	1	Se utilizaron para recoger el reactivo y poder pesarlo.
Varilla de vidrio	1	Se utilizaron para mezclar el PAC antes de trasvasar al balón de aforo.
Pipeta de 10 ml	1	Se utilizaron para medir la alícuota y ponerla en cada jeringuilla.
Pera de succión	4	Se utilizaron para la pipeta de la alícuota y para recoger la muestra clarificada después de cada ensayo.
Piseta	1	Se utilizaron para dosificar el agua destilada.
Vasos de 1000 ml	5	Se utilizaron para realizar la prueba de jarras y para recoger el agua de limpieza de las paletas del equipo de jarras.
Probeta de 1000 ml	1	Se utilizaron para dosificar el agua cruda en cada uno de sus respectivos vasos de precipitados.
Envase de 20 litros  <i>Figura 22. Envase de 20 litros.</i> Fuente: Autor.	1	Se utilizó para transportar la muestra. Está hecha de HDPE con tapa que ayuda a tener un sello hermético.

Tabla 27. Reactivos utilizados en la investigación.

Fuente: Autor.









Reactivos	Marca	Características
<p>Policloruro de aluminio</p>  <p><i>Figura 23. Policloruro de aluminio. Fuente: Autor.</i></p>	Quimicalzen	Polvo amarillento higroscópico. No es tóxico, pero deben ser manejados como ligeramente corrosivo. Tiene una concentración del 90%.
<p>Poliacrilamida Aniónica</p>  <p><i>Figura 24. Poliactilamida Aniónica. Fuente: Autor.</i></p>	Quimicalzen	Polvo color blanco. No es tóxico. Tiene una concentración del 90%.
Agua destilada	Agua destilada en la facultad de ciencias químicas	Agua destilada de tipo II según la ASTM 1193:2001, que está recomendada para la mayoría de las pruebas analíticas y generales de laboratorio, debido a que mantiene una conductividad entre 0.25 y 1 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Valdivia-Medina et al., 2010).

Tabla 28. Equipos utilizados en la investigación.


Fuente: Autor.

Equipo	Marca	Objetivo
Equipo de jarras	Velp Científica – Modelo Flocculation Tester FC4S	Realiza el proceso de coagulación-floculación a escala de laboratorio mediante agitación con paletas que tienen diferentes velocidades de agitación (entre 0 a 300 rpm).

 <p>Figura 25. Equipo de Jarras. Fuente: Autor.</p>		
<p>Potenciómetro</p>  <p>Figura 26. Potenciómetro. Fuente: Autor.</p>	<p>Thermo Scientific – Modelo Orion Versa Star Pro</p>	<p>Medir el pH del agua cruda y después de cada ensayo.</p>
<p>Balanza Analítica</p>  <p>Figura 27. Balanza Analítica. Fuente: Autor.</p>	<p>Sartorius - Modelo CP224S</p>	<p>Pesar la cantidad de PAC y PA para realizar las distintas soluciones.</p>
<p>Turbidímetro</p>  <p>Figura 28. Turbidímetro. Fuente: Autor.</p>	<p>Hach – Modelo 2100P</p>	<p>Realiza la medición de la turbidez en NTU, $\pm 2\%$ de la lectura más la luz difusa en el intervalo 0 a 1.000 NTU. Con una resolución de 0.01 NTU en el intervalo de medida más bajo.</p>
<p>Colorímetro</p>  <p>Figura 29. Colorímetro. Fuente: Autor.</p>	<p>Orbeco-Hellige – Modelo 611 A</p>	<p>Realiza la medición de color de manera visual en UC, mide en un rango de 0 a 70 UC.</p>

<p>Agitador magnético</p>  <p><i>Figura 30. Agitador Magnético. Fuente: Autor.</i></p>	<p>Corning – Modelo Stirrer PC-353</p>	<p>Se utiliza para mezclar la solución de polímero aniónico para cumplir con la ficha técnica y su mezcla</p>
---	--	---

Anexo E: Fichas técnicas de los reactivos utilizados.



QUIMICALZEN
Especialistas en tratamientos de aguas

FICHA TÉCNICA

POLICLORURO DE ALUMINIO

1. IDENTIFICACIÓN DE LA SUSTANCIA O PREPARADO

PRODUCTO	Nombre Químico:	POLICLORURO DE ALUMINIO
	Composición Química:	AL ₂ (OH) ₃ Cl
	Familia Química:	SALES INORGÁNICAS
	Presentación:	Sacos de 25 Kg

TELÉFONO DE EMERGENCIA: Emergencias (ECU) 911

2. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

Estado físico:	Sólido
Forma:	Suelto, polvo
Color:	Amarillento
Olor:	Penetrante
pH:	3.5-5 (solución 1% en agua)
Basicidad, Al₂O₃ %	40-80
Insoluble %	0.1
Arsénico:	0,0002
Hierro, Fe %	0.1
Plomo, Pb %	0.001
Cadmio, Cd %	0.0002
Cromo, Cr 6+ %	0.0005
Mercurio, Hg %	0.00001
Manganeso Mn%	0.04

3. DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO Y USOS

El Policloruro de Aluminio tiene excelentes resultados en el uso como coagulante y/o floculante en el tratamiento de agua potable. Amplio uso en agua con turbiedades bajas y aguas con bajo contenido de materia orgánica y baja alcalinidad

Utilizado en:

- Tratamiento de aguas residuales y potables
- Manufactura química
- Jabones y grasas.







<p> Quimicalzen Cia LTDA.</p> <p> Quimicalzen</p> <p> 0991243209</p>	<p> 074092344</p> <p> quimicalzen@gmail.com</p> <p> Ricaurte-barrio Los cipreses a 100 m del colegio sudamericano</p>
---	--

Figura 31. Ficha técnica del policloruro de aluminio (Página 1).



- Petróleo.
- Farmacéutico.
- Cartón, Papel y Pulpa.
- Textil
- Industria Azucarera
- **Otros usos:** Como coagulante en la manufactura de caucho sintético de butadieno estireno. Para la purificación de la glicerina. Como retardante del fuego.

4. DOSIFICACIÓN

El producto es soluble en agua, la concentración a preparar y su dosificación dependerá de las características físico-químicas del agua. Por lo que se recomienda realizar pruebas de jarras.

5. MANEJO DEL PRODUCTO

No es tóxico, pero deben ser manejados como ligeramente corrosivo
Se debe utilizar guantes de caucho, gafas de seguridad, zapatos punta de acero y overol

6. ALMACENAMIENTO

Manténgase herméticamente cerrado en los contenedores originales. Es un producto higroscópico por lo que se debe almacenar, en lugares frescos, con mínima humedad, luz solar directa y cambios de temperatura extremos.



Alcance: 42x24x10mm (mm)
JORGE LLOYD
ZENTENO GOMEZ



Quimicalzen Cia LTDA.



Quimicalzen



0991243209



074092344



quimicalzen@gmail.com



Ricaurte-barrio Los cipreses a 100 m del colegio sudamericano

Figura 32. Ficha técnica del policloruro de aluminio (Página 2).



FICHA TÉCNICA

FLOCULANTE ANIÓNICO

INFORMACIÓN GENERAL


NOMBRE QUÍMICO:	POLIACRILAMIDA ANIÓNICA
NOMBRE COMERCIAL:	6022
FORMULA:	NO APLICA
PESO MOLECULAR:	ALTO $19 \times 10^6 - 22 \times 10^6$
DESCRIPCIÓN:	Polvo color blanco, carga media

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

COMPONENTES	ESPECIFICACIÓN	UNIDADES
Concentración	Mínimo 90	%
Grado de Hidrólisis	25 - 30	% m/m
pH en solución al 0.5% a 25°C	7 - 9	---
Estabilidad en solución	10	días
Viscosidad Brookfield @ 5 g/l	Máx. 2000	cps
Viscosidad Brookfield @ 2,5 g/l	Máx. 600	cps
Viscosidad Brookfield @ 1 g/l	Máx. 200	cps
Material Insoluble	Máximo 0.35	% m/m
Contenido sólido	89	%
Tiempo de disolución a 25°C	Máximo 1	Hora



Figura 33. Ficha técnica del polímero aniónico (Página 1).



QUIMICALZEN
Especialistas en tratamientos de aguas

USOS Y APLICACIONES


- diluir a la concentración de soluciones 0.1 - 0.5%
- disuelva completamente (tenga en cuenta que la velocidad de flujo del dispositivo de dosificación automática no puede ser demasiado rápida, para evitar el bloqueo de la tubería)
- la velocidad de mezcla es de 200 vueltas por minuto, el tiempo no es inferior a 1 h y la temperatura del agua se puede acelerar de 20 a 30 grados.
La temperatura máxima no es más de 60


PRESENTACIÓN


- Bolsas de papel kraft de 25 kg


TIEMPO DE VIDA ÚTIL


2 años a partir de la fecha de producción.

 Quimicalzen Cia LTDA.

 Quimicalzen

 0991243209

 0962704920

 quimicalzen@gmail.com


 Ricaurte-barrio Los cipreses a 100 m del colegio sudamericano

Figura 34. Ficha técnica del polímero aniónico (Página 2).

Anexo F: Fotografías de ensayos de la prueba de jarras.



Figura 35. Pruebas de jarras usando el polímero aniónico (PA) con concentraciones de 1.25 y 1.5 ppm con duplicado.

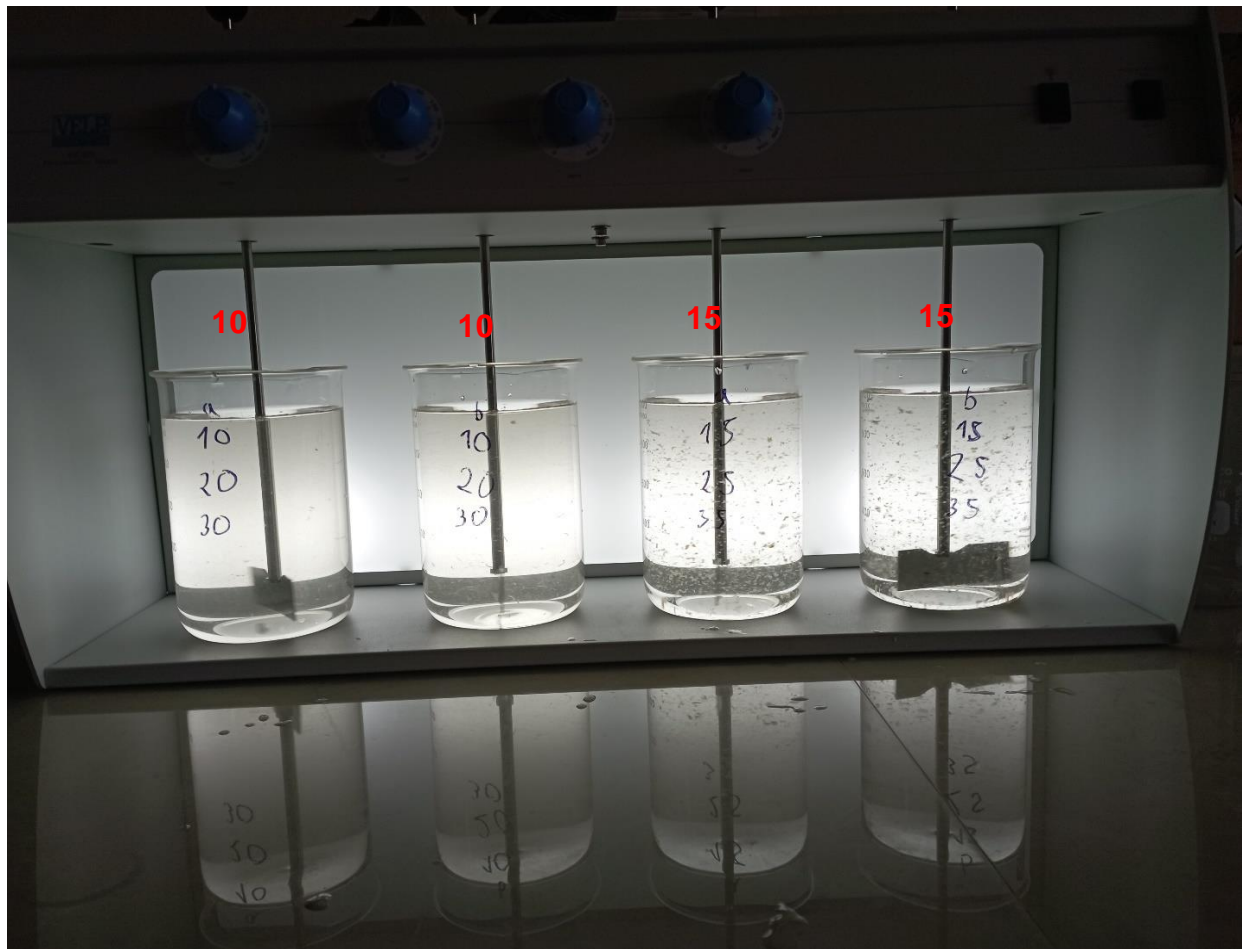


Figura 36. Prueba de jarras en proceso del coagulante PAC con concentraciones de 10 y 15 ppm con duplicado.

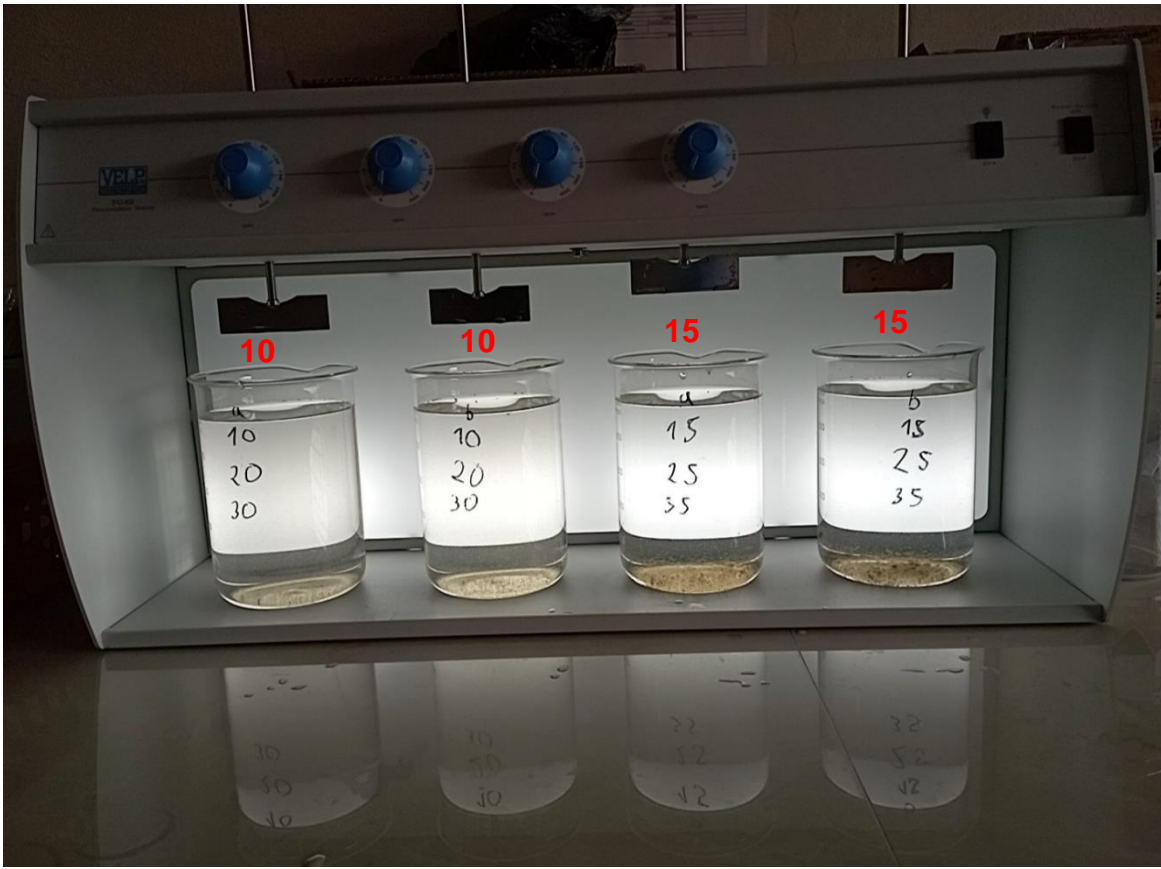


Figura 37. Flóculos sedimentados después de la prueba de jarras con concentraciones de 10 y 15 ppm de coagulante PAC con duplicado.

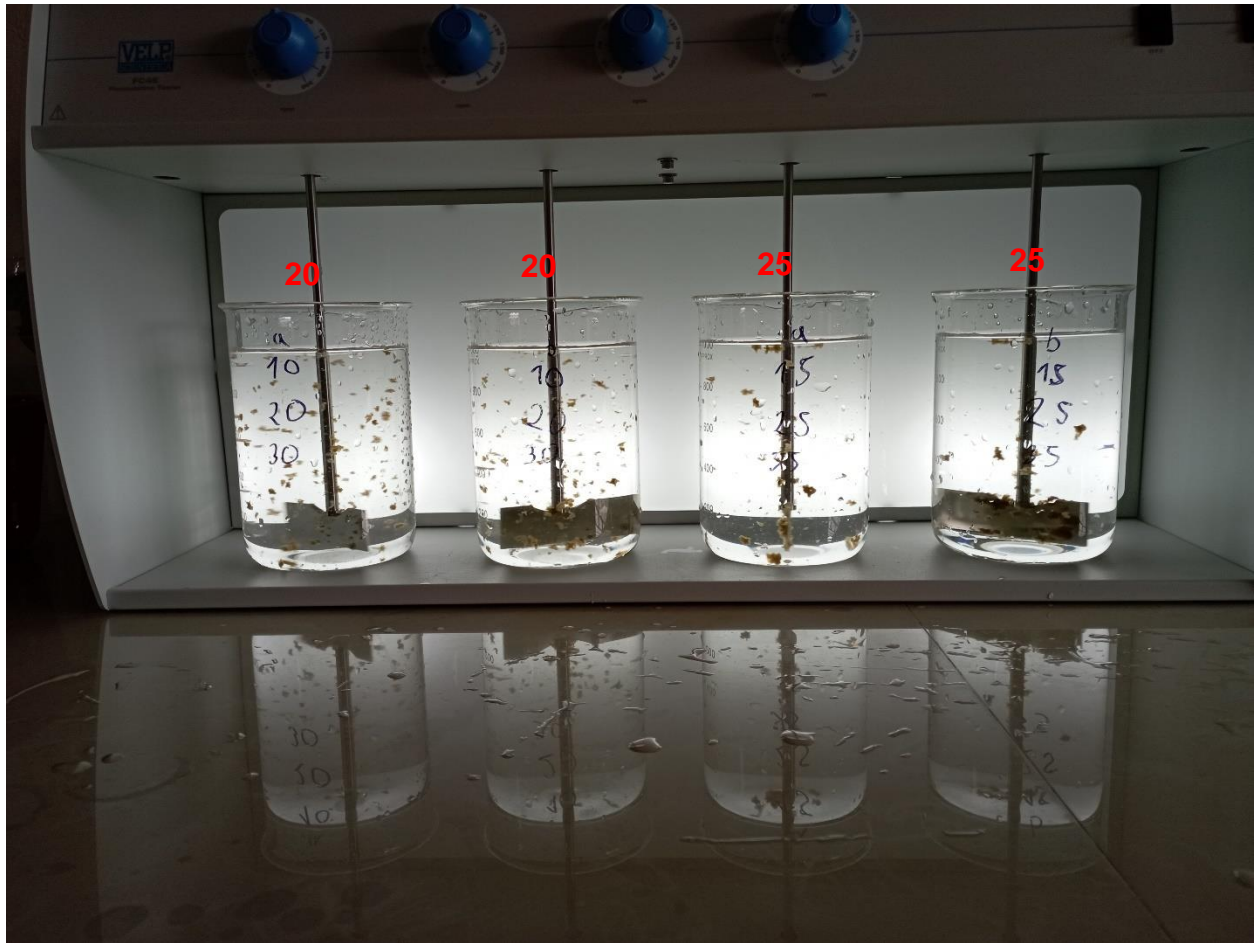


Figura 38. Prueba de jarras en proceso del coagulante PAC con concentraciones de 20 y 25 ppm con duplicado.

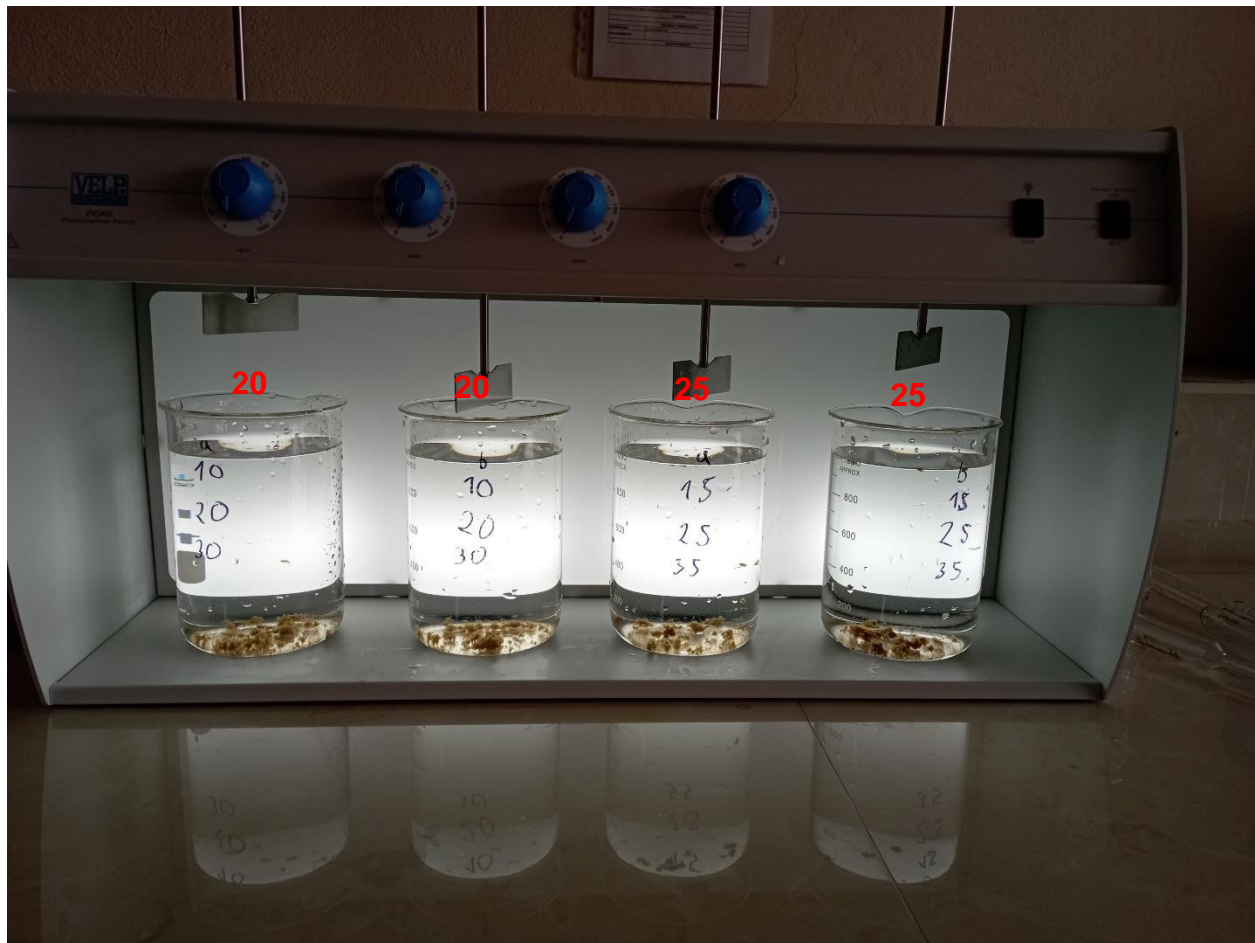


Figura 39. Flóculos sedimentados después de la prueba de jarras con concentraciones de 20 y 25 ppm de coagulante PAC con duplicado.

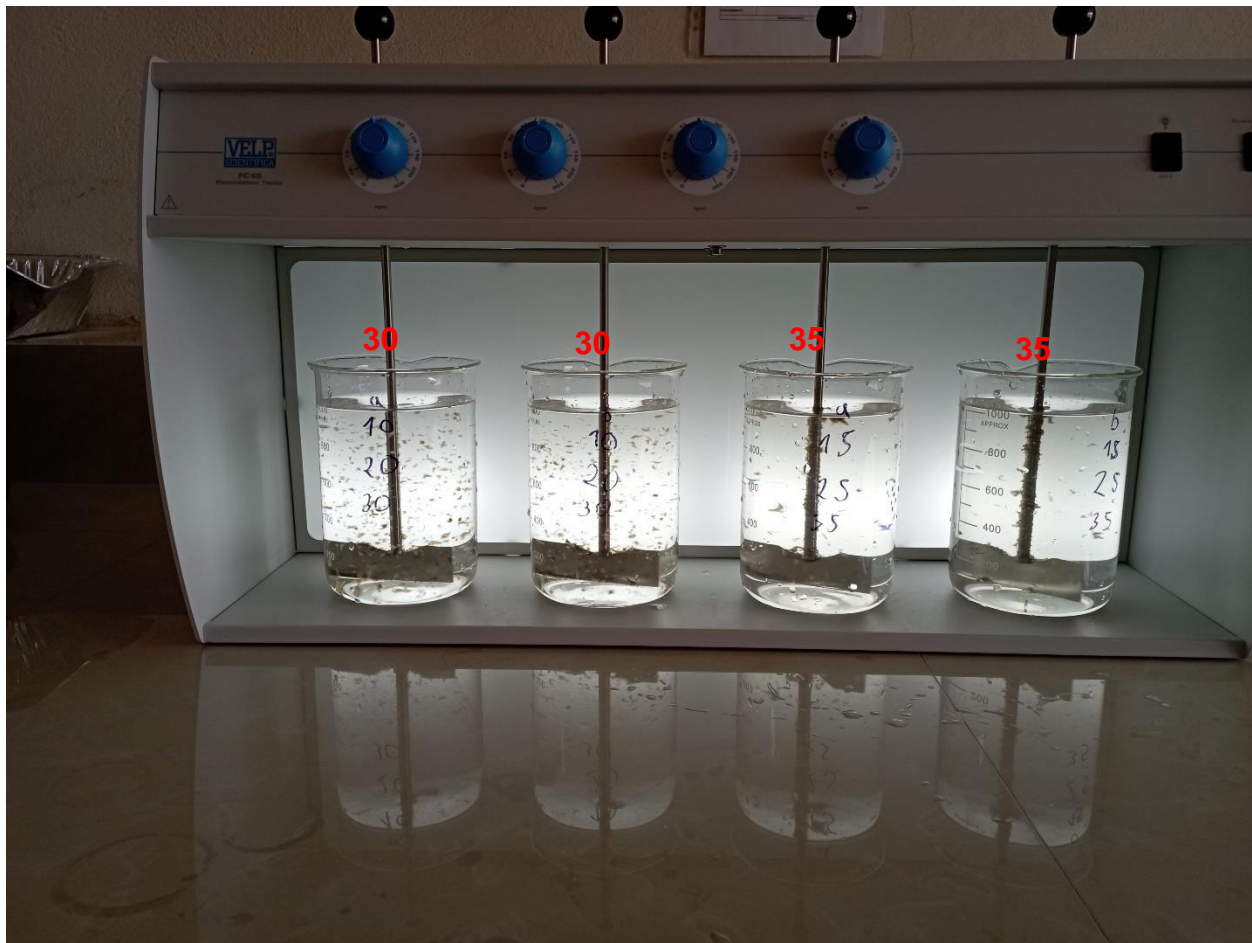


Figura 40. Prueba de jarras en proceso del coagulante PAC con concentraciones de 30 y 35 ppm con duplicado.

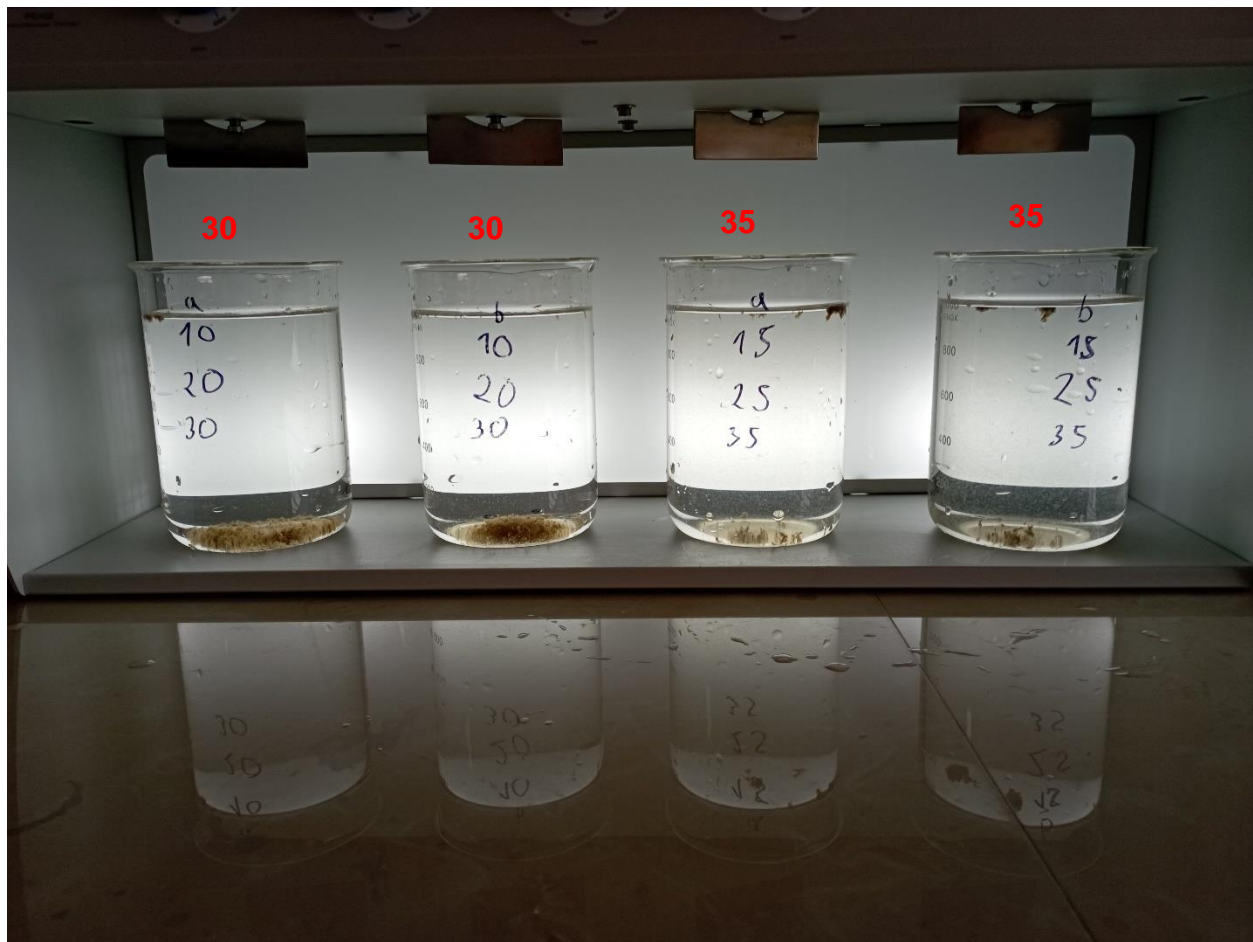


Figura 41. Flóculos sedimentados después de la prueba de jarras con concentraciones de 30 y 35 ppm de coagulante PAC con duplicado.

Anexo G: Fotografías de la Planta Potabilizadora de Agua de Tixán.



Figura 42. Entrada del agua cruda del río Machángara a la Planta de Tixán.



Figura 43. Punto de recolección de muestras de agua cruda en la planta de Tixán.

Anexo H: Autorizaciones para el uso de laboratorios y equipos.

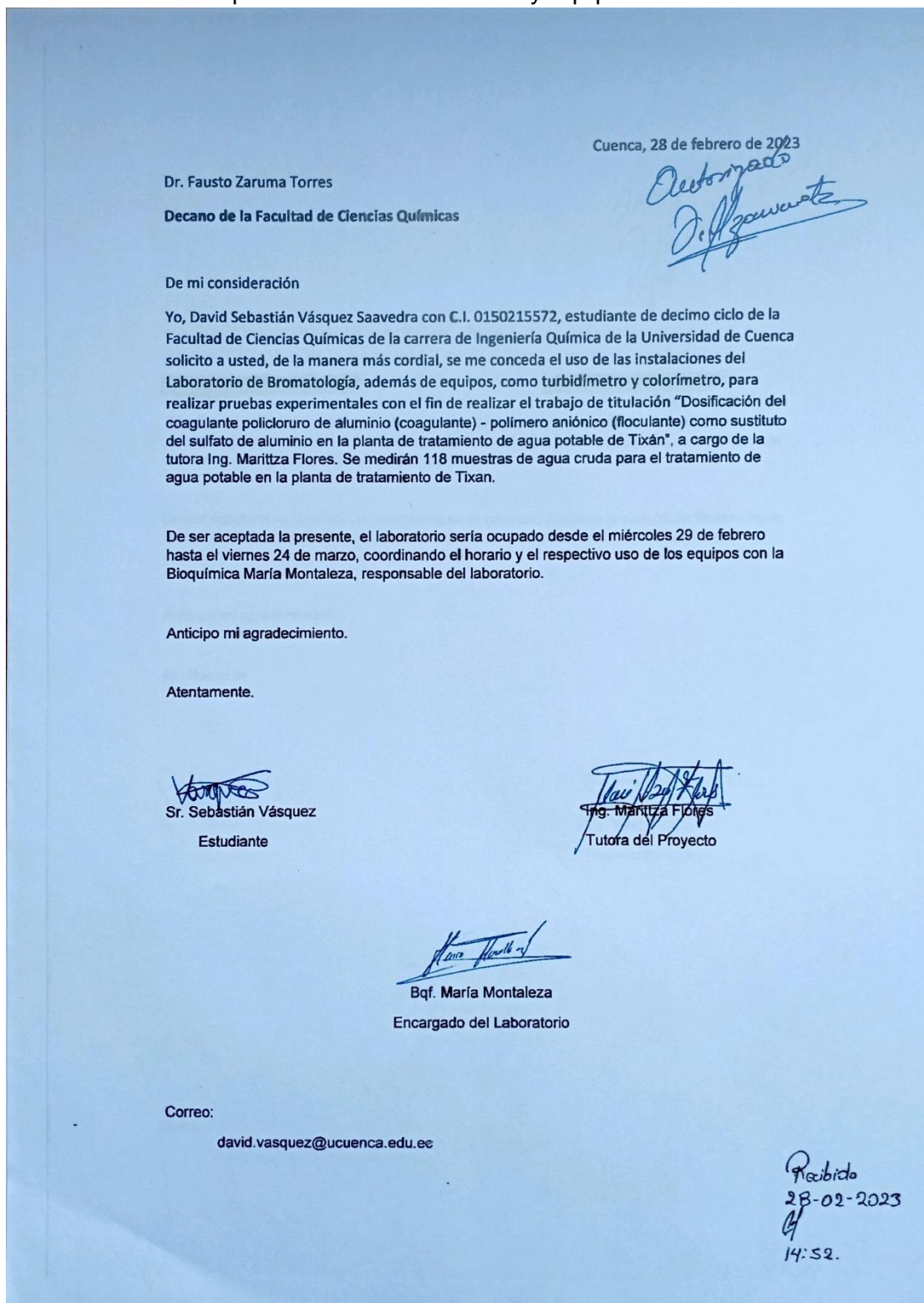


Figura 44. Autorización para el uso del laboratorio de Bromatología y sus equipos.

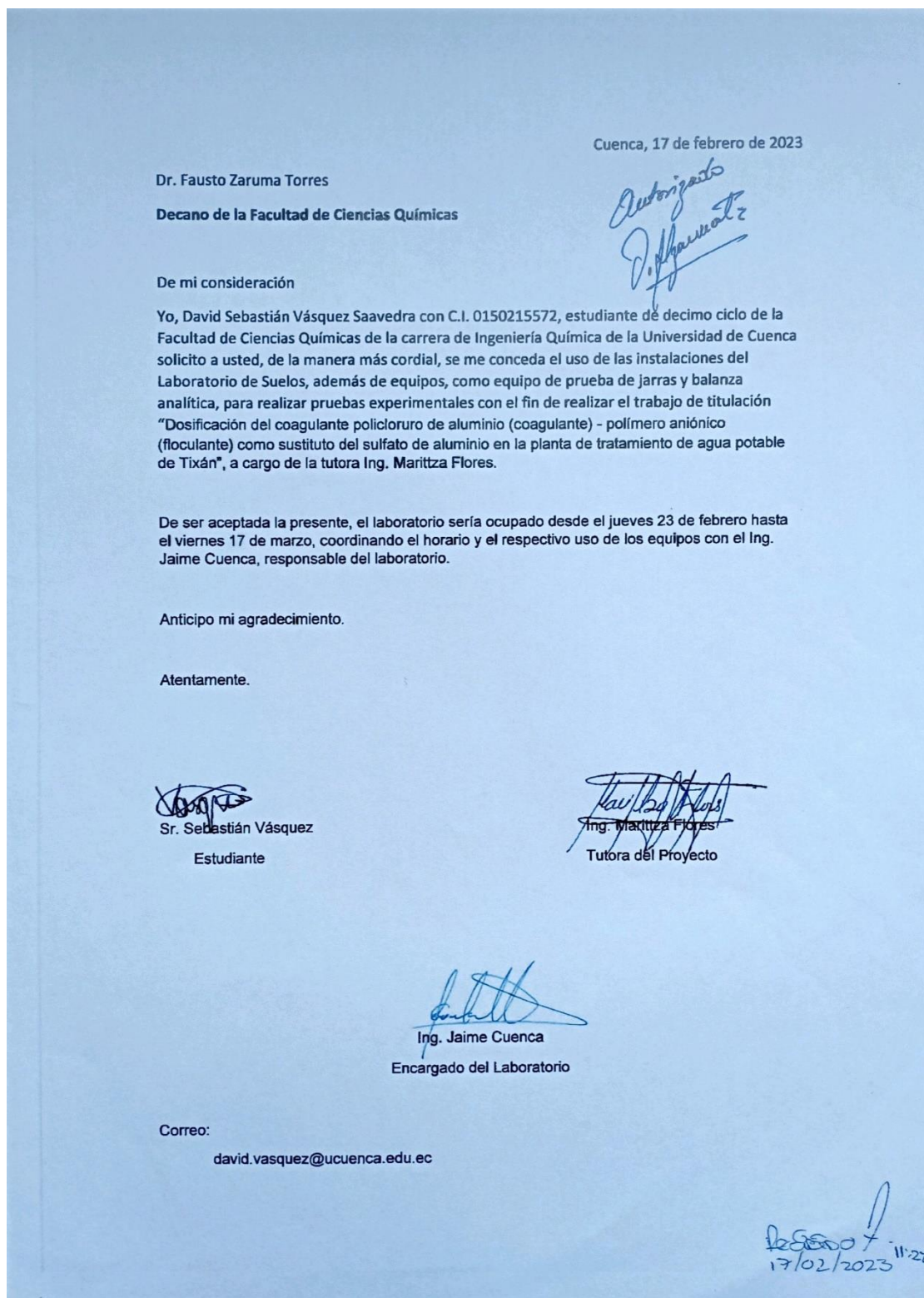


Figura 45. Autorización para el uso del laboratorio de Suelos y sus equipos.

Anexo I: Pasos para el desarrollo de los ensayos o pruebas de jarras.

Luego de traer la muestra al laboratorio y preparar las soluciones, el proceso se desarrolla de la siguiente manera:

- a) Se agita el envase de agua cruda para garantizar que la muestra sea representativa y que sus componentes se distribuyan de manera uniforme. Este mismo procedimiento se aplica a los balones de aforo que contienen las soluciones.
- b) Se toma una muestra de 250 ml de agua cruda para medir los parámetros de turbidez, color, pH, temperatura y conductividad.
- c) Usando una pipeta de 10 ml, se coloca en las jeringas hipodérmicas (sin aguja) la concentración adecuada de PAC y PA. Por ejemplo, en la primera serie de pruebas se añaden 10 ppm en dos jeringas y 15 ppm en las otras dos, junto con la dosis fija de PA de 1.5 ppm en cuatro jeringas.
- d) Se realiza un lavado exhaustivo de todo el material para evitar la presencia de polvo y otros contaminantes. Las jarras se homogenizan con el agua cruda.
- e) Se llenan un total de cuatro vasos de precipitados de 1 L con agua cruda utilizando una probeta de 1 L, y se colocan en el equipo de jarras.
- f) Se ajusta la velocidad a 120 rpm durante 1 minuto y, a continuación, se añaden las dosis de PAC (etapa de coagulación).
- g) Luego, se ajusta la velocidad a 60 rpm durante 15 minutos y, de inmediato, se añaden las dosis de PA (etapa de floculación).
- h) Finalizada la agitación, las jarras se dejan en reposo durante 10 minutos (etapa de sedimentación).
- i) Se extrae una muestra de 75 ml del agua clarificada con una pipeta para medir los parámetros de turbidez, color, pH, temperatura y conductividad.

Estos pasos de c a i se repiten con las dosificaciones de 20 y 25 ppm en la segunda serie de pruebas, y con las dosificaciones de 30 y 35 ppm en la tercera serie de pruebas.