



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE ÁLAMO TEMAPACHE

TITULACIÓN TESIS PROFESIONAL

NOMBRE DEL PROYECTO

**ANÁLISIS DE LA EFECTIVIDAD DE
COAGULANTES Y FLOCULANTES
COMERCIALES EN EL TRATAMIENTO DE LAS
AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DE LA
INDUSTRIA MINERA.**

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO AMBIENTAL**

**PRESENTA
DAVID ALONSO FERRAL PÉREZ**

**ASESOR INTERNO
ING. VÍCTOR HUGO TLAPALCOYOA FRANCISCO**

**ASESOR EXTERNO
DRA. ROSA MARIA RAMIREZ ZAMORA**



DEDICATORIA

Quiero agradecer a mis padres en especial a mi madre, quien ha demostrado un amor y devoción inigualables hacia sus hijos. Aprecio infinitamente el apoyo ilimitado y sin condiciones que siempre me has brindado. Tú fuerza para superar obstáculos y tu dedicación han sido ejemplos que me han formado como una persona de bien. Gracias por ser la mujer que me dio la vida y me enseñó a vivirla. No hay palabras suficientes en este mundo para expresar mi gratitud, y el amor que siento por ti mami.

A mi hermano, a pesar de las bromas, peleas y todo lo demás, siempre hemos estado juntos. Desde que llegaste, la vida en nuestra familia ha sido más divertida y alegre gracias a ti. Sé que puedo contar contigo, y quiero que sepas que siempre puedes contar conmigo, hermanito.

A mi compañero más cercano, mi confidente y mi gran amor. No puedo concebir mi existencia sin ti. Este logro es compartido contigo, ya que, sin tu amor y paciencia, nada de esto habría sido posible. Que este proyecto sea solo el comienzo de muchas iniciativas que podamos emprender juntos. Te amo con todo corazón.

Quiero expresar mi profundo agradecimiento hacia ti, Temo, por estar siempre presente cuando mi familia y yo enfrentamos dificultades. En esos momentos críticos, te convertiste en parte de nuestra pequeña familia, y no tengo palabras para expresar cuánto aprecio tu apoyo incondicional. Gracias por estar a mi lado en las etapas más complicadas de mi formación académica; con tu orientación y asesoramiento, superé muchos desafíos. Estaré siempre agradecido por tu amistad y generosidad.

Quiero expresar mi gratitud a todos mis amigos que, con su amistad, me brindaron una perspectiva diferente y estuvieron a mi lado en los momentos más difíciles. Son tantos que sería imposible agradecer individualmente, pero desde lo más profundo de mi corazón, les agradezco por apoyarme, reconocer mis cualidades y hacer que la vida sea más ligera y disfrutable.

También quiero agradecer a mis pequeños compañeros peludos Sunny y Yuky que me animaron en momentos tristes y que sin ellos no hubiera podido continuar con esto los aprecio mucho pequeñas bolitas de amor.



AGRADECIMIENTOS

Expresar mi sincero agradecimiento a diversas personas e instituciones se convierte en un desafío, ya que las palabras parecen insuficientes para abarcar la magnitud de mi gratitud a lo largo de mi trayectoria académica y profesional.

Quiero expresar mi gratitud al Ing. Víctor H. Tlapalcoyoa por su apoyo al facilitarme la entrada al Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (IIUNAM). Sin su orientación, no habría sabido cómo llegar a donde estoy hoy. A la Dra. Rosa María Ramírez Zamora y a la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) por aceptar mi solicitud para llevar a cabo este trabajo, así como por brindarme su confianza, orientación y conocimiento durante el desarrollo de mi tesis.

A Mel, gracias por apoyarme desde mi llegada y guiarme en todo mi camino aquí. Té has convertido en más que mi tutora, también en mi amiga, a quien puedo contarle cualquier cosa. Me siento afortunado de haberte conocido; eres una gran persona, y te deseo lo mejor siempre.

A la Dra. Sandra por brindarme su apoyo cuando más lo necesitaba. No solo me respaldó académicamente, sino que también fue un apoyo personal invaluable. Aprecio mucho su amabilidad y el aprendizaje que obtuve de ella. Fue muy amable al apoyarme en momentos en los que me sentía perdido.

Agradezco a la Dra. Brenda por su valioso apoyo en la investigación de algunos temas relacionados con el proyecto. Su amabilidad y generosidad fueron de gran ayuda en momentos de duda, y valoro su contribución a este trabajo.

A mis compañeros de cubículo, Dani, Sebas, Max, Karen e Itzel. Fueron un increíble equipo de trabajo, y con ellos aprendí muchas cosas. Les agradezco de corazón por incluirme siempre en todo, por su apoyo incondicional, y por estar ahí cuando más los necesité. Ustedes fueron un gran respaldo, y por eso les estoy muy agradecido. Los quiero mucho, chicos.



RESUMEN

En la presente investigación se evaluó el desempeño de distintas combinaciones de coagulantes y floculantes para determinar su eficiencia en la remoción de contaminantes presentes en aguas residuales industriales. El estudio se centró en aguas residuales generadas por procesos mineros, caracterizadas por una elevada carga de sólidos suspendidos, turbidez y color, lo cual representa un reto considerable para su tratamiento y disposición final.

Los coagulantes seleccionados fueron sulfato de aluminio, cloruro férrico y policloruro de aluminio, compuestos ampliamente utilizados en procesos de tratamiento de agua por su alta capacidad de desestabilización de partículas coloidales y remoción de turbidez y metales pesados. En cuanto a los polímeros (floculantes), se eligieron dos aniónicos (AN95 y AN934), con distinta densidad de carga, y un polímero catiónico (AFL4540), con el objetivo de evaluar el efecto de la carga superficial de los floculantes en la formación y sedimentación de flóculos.

Se implementó un diseño experimental tipo 2^4 con tres puntos centrales, permitiendo analizar el efecto combinado de cuatro variables independientes: tipo de coagulante, dosis de coagulante, tipo de floculante y dosis de floculante, cada una con dos niveles (alto y bajo). Este diseño permitió obtener un modelo robusto para identificar las interacciones significativas entre los factores y optimizar las condiciones del tratamiento.

Los resultados demostraron una disminución general del pH en la mayoría de los tratamientos, atribuida a la naturaleza ácida de los coagulantes metálicos empleados. La conductividad eléctrica se mantuvo relativamente estable, lo cual indicó que no se introdujo una carga iónica significativa adicional al medio. Por otro lado, los sólidos disueltos totales (SDT) mostraron una ligera tendencia al incremento, producto de la adición de los coagulantes y floculantes. En cuanto a los parámetros críticos de calidad —turbidez, color aparente y color real—, se logró una remoción superior al 99 % en los mejores tratamientos.

En el análisis comparativo, el tratamiento correspondiente al experimento 15 destacó como el más efectivo, con una turbidez final de 1.37 NTU y remoción completa del color real. Aunque el experimento 14 presentó una ligera ventaja en la reducción de SDT (774 mg/L),



el desempeño general de Exp15 fue superior, debido a su mayor eficiencia integral en todos los parámetros de interés. Asimismo, se observó que los floculantes aniónicos no ofrecieron los mejores resultados en comparación con el polímero catiónico AFL4540, cuyo comportamiento fue más favorable en términos de formación de flóculos y remoción de color.

Este estudio aportó información relevante para la selección óptima de combinaciones de coagulantes y floculantes en sistemas de tratamiento de aguas residuales de origen minero, proponiendo alternativas eficientes y viables para mejorar la calidad del agua tratada y facilitar su reúso o disposición ambiental segura.



ABSTRACT

This study evaluated the performance of different combinations of coagulants and flocculants to determine their efficiency in removing contaminants present in industrial wastewater. The study focused on wastewater generated by mining processes, characterized by high suspended solids loads, turbidity, and color, which represents a considerable challenge for their treatment and final disposal.

The coagulants selected were aluminum sulfate, ferric chloride, and polyaluminum chloride, compounds widely used in water treatment processes due to their high capacity to destabilize colloidal particles and remove turbidity and heavy metals. Regarding the polymers (flocculants), two anionic polymers (AN95 and AN934), with different charge densities, and one cationic polymer (AFL4540) were chosen to evaluate the effect of the flocculants' surface charge on floc formation and sedimentation. A type 2⁴ experimental design was implemented with three central points, allowing for the analysis of the combined effect of four independent variables: coagulant type, coagulant dose, flocculant type, and flocculant dose, each with two levels (high and low). This design provided a robust model for identifying significant interactions between factors and optimizing treatment conditions.

The results demonstrated an overall decrease in pH in most treatments, attributed to the acidic nature of the metallic coagulants used. Electrical conductivity remained relatively stable, indicating that no significant additional ionic charge was introduced into the medium. On the other hand, total dissolved solids (TDS) showed a slight upward trend due to the addition of coagulants and flocculants. Regarding the critical quality parameters—turbidity, apparent color, and true color—removal of over 99% was achieved in the best treatments. In the comparative analysis, the treatment corresponding to Experiment 15 stood out as the most effective, with a final turbidity of 1.37 NTU and complete removal of true color. Although Experiment 14 showed a slight advantage in TDS reduction (774 mg/L), the overall performance of Experiment 15 was superior due to its greater overall efficiency across all parameters of interest. It was also observed that anionic flocculants did not offer the best results compared to the cationic polymer AFL4540, which performed more favorably in terms of floc formation and color removal.



This study provided relevant information for the optimal selection of coagulant and flocculant combinations in mining wastewater treatment systems, proposing efficient and viable alternatives to improve the quality of treated water and facilitate its reuse or safe environmental disposal.



INDICE

DEDICATORIA	II
AGRADECIMIENTOS	III
RESUMEN.....	IV
ABSTRACT	VI
1. INTRODUCCION	- 11 -
1.1 Antecedentes	- 12 -
1.2 Planteamiento Del Problema.....	- 13 -
1.3 Justificación	- 15 -
1.4 Hipótesis.....	- 17 -
1.5 Objetivos.....	- 18 -
2. MARCO TEORICO.....	- 19 -
2.1 Generalidades De Las Aguas Residuales De La Industria Minera.....	- 19 -
2.1.1.-Procesos De Generación De Aguas Residuales	- 20 -
2.1.2.- Impacto De Las Aguas Residuales En El Ambiente.	- 20 -
2.1.3 Calidad Y Características Del Agua De Laboreo De La Industria Minera	- 21 -
2.1.4.- Normatividad Aplicable	- 23 -
2.2.-Tratamiento De Aguas De Laboreo De La Industria Minera.	- 25 -
2.2.1. Procesos Biológicos.....	- 27 -
2.2.1.1. Procesos Biológicos Aerobios	- 27 -
2.2.1.2. Procesos Biológicos Anaerobios	- 27 -
2.2.3. Procesos Físicos.	- 28 -
2.2.4. Procesos Químicos	- 31 -
2.3. Procesos De Coagulación Y Floculación	- 34 -
2.3.1. Definición De Los Mecanismos De Coagulación Y Floculación.....	- 34 -
2.3.2. Reactivos.....	- 35 -
2.3.3. Clasificación De Reactores	- 36 -
2.3.4. Pruebas de Jarras	- 38 -
CAPÍTULO 3.-ESTADO DEL ARTE.....	- 41 -
CAPITULO 4. METODOLOGIA.	- 44 -
4.1 Análisis Estadísticos.....	- 51 -
CAPITULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES	- 52 -
CONCLUSIONES	- 64 -
FUENTES DE INFORMACIÓN	- 65 -



ÍNDICE DE IMÁGENES

Ilustración 1..-Diagrama de la metodología experimenta	- 44 -
Ilustración 2.- Distribución de experimentos en la prueba de jarras	- 47 -
Ilustración 3 Agua residual cruda (sin tratamiento).....	- 52 -
Ilustración 4 distribución de los experimentos en la prueba de jarras	- 54 -
Ilustración 5 resultados de la medición del pH.....	- 58 -
Ilustración 6 resultados de la conductividad en los experimentos.....	- 59 -
Ilustración 7 tabla de turbidez (parte izquierda) en relación con la tabla de SDT (derecha) en el análisis de datos.....	- 60 -
Ilustración 8 comparativa de los resultados del color aparente (izquierda) y color real (derecha).....	- 60 -



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades del proceso de Coagulación - Floculación para el tratamiento de aguas residuales de la industria minera.....	- 41 -
Tabla 2.-Condiciones de las pruebas de jarras	- 48 -
Tabla 3 .-Caracterización fisicoquímica de la muestra de agua residual de la industria minera.....	- 53 -
Tabla 4.- Niveles de las variables estudio	- 54 -
Tabla 5.- Distribución de las variables de los experimentos.....	- 55 -
Tabla 6.- Condiciones de las variables de estudio reales	- 56 -
Tabla 7.- Resultados de la prueba de jarras.....	- 56 -
Tabla 8.- Resultados de las repeticiones de los mejores candidatos.....	- 57 -
Tabla 9 comparación de los resultados de los experimentos 14 y 15	- 61 -
Tabla 10 resultados de las pruebas t-Student de cola derecha con p-value.....	- 63 -



1. INTRODUCCION

El tratamiento de las aguas residuales es una preocupación global debido a su impacto ambiental y sus implicaciones para la salud pública. En particular, las aguas residuales generadas por la industria minera representan un desafío significativo debido a su compleja composición y alta carga de contaminantes. La necesidad de tratar adecuadamente estas aguas residuales es crucial para prevenir la contaminación del medio ambiente y proteger los recursos hídricos.

La industria minera utiliza grandes cantidades de agua en sus procesos de extracción y procesamiento de minerales, lo que resulta en la generación de aguas residuales con una variedad de contaminantes, incluyendo metales pesados, sustancias químicas tóxicas y sólidos en suspensión. Estos contaminantes pueden afectar negativamente los ecosistemas acuáticos, la calidad del agua potable y la salud humana si no se tratan de manera adecuada.

Para abordar este problema, es fundamental implementar procesos de tratamiento de aguas residuales eficientes y efectivos. Uno de los procesos clave en este sentido es el de clarificación, que se utiliza para eliminar sólidos suspendidos y reducir la turbidez del agua. Según estudios realizados por García et al. (2019), el proceso de clarificación es fundamental para mejorar la calidad del agua y cumplir con los estándares ambientales.

Además del proceso de clarificación convencional, existen nuevas tecnologías y enfoques innovadores que pueden emplearse para el tratamiento de aguas residuales de la industria minera. Por ejemplo, investigaciones realizadas por Pérez et al. (2020) han demostrado el potencial de tecnologías avanzadas como la oxidación avanzada y la membrana de ultrafiltración para eliminar una amplia gama de contaminantes presentes en las aguas residuales mineras.

En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo explorar la importancia del tratamiento de las aguas residuales de la industria minera, destacando la relevancia del proceso de clarificación y la aplicación de nuevas tecnologías para mejorar la eficiencia y la sostenibilidad de los sistemas de tratamiento. A través de la revisión de la literatura existente y la evaluación de enfoques innovadores, se busca proporcionar recomendaciones que contribuyan a la gestión responsable de los recursos hídricos en el contexto minero.



1.1 Antecedentes

La gestión de aguas residuales de la industria minera en México ha sido objeto de estudios y análisis por parte de diversos expertos en el campo. Según López-Maldonado, Y. L., et al. (2016), la industria minera en México ha experimentado un crecimiento significativo en las últimas décadas, lo que ha generado preocupaciones sobre su impacto ambiental, incluyendo la contaminación del agua. Además, autores como Martínez-Soto, Moisés et al. (2018) han destacado que la expansión de la minería ha llevado a un aumento en la generación de aguas residuales mineras, lo que subraya la importancia de implementar medidas efectivas de tratamiento.

La legislación ambiental mexicana también ha desempeñado un papel crucial en la regulación del tratamiento de aguas residuales de la industria minera. De acuerdo con estudios realizados por Orozco, G., et al. (2019), leyes como la Ley Minera y la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) establecen los lineamientos para la gestión ambiental en la industria minera, incluyendo disposiciones sobre el tratamiento de aguas residuales.

Además, investigaciones llevadas a cabo por Ramírez-Álvarez, C., et al. (2020) han resaltado la importancia de desarrollar y aplicar tecnologías de tratamiento adecuadas para abordar los desafíos específicos asociados con las aguas residuales mineras en México. Estas tecnologías pueden incluir sistemas de tratamiento fisicoquímico, biológico y de separación de sólidos, entre otros.

En resumen, los estudios realizados por López-Maldonado et al., Martínez-Soto et al., Orozco et al. y Ramírez-Álvarez et al. Proporcionan una visión integral de los antecedentes del tratamiento de aguas residuales de la industria minera en México, destacando la importancia de la legislación ambiental, la tecnología y la investigación en este campo.



1.2 Planteamiento Del Problema

La industria minera es una de las actividades económicas más importantes en muchos países, pero también es conocida por generar grandes volúmenes de agua residual que pueden contener una variedad de contaminantes, incluyendo metales pesados y productos químicos tóxicos. La gestión adecuada de estas aguas residuales es esencial para prevenir impactos ambientales negativos y proteger la salud humana.

Entre las diversas tecnologías de tratamiento disponibles, el proceso de clarificación con coagulantes y polímeros comerciales ha surgido como una opción prometedora para la eliminación de sólidos suspendidos y la reducción de la turbidez en aguas residuales mineras. Sin embargo, a pesar de su potencial, aún existen desafíos significativos que deben abordarse para optimizar su eficiencia y viabilidad en el contexto específico de la industria minera.

Uno de los principales problemas radica en la diversidad y complejidad de los contaminantes presentes en las aguas residuales mineras, que pueden variar según el tipo de mineral extraído y los procesos de extracción utilizados. Esta diversidad puede dificultar la selección adecuada de coagulantes y polímeros comerciales, así como la optimización de las condiciones de tratamiento.

Además, la eficacia del proceso de clarificación puede verse afectada por factores como la variabilidad en la calidad y cantidad de las aguas residuales, las condiciones climáticas, y las limitaciones de infraestructura y recursos técnicos en algunas áreas mineras. Estos desafíos pueden influir en la capacidad de las plantas de tratamiento para cumplir con los estándares ambientales y las regulaciones gubernamentales, lo que a su vez puede resultar en riesgos para el medio ambiente y la salud pública.

Por lo tanto, es crucial investigar y abordar de manera sistemática los desafíos asociados con el tratamiento del agua residual de la industria minera mediante el proceso de clarificación con coagulantes y polímeros comerciales. Esto incluye la evaluación de la eficacia de diferentes productos químicos, la optimización de las condiciones de tratamiento, y el desarrollo de estrategias para gestionar la variabilidad en las características del agua residual y las condiciones operativas. Además, se requiere una mayor comprensión de los impactos ambientales y económicos del proceso de clarificación, así como la identificación de enfoques integrados y sostenibles para el tratamiento de aguas residuales mineras.



En resumen, el tratamiento del agua residual de la industria minera mediante el proceso de clarificación con coagulantes y polímeros comerciales presenta un conjunto único de desafíos que requieren atención y soluciones innovadoras para garantizar su eficiencia y sostenibilidad a largo plazo.

1.3 Justificación

La problemática del agua residual de la industria minera en el ambiente es multifacética y conlleva una serie de impactos ambientales negativos. Algunos de los principales problemas asociados son:

1. Contaminación química: Las aguas residuales de la minería suelen contener una variedad de productos químicos tóxicos y metales pesados como arsénico, plomo, mercurio, cianuro, entre otros. Estos contaminantes pueden infiltrarse en los cuerpos de agua cercanos, afectando la calidad del agua y poniendo en riesgo la salud humana y la vida acuática.
2. Acidificación: La extracción de minerales puede generar aguas residuales altamente ácidas, conocidas como drenaje ácido de mina (DAM). Este fenómeno se produce cuando los minerales expuestos al aire y al agua reaccionan, liberando ácido sulfúrico y metales pesados. El DAM puede acidificar ríos, arroyos y acuíferos, dañando los ecosistemas acuáticos y reduciendo la biodiversidad.
3. Sedimentación y turbidez: Las actividades mineras pueden aumentar la sedimentación y la turbidez del agua debido a la erosión del suelo y la remoción de cobertura vegetal. Esto puede obstruir los cauces de los ríos, reducir la penetración de la luz solar en el agua y afectar negativamente la fotosíntesis de las plantas acuáticas, así como la reproducción de los organismos acuáticos.
4. Impacto en la salud humana: La contaminación del agua por parte de la industria minera puede tener graves consecuencias para la salud humana, especialmente en comunidades cercanas a las operaciones mineras que dependen del agua para consumo, agricultura y actividades recreativas. La exposición a metales pesados y otros contaminantes puede causar enfermedades graves como cáncer, problemas neurológicos y daños en órganos internos.
5. Pérdida de hábitat y biodiversidad: La degradación del agua debido a la actividad minera puede provocar la pérdida de hábitat y la disminución de la biodiversidad en los ecosistemas acuáticos. Esto afecta a las especies acuáticas, como peces y anfibios, así como a las aves y mamíferos que dependen de estos hábitats para alimentarse y reproducirse.



Dicho esto, las aguas residuales de la industria minera son una grave amenaza tanto para los ecosistemas acuáticos como para la salud humana. Es imperativo implementar medidas efectivas de gestión y mitigación para reducir sus efectos adversos en el medio ambiente. Por esta razón, este estudio se centró en facilitar el tratamiento de estas aguas, enfocándose en determinar la dosificación óptima de diversos coagulantes y polímeros utilizados en la investigación.



SEV
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN
DEL ESTADO DE VERACRUZ



SEP
SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



DET
Dirección de Educación
Tecnológica del Estado
de Veracruz

1.4 Hipótesis

1.-La aplicación de múltiples dosificaciones de coagulantes y floculantes en el proceso de clarificación del agua residual de la actividad minera influirá significativamente en su eficiencia, evidenciado por una mayor eliminación de sólidos suspendidos y una reducción de la turbidez.

2.- Al aplicar dosis altas de floculante incrementará la turbidez del agua perjudicando el sistema de tratamiento.



1.5 Objetivos

Objetivo General:

Determinar la combinación de coagulante y floculante en el proceso de clarificación del agua residual de la actividad minera que permitan disminuir la concentración de turbidez, sólidos suspendidos y sólidos suspendidos totales para mejorar la eficiencia del tratamiento químico.

Objetivos Específicos:

1. Analizar el efecto de diferentes tipos de coagulantes y floculantes en el tratamiento de las aguas residuales provenientes de la industria minera, evaluando su capacidad para disminuir la turbidez y sólidos.
2. Analizar el efecto de la dosis de diferentes tipos de coagulantes y floculantes en el tratamiento de las aguas residuales provenientes de la industria minera, evaluando su capacidad para disminuir la turbidez y sólidos.

2. MARCO TEORICO

2.1 Generalidades De Las Aguas Residuales De La Industria Minera.

Las aguas residuales generadas por la industria minera representan una preocupación ambiental significativa debido a su composición química compleja y su potencial impacto en los ecosistemas acuáticos circundantes. En este sentido, se hace necesario comprender las características fundamentales de estas aguas residuales para implementar estrategias efectivas de tratamiento y mitigación de su impacto ambiental.

La composición de las aguas residuales de la industria minera varía considerablemente dependiendo del tipo de mineral procesado y los procesos específicos involucrados en la extracción y el procesamiento del mineral. Según Ríos, M. (2018), las aguas residuales mineras pueden contener una variedad de contaminantes, como metales pesados, compuestos orgánicos, materiales en suspensión y productos químicos utilizados en el proceso de extracción y beneficio del mineral.

Los metales pesados, como el plomo, el zinc, el cobre y el mercurio, son algunos de los contaminantes más comunes presentes en las aguas residuales mineras. Según Li, C. et al. (2019), la presencia de estos metales en las aguas residuales mineras puede tener efectos adversos en la calidad del agua y en los ecosistemas acuáticos, afectando la salud de la fauna y la flora locales.

Además de los metales pesados, los compuestos orgánicos también pueden estar presentes en las aguas residuales de la industria minera como resultado de los procesos de lixiviación y flotación. Estos compuestos pueden incluir solventes, surfactantes y otros productos químicos utilizados en el procesamiento del mineral. Según García, J. et al. (2020), la presencia de compuestos orgánicos en las aguas residuales mineras puede tener efectos nocivos en los organismos acuáticos y en la calidad del agua, especialmente cuando se liberan en el medio ambiente sin un tratamiento adecuado.

El tratamiento de las aguas residuales de la industria minera es fundamental para minimizar su impacto ambiental y cumplir con las regulaciones ambientales vigentes. Según López, A. et al. (2021), las tecnologías de tratamiento comúnmente utilizadas incluyen la sedimentación, la filtración, la adsorción, la precipitación química y la biodegradación. Sin



embargo, debido a la complejidad de la composición de las aguas residuales mineras, a menudo se requiere una combinación de diferentes tecnologías para lograr una remoción efectiva de los contaminantes.

2.1.1.-Procesos De Generación De Aguas Residuales

La industria minera es una de las actividades humanas que más impacto tiene en el medio ambiente, incluyendo la generación de aguas residuales contaminadas. Comprender cómo se generan estas aguas residuales es crucial para implementar medidas efectivas de prevención y tratamiento.

La generación de aguas residuales en la industria minera puede atribuirse a varios procesos y actividades. Según González et al. (2018), "Los principales procesos que contribuyen a la generación de aguas residuales en la minería incluyen la extracción, el transporte, la trituración y la lixiviación de minerales." Durante la extracción y el transporte de minerales, se pueden generar aguas residuales debido a la presencia de lodos y partículas finas que se mezclan con el agua (López, 2019). Además, la trituración y la lixiviación de minerales pueden liberar compuestos químicos tóxicos que contaminan el agua circundante (Sánchez, 2021).

Existen varios factores que pueden influir en la generación de aguas residuales en la industria minera. La geología del sitio minero y la composición de los minerales pueden afectar la calidad del agua subterránea y superficial (Martínez, 2020). Además, las prácticas de gestión de residuos y el manejo de productos químicos utilizados en los procesos mineros pueden influir significativamente en la generación de aguas residuales contaminadas (Gómez, 2017).

2.1.2.- Impacto De Las Aguas Residuales En El Ambiente.

Las aguas residuales generadas por la industria minera pueden tener un impacto devastador en el medio ambiente y la salud humana. Según Rodríguez (2019), "La descarga de aguas residuales mineras puede contaminar ríos, arroyos y cuerpos de agua subterránea, afectando la vida acuática y comprometiendo la disponibilidad de agua potable para las comunidades cercanas." Además, los metales pesados y otros contaminantes presentes en las aguas residuales mineras pueden persistir en el medio ambiente durante largos períodos, causando daños a largo plazo en los ecosistemas acuáticos y terrestres (Chávez, 2018).



El impacto de estas aguas residuales puede ser significativo y abarca varios aspectos del medio ambiente, desde la calidad del agua hasta la biodiversidad de los ecosistemas acuáticos y terrestres.

- Contaminación del Agua

Uno de los impactos más evidentes de las aguas residuales mineras es la contaminación del agua. Los efluentes mineros pueden contener una amplia gama de sustancias químicas tóxicas, incluyendo metales pesados como el plomo, el arsénico y el mercurio, así como compuestos orgánicos y ácidos provenientes de procesos de lixiviación y tratamiento de minerales (Bustamante et al., 2018). Estos contaminantes pueden afectar negativamente la calidad del agua superficial y subterránea, comprometiendo su potabilidad y su capacidad para mantener la vida acuática (González, 2019).

- Impacto en los Ecosistemas Acuáticos

Las aguas residuales mineras pueden tener efectos devastadores en los ecosistemas acuáticos. La liberación de metales pesados y otros contaminantes puede causar la muerte de organismos acuáticos y la degradación de hábitats naturales (Moreno, 2020). Además, los contaminantes pueden bioacumularse en la cadena alimentaria, lo que puede tener repercusiones a largo plazo en la biodiversidad y la salud de los ecosistemas acuáticos (López, 2021).

- Impacto en los Ecosistemas Terrestres

El impacto de las aguas residuales mineras no se limita solo a los ecosistemas acuáticos, sino que también puede extenderse a los ecosistemas terrestres. La descarga de efluentes contaminados puede contaminar el suelo y afectar la calidad del aire a través de la generación de polvo y la liberación de compuestos volátiles (Chávez, 2019). Esto puede tener efectos adversos en la salud de la flora y fauna terrestres, así como en la salud humana en áreas cercanas a las operaciones mineras (Sánchez, 2022).

2.1.3 Calidad Y Características Del Agua De Laboreo De La Industria Minera

El término calidad de agua alude al conjunto de parámetros o condiciones naturales que necesita conservar el agua sin alterar su composición física, química y microbiológica,

dependiendo del uso que le haya asignado, señalan que el agua puede ser utilizada para diferentes antrópicas como: agua potable, recreación, riego y bebida de animales, entre otros (Casilla, 2014). La calidad del agua depende de una agrupación de variables y factores que caracterizan a la variedad de cuerpos de agua en términos cuantitativos (Casilla, 2014).

Es fundamental entender la composición del agua residual industrial para la planificación y la operación del tratamiento en la industria minera, incluyendo la recolección, tratamiento y evacuación de aguas residuales. A continuación, se detallan los componentes físicos-químicos de las aguas residuales provenientes de la mina, destacando el contaminante clave que necesitan un tratamiento especializado.

- Características físicas

1. Turbidez: La turbidez se considera un parámetro fundamental para evaluar las propiedades de transmisión de la luz en el agua, ya que está directamente relacionada con la presencia de materia coloidal y partículas suspendidas. Su medición se realiza mediante la comparación de la intensidad de la luz dispersada en la muestra con la registrada en una suspensión de referencia, bajo las mismas condiciones, lo cual permite estimar el grado de turbidez presente en el sistema evaluado. La turbiedad del agua está causada por el material en suspensión (Tejada, 2017).
2. Color: El color en las aguas ácidas suele presentarse en tonalidades amarillentas, anaranjadas o grisáceas, lo cual se atribuye principalmente a la formación de sulfuros metálicos. Este fenómeno ocurre como resultado de la reacción del sulfuro liberado en condiciones anaerobias con los metales disueltos presentes en los drenajes ácidos provenientes de actividades mineras.
3. Temperatura: La temperatura de los drenajes ácidos de mina suele ser superior a la del agua en condiciones naturales. Este parámetro resulta de gran relevancia debido a su influencia tanto en el desarrollo de la vida acuática como en la cinética de las reacciones químicas. Además, se considera que la temperatura óptima para la actividad bacteriana se encuentra en un rango de 25 °C a 35 °C, favoreciendo así diversos procesos biogeoquímicos en medios acuáticos contaminados.

- Características químicas

1. Metales pesados: Metales pesados: Los metales pesados representan componentes significativos en muchas aguas, incluso cuando se encuentran en concentraciones traza. Entre los más comunes se identifican el níquel (Ni), manganeso (Mn), plomo (Pb), cromo (Cr), cadmio (Cd), zinc (Zn), cobre (Cu), hierro (Fe) y mercurio (Hg). Muchos de estos elementos están clasificados como contaminantes prioritarios, debido a su toxicidad, persistencia en el medio ambiente y capacidad de bioacumulación, lo que los convierte en un riesgo potencial para la salud humana y los ecosistemas acuáticos.
2. pH: La concentración de iones hidrógeno, expresada como pH, constituye un parámetro esencial para evaluar la calidad tanto de aguas naturales como residuales. En el caso particular de los drenajes ácidos de mina, los valores de pH suelen encontrarse dentro de un rango bajo, generalmente entre 1.0 y 4.5, lo que indica una alta acidez que puede intensificar la solubilización de metales pesados y afectar negativamente a los organismos acuáticos y a los procesos de tratamiento posteriores.
3. Sólidos totales en suspensión: Los sólidos suspendidos totales o el residuo no filtrable de una muestra de agua natural o residual industrial o doméstica, se definen como la porción de sólidos retenidos por un filtro de fibra de vidrio que posteriormente se seca a 103° - 105° C hasta peso constante. Este método es aplicable a aguas potables, Superficiales, y salinas, aguas residuales domésticas e industriales y lluvia ácida (Marin, 2011).

2.1.4.- Normatividad Aplicable

- La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales Tiene como objetivos preservar los derechos humanos al agua y al saneamiento, así como garantizar su disponibilidad, accesibilidad, asequibilidad, calidad y seguridad y admisibilidad de los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la Nación.
- Al respecto la SEMARNAT-2021, establece esta herramienta que tiene como objetivos preservar los derechos humanos al agua y al saneamiento, consagrados en



el artículo 4° de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, así como garantizar su disponibilidad, accesibilidad, asequibilidad, calidad y seguridad y admisibilidad.

- Se cumple así con la obligación establecida en el artículo 85 de la Ley de Aguas Nacionales relativa a que las personas físicas o morales, que exploten, usen o aprovechen aguas nacionales en cualquier actividad, serán responsables de realizar las medidas necesarias para prevenir su contaminación y, en su caso, para reintegrar las aguas en condiciones adecuadas, a fin de permitir su explotación, uso o aprovechamiento posterior, y mantener el equilibrio de los ecosistemas vitales.
- La NOM-001-SEMARNAT-2021 será de observancia obligatoria para los responsables de las descargas de aguas residuales en cualquier tipo de cuerpo receptor propiedad de la Nación y tendrá un cumplimiento y vigencia gradual, establecida en sus artículos transitorios, entrando en vigor a los 365 días naturales posteriores a su publicación en el Diario Oficial de la Federación.
- Entre los aspectos que se actualizan en la NOM-001-SEMARNAT-2021 se encuentran las especificaciones, métodos de prueba, muestreos, parámetros de temperatura, medición de la toxicidad, procedimiento para la evaluación de la conformidad, la clasificación de los cuerpos receptores y el enfoque de usos posteriores para mejorar la gestión y la protección de los cuerpos de agua, así como la concordancia con normas internacionales.
- Norma de caracterización de agua

2.2.-Tratamiento De Aguas De Laboreo De La Industria Minera.

Como se ha observado en nuestro país, la industria minera es uno de los principales usuarios de agua, lo que ha generado preocupación por el impacto en su disponibilidad, especialmente en regiones donde hay escasez hídrica.

A pesar de que el agua de laboreo no se encuentra sujeta a una normativa específica, su relevancia es considerable, ya que gran parte de la actividad minera en México se desarrolla en regiones caracterizadas por una marcada escasez de recursos hídricos. Ya que estas aguas pueden contener metales pesados, minerales disueltos y otros contaminantes que representan un riesgo significativo para los ecosistemas acuáticos y la salud pública (Harris et al., 2018). Por lo tanto, la implementación de tratamientos adecuados es esencial para mitigar estos impactos.

Los métodos de que existen y son empleados en el tratamiento de las aguas residuales son los siguientes esto se describen con más detalle en los capítulos siguientes:

Tratamientos Físicos

Los tratamientos físicos son fundamentales en las etapas iniciales de la gestión de aguas residuales. Estos métodos incluyen:

- **Sedimentación:** Este proceso permite la separación de sólidos suspendidos mediante la gravedad. Según Ghosh et al. (2019), la sedimentación puede eliminar hasta el 90% de los sólidos en suspenso, lo que es crucial para el tratamiento eficiente de aguas residuales mineras.
- **Filtración:** La filtración a través de diferentes medios, como arena y carbón activado, ayuda a eliminar partículas más pequeñas. La investigación de Cordero et al. (2020) destaca que la filtración puede reducir significativamente la turbidez del efluente.

Tratamientos Químicos

Los métodos químicos son empleados para transformar la composición química de las aguas residuales, facilitando la eliminación de contaminantes.

- **Coagulación y Floculación:** Este proceso implica la adición de coagulantes para aglomerar partículas finas en flóculos. Un estudio realizado por Awasthi et al. (2017)



demonstró que la coagulación y floculación pueden reducir la concentración de metales pesados hasta en un 80%.

- **Neutralización:** El ajuste del pH es esencial para prevenir la corrosión y la toxicidad. Según la investigación de Kumar y Sinha (2021), la neutralización es clave para cumplir con los estándares de descarga establecidos.

Tratamientos Biológicos

El tratamiento biológico utiliza microorganismos para degradar contaminantes orgánicos presentes en las aguas residuales.

- **Lagos de estabilización:** Estos sistemas naturales permiten la descomposición de contaminantes de manera eficiente. Según el estudio de Brix et al. (2018), los lagos de estabilización pueden reducir la carga orgánica en más del 70% en condiciones óptimas.
- **Reactores biológicos:** Métodos como los lodos activados son comunes en el tratamiento de aguas residuales. Un análisis realizado por Zhang et al. (2020) subraya que estos sistemas pueden alcanzar una eficiencia de eliminación de BOD del 95%.

Tratamientos Avanzados

Las tecnologías avanzadas ofrecen soluciones efectivas para la remoción de contaminantes persistentes.

- **Membranas de ultrafiltración:** Este método permite la separación de contaminantes a nivel molecular. Según Chen et al. (2022), la ultrafiltración puede eliminar hasta el 99% de los sólidos disueltos y microorganismos.
- **Ósmosis inversa:** Aunque costosa, es muy eficaz en la eliminación de sales y metales pesados. Un estudio de Liu et al. (2019) indica que la ósmosis inversa puede alcanzar una recuperación de agua del 80%, convirtiendo el agua residual en un recurso reutilizable.



2.2.1. Procesos Biológicos

En los procesos de depuración de aguas residuales, los tratamientos biológicos se convierten en una alternativa de gran importancia. Su aplicación se fundamenta en la capacidad de los microorganismos para eliminar por digestión y descomposición la materia orgánica biodegradable presente en aguas residuales (Behling et.al., 2003). Estos sistemas surgen como una alternativa para el tratamiento de efluentes de aguas residuales domésticas o industriales en plantas que operan en varias partes del mundo (Gonzalez-Martinez et. al. 2011), (Courstens et. al. 2014).

2.2.1.1. Procesos Biológicos Aerobios

Los tratamientos aerobios aplicados al manejo de aguas residuales se fundamentan en la capacidad de ciertos microorganismos para degradar materia orgánica utilizando oxígeno como aceptor final de electrones. Esta característica les confiere una mayor eficiencia en términos de aprovechamiento energético. Dichos sistemas emplean la acción metabólica de estos organismos para asimilar los compuestos orgánicos y nutrientes disueltos en el agua residual, promoviendo su crecimiento y reproducción. La presencia de oxígeno facilita el proceso de oxidación biológica, actuando como agente terminal en la cadena de transporte electrónico, lo que se traduce en altos rendimientos energéticos y en la formación de lodos biológicos como subproducto del tratamiento.

2.2.1.2. Procesos Biológicos Anaerobios

Los procesos anaerobios aplicados al tratamiento de aguas residuales se basan en la degradación de la materia orgánica en condiciones de ausencia de oxígeno. Una de sus principales ventajas es la baja generación de lodos en comparación con los sistemas aerobios. Además, este tipo de tratamiento permite la producción de biogás, el cual puede ser valorizado como fuente de energía renovable.

No obstante, el tratamiento anaerobio presenta limitaciones significativas, como una menor eficiencia en la eliminación de contaminantes, calidad reducida del efluente y una mayor inestabilidad operacional. Estas desventajas han restringido su implementación masiva en aplicaciones convencionales de tratamiento de aguas residuales, especialmente cuando se requiere una alta calidad en el agua tratada.

Ante estas limitaciones, la tecnología de biorreactores con membrana (MBR, por sus siglas en inglés) surge como una alternativa que permite superar muchas de las restricciones del proceso anaerobio convencional. Esta tecnología combina las ventajas propias del tratamiento anaerobio con la eficiencia de la separación por membranas, lo que resulta en un sistema compacto y robusto. Entre sus beneficios se destacan la mejora en la eliminación de materia orgánica, una mayor generación de biogás y la obtención de un efluente de alta calidad, completamente libre de sólidos y material coloidal, lo que a su vez reduce o elimina la necesidad de procesos de postratamiento y disminuye los costos operativos asociados.

2.2.3. Procesos Físicos.

A diferencia de los procesos biológicos y químicos, los tratamientos físicos se enfocan en separar los contaminantes del agua a través de principios mecánicos y físicos, como la filtración, la sedimentación, la flotación y la adsorción. A continuación, se describirán los más empleados en el tratamiento de las aguas residuales

- Sedimentación

La sedimentación es uno de los procesos físicos más antiguos y fundamentales en el tratamiento de aguas residuales. Consiste en la separación de los sólidos suspendidos en el agua mediante la acción de la gravedad. Este proceso ocurre en tanques de sedimentación, también conocidos como clarificadores o decantadores, donde el agua se mantiene en reposo por un tiempo determinado, permitiendo que los sólidos más pesados se hundan al fondo, formando un lodo que debe ser posteriormente retirado.

Según Metcalf y Eddy (2014), la sedimentación es efectiva para remover partículas gruesas y de mayor tamaño, tales como arenas, grava, y otros sólidos pesados, pero no es eficiente para la eliminación de sólidos finos o disueltos. Para mejorar la eficiencia, en muchas plantas se emplean floculantes que agregan materiales químicos al agua para formar flóculos (agregados de partículas), los cuales se sedimentan más fácilmente.

La eficiencia del proceso de sedimentación depende de varios factores, como la velocidad de sedimentación de los sólidos, el tiempo de retención en el tanque, el tamaño de los sólidos y las características del agua residual. Grady et al. (2011) destacan que la sedimentación es crucial en la primera etapa de tratamiento de aguas residuales, especialmente en las plantas



de tratamiento de aguas municipales y en procesos industriales donde se generan grandes cantidades de sólidos suspendidos.

- Filtración

La filtración es otro proceso físico ampliamente utilizado en el tratamiento de aguas residuales. Este proceso implica el paso del agua a través de un medio filtrante que retiene las partículas sólidas presentes en el agua. Los filtros pueden estar compuestos por materiales como arena, grava, carbón activado o membranas sintéticas. Los sistemas de filtración pueden clasificarse según el tipo de medio filtrante y el tamaño de las partículas a eliminar: filtros de arena, filtros de carbón activado y membranas de microfiltración y ultrafiltración.

- Filtros de Arena: Los filtros de arena son los más comunes en los sistemas de tratamiento de aguas residuales, especialmente en el tratamiento primario y secundario. Estos filtros retienen partículas suspendidas en el agua, como sólidos orgánicos e inorgánicos, y mejoran la calidad del agua. Según Tchobanoglous et al. (2003), los filtros de arena son efectivos para remover partículas finas de entre 20 y 100 micras y pueden ser operados de forma continua o mediante un sistema de retro-lavado, que permite mantener su eficiencia de filtrado durante más tiempo.
- Filtros de Carbón Activado: El carbón activado es un material altamente poroso que tiene la capacidad de adsorber compuestos orgánicos disueltos, como compuestos orgánicos volátiles (COVs) y productos químicos. Los filtros de carbón activado son muy eficaces para el tratamiento de aguas residuales industriales, donde pueden existir contaminantes orgánicos en baja concentración. Según Baker et al. (2006), este proceso es eficaz no solo para la remoción de sólidos, sino también para la eliminación de olores y sabores no deseados en el agua.
- Filtración por Membranas: Las tecnologías de filtración por membranas, como la microfiltración (MF), ultrafiltración (UF), nanofiltración (NF) y ósmosis inversa (RO), están ganando terreno en el tratamiento de aguas residuales debido a su capacidad para eliminar partículas microscópicas, bacterias y otros contaminantes disueltos. El Gohari et al. (2013) señalaron que las membranas permiten alcanzar una



alta calidad de efluentes, eliminando sólidos suspendidos, microorganismos y algunos compuestos disueltos en el agua.

- Flotación

La flotación es un proceso físico que se utiliza para eliminar partículas finas de sólidos suspendidos, en especial aquellos que tienen una densidad menor que el agua, como aceites, grasas y espumas. En el proceso de flotación, se introduce aire en el agua residual mediante un sistema de burbujas, lo que genera una flotación de las partículas más ligeras hacia la superficie, donde se pueden retirar. Este proceso es comúnmente utilizado en la flotación por aire disuelto (DAF, por sus siglas en inglés).

Según Bhatnagar et al. (2013), la flotación es particularmente eficaz en el tratamiento de aguas residuales industriales, especialmente en industrias que manejan aceites y grasas, como las industrias alimentaria, textil y petroquímica. La flotación por aire disuelto se usa con éxito para la eliminación de aceites, grasas y otros compuestos en emulsión, y en algunas ocasiones, se utiliza como pretratamiento para procesos posteriores de sedimentación o filtración.

- Adsorción

La adsorción es un proceso físico en el que los contaminantes disueltos en el agua se adhieren a la superficie de un material adsorbente. El material más comúnmente utilizado para la adsorción es el carbón activado, aunque también se pueden usar otros materiales como resinas sintéticas o zeolitas. Este proceso es especialmente útil para la remoción de compuestos orgánicos y productos químicos no biodegradables que no pueden ser eliminados eficientemente por otros procesos.

Zhang et al. (2015) demostraron que el uso de carbón activado en la adsorción es eficaz en la eliminación de productos farmacéuticos, pesticidas y contaminantes emergentes en las aguas residuales urbanas e industriales. La principal limitación de este proceso es la saturación del material adsorbente, que requiere regeneración o reemplazo periódico.

2.2.4. Procesos Químicos

Los procesos químicos son aquellos que se llevan a través de la adición de reactivos químicos, es posible modificar las propiedades del agua, precipitar o descomponer contaminantes, y mejorar la calidad del efluente para su posterior uso o vertido. Los procesos químicos son comúnmente utilizados para tratar aguas residuales industriales y municipales con una alta carga de contaminantes inorgánicos, metales pesados, compuestos orgánicos complejos, nutrientes, y otros compuestos no biodegradables. A continuación, se describirán los más empleados en el tratamiento de las aguas residuales.

- Coagulación y Floculación

La coagulación y floculación son procesos químicos esenciales en el tratamiento primario y secundario de aguas residuales, especialmente en la remoción de sólidos suspendidos, coloides, y partículas muy finas. Estos procesos implican la adición de coagulantes y floculantes que ayudan a aglomerar partículas pequeñas y dispersas en el agua, formando flóculos que luego pueden ser removidos por sedimentación o filtración.

- Coagulación: La coagulación es el proceso en el que se añaden sales metálicas como sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) o cloruro férrico (FeCl_3) al agua. Estas sustancias se disuelven en el agua y neutralizan las cargas eléctricas de las partículas suspendidas, lo que permite que las partículas se agrupen.
- Floculación: Una vez que las partículas se han coagulado, se añaden floculantes, como polímeros orgánicos de alto peso molecular, que promueven la aglomeración de las partículas coaguladas, formando flóculos grandes que pueden ser fácilmente eliminados.

Según Tchobanoglous et al. (2003), la coagulación y floculación son ampliamente utilizadas en el tratamiento de aguas residuales municipales e industriales. Estos procesos son muy efectivos en la remoción de sólidos suspendidos, materia orgánica y algunos metales pesados. Además, permiten mejorar la eficiencia de procesos de sedimentación y filtración.

- Neutralización y Precipitación Química

La neutralización es un proceso químico utilizado para ajustar el pH de las aguas residuales, especialmente cuando el agua presenta valores extremos de acidez o alcalinidad. Se logra

mediante la adición de ácidos o bases al agua para llevar el pH a un nivel más neutral (cerca de 7), facilitando el tratamiento posterior de otros contaminantes.

Por otro lado, la precipitación química es un proceso utilizado para remover iones disueltos, especialmente metales pesados y otros contaminantes inorgánicos, mediante la adición de reactivos químicos que forman compuestos insolubles, que luego se precipitan y pueden ser eliminados del agua.

- Neutralización: Para aguas ácidas, se utilizan bases como la cal (Ca(OH)_2) o el carbonato de sodio (Na_2CO_3). En aguas alcalinas, se usan ácidos como el ácido sulfúrico (H_2SO_4) o el ácido clorhídrico (HCl) para reducir el pH.
- Precipitación de Metales Pesados: Para remover metales como plomo (Pb), cobre (Cu), cadmio (Cd), y cinc (Zn), se utilizan agentes precipitantes como sulfuro de sodio (Na_2S), hidróxido de sodio (NaOH) o carbonato de sodio (Na_2CO_3), que reaccionan con los metales y forman precipitados insolubles que se pueden retirar por sedimentación o filtración.

Según Laohaprapanon et al. (2015), la precipitación química es un proceso ampliamente utilizado en la remoción de metales pesados y otros contaminantes inorgánicos en aguas residuales industriales, especialmente en la industria metalúrgica, química y textil. Este proceso permite una remoción eficiente de metales pesados a niveles muy bajos, lo que es esencial para cumplir con las normativas ambientales.

3. Oxidación Química

La oxidación química es un proceso en el que se emplean agentes oxidantes fuertes para destruir o transformar compuestos orgánicos e inorgánicos presentes en las aguas residuales. Este proceso es particularmente útil para la degradación de compuestos orgánicos recalcitrantes, como pesticidas, solventes industriales y productos farmacéuticos, que no pueden ser biodegradados fácilmente.

- Ozono (O_3): El ozono es uno de los oxidantes más utilizados en el tratamiento de aguas residuales debido a su capacidad para destruir una amplia gama de



contaminantes orgánicos y microorganismos patógenos. Según González et al. (2007), la oxidación con ozono es eficaz para la eliminación de compuestos tóxicos y contaminantes emergentes en aguas residuales industriales y urbanas.

- **Peróxido de Hidrógeno (H_2O_2):** El peróxido de hidrógeno se utiliza como agente oxidante en procesos de oxidación avanzada, especialmente cuando se combina con radiación UV o catalizadores para aumentar su efectividad en la descomposición de compuestos orgánicos complejos.
- **Cloro (Cl_2):** El cloro, tradicionalmente utilizado en la desinfección de aguas, también se emplea en la oxidación de ciertos compuestos orgánicos e inorgánicos. Wang et al. (2011) indican que la aplicación de cloro en aguas residuales es eficaz para la remoción de compuestos orgánicos y la desinfección de patógenos.

2.2.6. Procesos Físicos Químicos

El tratamiento de aguas residuales involucra una variedad de tecnologías, las cuales se agrupan según el principio físico, químico o biológico utilizado para tratar las aguas contaminadas. Dentro de estas, los tratamientos fisicoquímicos combinan las propiedades de procesos físicos y químicos para eliminar contaminantes del agua, principalmente aquellos difíciles de eliminar por métodos biológicos tradicionales. Estos tratamientos son especialmente útiles cuando se enfrentan aguas residuales industriales con altas concentraciones de contaminantes orgánicos e inorgánicos, metales pesados, aceites, grasas, compuestos tóxicos o contaminantes emergentes.

El tratamiento fisicoquímico de aguas residuales es un campo complejo y dinámico, que implica una variedad de técnicas diseñadas para mejorar la eficiencia y reducir los costos operativos, mientras se asegura que el agua tratada cumpla con los requisitos ambientales y de seguridad para su uso o disposición.

2.3. Procesos De Coagulación Y Floculación

La coagulación y floculación son procesos fisicoquímicos esenciales en el tratamiento de aguas residuales, tanto municipales como industriales. Se aplican en las fases primaria y secundaria para reducir la turbidez, mejorar la clarificación y eliminar partículas coloidales y finas que no pueden ser removidas por métodos puramente físicos. Mediante la adición de reactivos químicos, estos procesos alteran las propiedades del agua, promoviendo la formación de flóculos—partículas de mayor tamaño que pueden ser eliminadas eficientemente por sedimentación o filtración. Este capítulo explora en detalle los mecanismos, reactivos, aplicaciones y avances recientes en la optimización de estas técnicas.

2.3.1. Definición De Los Mecanismos De Coagulación Y Floculación.

La coagulación es el proceso mediante el cual se añaden sustancias químicas, conocidas como coagulantes, a las aguas residuales para neutralizar las cargas de las partículas suspendidas en el agua. Al neutralizar estas cargas, las partículas de contaminantes se aglutinan y forman agregados más grandes que pueden ser removidos de manera más eficiente. La coagulación es eficaz para eliminar partículas finas y coloides que permanecen suspendidas en el agua debido a las fuerzas de repulsión electrostática.

Mecanismo de la Coagulación: Cuando se añaden coagulantes como el sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) o cloruro férrico (FeCl_3), estos compuestos liberan iones que neutralizan las cargas de las partículas suspendidas. Esto reduce la repulsión entre las partículas y permite su agregación en flóculos más grandes. Este proceso es favorecido por la agitación rápida en el agua, que ayuda a distribuir uniformemente los coagulantes.

Según Tchobanoglous et al. (2003), la coagulación puede ser influenciada por factores como el pH del agua, la dosis de coagulante, la temperatura y la concentración de contaminantes. Es por esto por lo que un control preciso de estas variables es esencial para optimizar el proceso de coagulación.

La floculación sigue a la coagulación y tiene como objetivo agrupar los flóculos generados en la coagulación en partículas aún más grandes y densas. Este proceso implica la adición de sustancias conocidas como floculantes, que son generalmente polímeros de alto peso molecular. Los floculantes tienen una estructura que permite que se adhieran a los flóculos

pequeños, uniendo más partículas en estructuras mayores y más pesadas que se sedimentan con mayor facilidad.

Mecanismo de la Floculación: En la floculación, los floculantes forman una red de polímeros que capturan las partículas suspendidas. Este proceso ocurre en una etapa de agitación más lenta, que permite que las partículas se unan sin romper los flóculos formados en la coagulación. Durante esta fase, se realiza una agitación suave que promueve la formación de flóculos más grandes sin que estos se desintegren.

Según Metcalf & Eddy (2014), el tiempo de agitación es crucial para la floculación exitosa, ya que el uso excesivo de agitación puede deshacer los flóculos y hacer que el proceso sea menos eficiente.

2.3.2. Reactivos

- Coagulantes Comunes

Los coagulantes más utilizados incluyen:

Sulfato de aluminio ($Al_2(SO_4)_3$): Es el coagulante más utilizado en plantas de tratamiento de aguas residuales debido a su bajo costo y eficacia en la eliminación de sólidos suspendidos.

Cloruro férrico ($FeCl_3$): Se utiliza principalmente para la remoción de sólidos suspendidos y la eliminación de algunos metales pesados, gracias a su capacidad para formar complejos con ciertos iones metálicos.

Policloruro de aluminio (PAC): Este coagulante, una forma de aluminio clorurado, es eficaz para una amplia gama de contaminantes y presenta algunas ventajas en términos de la generación de lodo.

- Floculantes Comunes:

Polímeros catiónicos: Son los más utilizados debido a su capacidad para adherirse a las partículas cargadas negativamente, favoreciendo la formación de flóculos.

Polímeros aniónicos: Se utilizan en casos en los que los contaminantes tienen carga positiva, ayudando a la agregación de las partículas.

Floculantes no iónicos: Suelen emplearse cuando no hay una diferencia clara en las cargas de las partículas, ayudando a la aglomeración sin una interacción fuerte con los iones.

2.3.3. Clasificación De Reactores

Definición de Reactor Químico.

Un reactor químico se define como un sistema diseñado específicamente para facilitar la realización controlada de una o más reacciones químicas dentro de un entorno confinado. Esta unidad está conformada por un recipiente cerrado que incorpora entradas y salidas para los reactivos y productos, y opera bajo la supervisión de un sistema de control automatizado que regula las condiciones de operación.

Las funciones esenciales de un reactor químico se orientan a:

1. Establecer un patrón de flujo adecuado de los reactantes dentro del sistema, que favorezca una mezcla eficiente y homogénea de las sustancias implicadas.
2. Garantizar un tiempo de residencia óptimo de los compuestos y del catalizador (en caso de requerirse), con el fin de lograr el grado de conversión necesario.
3. Mantener condiciones operativas específicas como presión, temperatura y composición que permitan que la reacción química se lleve a cabo con la cinética y eficiencia requeridas, considerando tanto aspectos termodinámicos como de diseño del proceso.

Tipos de reactores químicos

En el ámbito del diseño y operación de procesos químicos, existen diversos tipos de reactores que se seleccionan en función de las características específicas de la reacción, los requerimientos operacionales y las condiciones industriales. A continuación, se describen los tipos más representativos y ampliamente utilizados en la industria química:

1. **Reactor discontinuo (batch):** Este tipo de reactor opera bajo condiciones en las que no se produce flujo de entrada ni salida de materiales durante el tiempo en que ocurre la reacción. Los reactivos se cargan al inicio del proceso, se ajustan las condiciones necesarias de temperatura y presión, y se permite que la reacción transcurra durante



un periodo determinado. Finalizado este tiempo, se procede a la descarga de los productos de reacción y los reactivos no convertidos.

2. **Reactor continuo:** En este sistema, la alimentación de reactivos y la extracción de productos se realiza de forma constante durante todo el desarrollo de la reacción. Esta modalidad permite mantener condiciones estables y es ideal para procesos de gran escala con producción sostenida.
3. **Reactor semicontinuo:** También conocido como reactor fed-batch, combina características de operación de los sistemas discontinuos y continuos. El reactor se carga inicialmente con una cantidad específica de reactivos, y durante la reacción se añaden materiales adicionales de manera progresiva, al tiempo que se retiran ciertos productos, lo que permite mayor flexibilidad en el control del proceso.
4. **Reactor tubular:** Este tipo de reactor opera de forma continua y se caracteriza por el flujo unidireccional de los reactivos a lo largo de un tubo o conducto, sin agitación interna. En estos sistemas, no se promueve la mezcla entre las corrientes de entrada, lo que resulta en un perfil de concentración y temperatura que varía a lo largo de la longitud del reactor.
5. **Reactor de tanque agitado continuo (CSTR):** Consiste en un tanque provisto de un sistema de agitación constante, donde tanto la alimentación de reactivos como la salida de productos se realizan de forma continua. La agitación asegura una mezcla homogénea del contenido, manteniendo uniformes las condiciones de operación dentro del reactor.
6. **Reactor de lecho fluidizado:** Este tipo de reactor se emplea principalmente en procesos heterogéneos gas-sólido. El gas se introduce desde la base del reactor y atraviesa un lecho de partículas sólidas (generalmente catalizadores) a una velocidad suficiente para suspenderlas parcialmente, generando una mezcla dinámica y uniforme. Esta configuración mejora la transferencia de calor y masa, y evita puntos calientes dentro del sistema.
7. **Reactor de lecho fijo:** En este sistema, uno o varios tubos están llenos de partículas catalíticas, generalmente operando en posición vertical. Los catalizadores pueden



presentarse en diversas formas (esferas, cilindros, mallas metálicas), y el fluido de reacción pasa a través del lecho de manera controlada. Estos reactores se utilizan en procesos como la oxidación de amoníaco o la conversión de acetaldehído a ácido acético, y son especialmente adecuados para reacciones catalíticas en fase gaseosa.

2.3.4. Pruebas de Jarras

Para comprender adecuadamente el fundamento y la aplicación de la prueba de jarras, es indispensable contextualizar su función dentro del tratamiento de aguas residuales y, más específicamente, en las etapas de clarificación. La obtención de agua con características fisicoquímicas determinadas requiere la implementación de múltiples procesos como la desinfección, estabilización química, control de parámetros organolépticos y, especialmente, la clarificación, que constituye una fase crucial para la remoción de impurezas.

La clarificación se enfoca en eliminar contaminantes de origen físico, químico o biológico. Entre ellos destacan los sólidos en suspensión, sólidos disueltos y partículas coloidales, cuyas dimensiones pueden variar significativamente. Las partículas más pequeñas, como las responsables del color, y otras de mayor tamaño que generan turbiedad, difícilmente sedimentan por acción mecánica en tiempos razonables, pudiendo requerir más de dos años para su decantación natural. Por esta razón, se recurre a procesos fisicoquímicos que aumentan el tamaño y densidad de las partículas, favoreciendo su precipitación acelerada.

Entre estos procesos destacan la **coagulación** y la **floculación**, los cuales permiten modificar la estabilidad de las partículas coloidales y propiciar su aglomeración. La coagulación implica la adición de sustancias químicas que neutralizan las cargas eléctricas de los coloides, mientras que la floculación facilita la unión de las partículas desestabilizadas, incrementando su tamaño y peso molecular hasta formar flóculos que sedimentan con facilidad.

La selección adecuada del tipo y la dosis de coagulantes y floculantes está determinada por las propiedades del agua a tratar y los requisitos de calidad del efluente. En este contexto, la **prueba de jarras** se presenta como una herramienta de laboratorio fundamental que simula en pequeña escala los procesos de coagulación y floculación, permitiendo establecer las condiciones óptimas de tratamiento.

Durante la realización de estas pruebas, se ensayan distintas combinaciones de productos químicos y dosificaciones, con el fin de identificar la opción más eficiente para la clarificación del agua. Una vez obtenidos los resultados, se procede a la evaluación de parámetros como turbiedad y sólidos suspendidos totales mediante equipos especializados. Posteriormente, los datos obtenidos se escalan al sistema de tratamiento en planta, realizando los ajustes pertinentes en campo si fuera necesario.

La prueba de jarras se consolida como una metodología ampliamente aceptada en el ámbito del tratamiento de aguas, por su eficacia en la determinación de la dosis óptima de reactivos químicos y en la evaluación de variables de operación. En este tipo de ensayos se replican, a nivel de laboratorio, las condiciones de coagulación, floculación y sedimentación. Los equipos disponibles para estas pruebas permiten controlar simultáneamente diversos parámetros, como la velocidad de agitación (expresada en rpm), lo cual resulta crítico para estudiar el comportamiento de los reactivos bajo diferentes condiciones.

Factores tanto químicos como hidráulicos inciden en el desempeño de estas pruebas. Entre los principales se encuentran: el pH, la temperatura, la concentración del coagulante, la secuencia de aplicación de los reactivos, el grado de agitación y el tiempo de sedimentación. En particular, el pH desempeña un papel determinante en la eficiencia del proceso, ya que influye directamente en la estabilidad de las partículas coloidales. Una disminución del pH, provocada por un aumento en la concentración de iones H_3O^+ , tiende a reducir la estabilidad de la suspensión, favoreciendo la coagulación.

Cada coagulante presenta un rango óptimo de pH que permite maximizar su efectividad. Por ejemplo, el sulfato de aluminio es más eficiente en condiciones ácidas ($pH < 7.4$), mientras que el cloruro férrico actúa adecuadamente en un intervalo de pH entre 7 y 8. No obstante, en presencia de altas concentraciones de materia orgánica, puede generarse la formación de complejos coloreados no deseados, como las sales orgánicas de hierro. Por su parte, el coagulante cúprico presenta mejor desempeño en medios alcalinos, donde además exhibe propiedades desodorizantes y capacidad de inhibir el crecimiento de algas.

La temperatura del agua también representa una variable de importancia, ya que influye tanto en la velocidad de reacción como en la formación y estabilidad de los flóculos. A medida que



disminuye la temperatura, se requiere un incremento en la dosificación de los reactivos químicos para alcanzar el mismo nivel de eficiencia en el proceso de clarificación.

En conjunto, la prueba de jarras constituye una estrategia técnica indispensable en el diseño y optimización de tratamientos fisicoquímicos de agua, permitiendo establecer con precisión las condiciones óptimas para el desarrollo de los procesos de coagulación y floculación en condiciones reales.

CAPÍTULO 3.-ESTADO DEL ARTE

La revisión bibliográfica del estado del arte se presenta en la tabla 1

Tabla 1. Propiedades del proceso de Coagulación - Floculación para el tratamiento de aguas residuales de la industria minera.

Tipo de coagulante	Dosis (mg/L)	Tipo de floculante	Dosis (mg/L)	pH	Turbiedad (NTU - % Remoción)	Sólidos (% Remoción)	Potencial Z (mV)	Referencia
FeCl ₃	21.09	-	-	6.32	1.57 96%	-	- 5.3	Galloux, J., y col. (2015).
-	-	Poliacrilamida Floculante polímero aniónico	2500	4.2 - 6.8	<20%	95%	-	Park, J., Han, Y., & Ji, S. W. (2016).
FL-2949 Coagulante catiónico de tipo poliamina	10	A333E Floculante aniónico de tipo acrílico	12	7.32	0 100%	100%	-4 a -10	Jang, M., H. J., & Shim, Y. (2010)

(-) Indica que no se especifica en el estudio.

Fuente: elaboración propia

En el estudio que realizó Galloux (2015) se evaluó la eficacia del tetracloruro de polilitanio (PTC) en comparación con tetracloruro de titanio (TiCl₄) y cloruro férrico (FeCl₃) para el tratamiento de aguas residuales de la minería de carbón (CMWW) en Australia.

Principales hallazgos:

- PTC y TiCl₄ mostraron mejor rendimiento que FeCl₃ en la eliminación de turbidez, UV₂₄ y metales inorgánicos (aluminio, cobre, zinc).
- El PTC formó los flóculos más grandes (~900 µm) y con la mayor tasa de crecimiento.
- El TiCl₄ produjo flóculos con el mayor factor de recuperación.



- El PTC tuvo bajo rendimiento en la eliminación de carbono orgánico disuelto (<10%).

En la investigación de Park J y Ji, S (2016), se evaluó la floculación con un polímero aniónico para el reciclaje de aguas residuales del procesamiento de minerales, centrándose en la reducción de partículas en suspensión. Se realizaron pruebas con un cilindro discontinuo para determinar la cantidad óptima de floculante, analizando la tasa de sedimentación, la turbidez y el tamaño de los flóculos.

Principales hallazgos

- El aumento del floculante incrementó la tasa de sedimentación debido a la formación de flóculos más grandes.
- La turbidez no mejoró con más floculante, ya que el exceso de polímero recubrió las partículas e impidió su unión eficiente.
- El uso excesivo de floculante puede afectar la calidad del agua y aumentar costos, por lo que es clave identificar la concentración óptima según las propiedades del agua tratada.

En la investigación que realizaron Jang, M., H. J., & Shim, Y. (2010), se evaluó la coagulación y floculación con polímeros de cadena larga y alto peso molecular para tratar agua de mina con alta concentración de partículas finas. Se analizaron seis combinaciones de floculantes aniónicos acrílicos y coagulantes catiónicos de poliamina en pruebas cinéticas de eliminación de turbidez.

Principales hallazgos

- El 93 % de las partículas en el agua de mina eran menores a 3,02 μm , lo que dificultaba su eliminación.
- La combinación óptima de coagulante y floculante fue 10 mg/L de FL-2949 (coagulante) y 12 mg/L de A333E (floculante), logrando una tasa de eliminación de turbidez 14,4 veces mayor que con A333E solo y 866,7 veces mayor que con la sedimentación natural.
- Con esta optimización, la turbidez se redujo a 0 NTU en solo 20 minutos.



- Los análisis de potencial zeta mostraron una fuerte relación lineal entre la eliminación de partículas y las diferencias de potencial zeta, lo que ayudó a comprender el mecanismo del proceso.

CAPITULO 4. METODOLOGIA.

La metodología seguida en este trabajo se ilustra en la *Ilustración 1*



*Ilustración 1.-*Diagrama de la metodología experimental

Fuente: elaboración propia

Etapas 1.-Recopilación bibliográfica:

Esta etapa consistió en la recopilación de información bibliográfica tomada de otras tesis, artículos y páginas de internet para poder entender los principios básicos de los procesos de



tratamiento de aguas residuales de la industria minera, así como también los estudios más relevantes de esta materia.

Etapas 2.-Caracterización del agua residual:

Durante esta etapa se llevaron a cabo la realización de los análisis fisicoquímicos del agua residual de la industria minera de acuerdo con lo que la NMX-AA-034-SCFI-2015 nos dice y se determinaron los parámetros que se enlistan a continuación; todo esto con la finalidad de tener un punto de referencia de las condiciones con las que el agua residual contaba antes de hacer cualquier tratamiento.

- pH
- Conductividad
- Sólidos disueltos, sólidos totales y sedimentables
- Potencial Z
- Color real
- Color aparente

El procedimiento que se realizó para la determinación de cada parámetro se describe el apartado de técnicas analíticas.

Etapas 3.- Selección y preparación de coagulantes y floculantes:

3.1 Coagulantes

Durante esta etapa, se determinaron los tipos de coagulantes y floculantes que se emplearon para llevar a cabo las pruebas de jarras, así como también se llevó a cabo la realización de las diluciones patrón. Para la investigación, se seleccionaron los siguientes floculantes y polímeros: sulfato de aluminio, cloruro férrico y policloruro de aluminio. Estos compuestos son reconocidos por su eficacia como agentes de coagulación en el tratamiento de aguas, dado su alto poder de remoción de partículas, turbidez, metales pesados y otros contaminantes suspendidos. Además, son muy versátiles y pueden utilizarse en una amplia gama de condiciones y tipos de agua, lo que los hace adecuados para diversas aplicaciones de tratamiento.



3.2 Floculantes

En cuanto a los polímeros, se seleccionaron dos aniónicos y uno catiónico para evaluar el impacto de las cargas positivas y negativas en conjunto con los coagulantes mencionados anteriormente. Los polímeros aniónicos elegidos fueron el AN95 y AN934, siendo uno de alta y otro de baja carga. El objetivo era analizar cómo la densidad de carga negativa afecta la remoción y la formación de flóculos durante el proceso de floculación-coagulación, comparando la efectividad entre ambos. Además, se utilizó el polímero catiónico AFL4540 para investigar el efecto de las cargas positivas en el tratamiento.

Esta investigación permitió entender de mejor manera cómo los coagulantes y polímeros interactuaban en el tratamiento de aguas, contribuyendo al desarrollo de estrategias más eficaces y adaptadas a diversas condiciones de tratamiento.

En este trabajo, tanto los coagulantes como los polímeros utilizados estaban disponibles en forma de gel, lo que requirió la preparación de disoluciones patrón debido a la viscosidad del gel. Se utilizó un factor de disolución de 1:10 para poder manipularlos adecuadamente en las pruebas de jarras. Los polímeros se prepararon a una concentración de 0.1% molar, mientras que se varió la concentración de los coagulantes para adecuarlos a las condiciones específicas del estudio.

Etapa 4.-Prueba de jarras

Para el diseño de experimentos se propuso un diseño 2^4 con tres puntos centrales; este diseño se utilizó para estudiar el efecto de cuatro variables independientes, las cuales fueron el tipo de coagulante, la dosis de coagulante, el tipo de polímero y la dosis de polímero. Cada factor tiene dos niveles (alto y bajo). Para calcular el número de experimentos, se hizo uso de la siguiente fórmula:

$$\text{Numero de experimentos} = 2^k$$

En este caso específico de un diseño 2^4 :

$$\text{Numero de experimentos} = 2^4 = 16 \text{ experimentos}$$

Para entender cómo se obtiene este número:

- Cada factor tiene dos niveles posibles (alto y bajo).
- Hay cuatro factores en total.
- Por lo tanto, se calcula 2^4 , que equivale a 16, porque cada factor puede estar en uno de sus dos niveles en cada combinación experimental.

Esto significa que hubo 16 combinaciones experimentales diferentes a esto; sumándoles los 3 puntos centrales que se tomaron como punto de control nos dio como resultado 19 experimentos desarrollados para esta investigación, donde cada combinación representa un conjunto único de niveles para los cuatro factores estudiados.

Sabiendo esto, para llevar a cabo las pruebas de jarras, se seleccionó un número específico de experimentos al azar, agrupados de cinco en cinco, cada uno con su respectivo blanco, según se muestra en la *figura 2*. Después de evaluar cada experimento según los parámetros mencionados previamente, las condiciones obtenidas fueron evaluadas posteriormente mediante réplicas tres veces para promediar los valores de cada muestra. Esto se hizo con el fin de aumentar la confiabilidad de los resultados.



Ilustración 2.- Distribución de experimentos en la prueba de jarras

Fuente: Tomado del manual de prácticas de prueba de jarras

Las condiciones bajo las cuales se llevaron a cabo todos los experimentos en el equipo fueron las mismas que se detallan en la siguiente tabla, incluyendo el número de revoluciones y el tiempo de cada etapa de los procesos de las jarras, desde la mezcla rápida hasta la sedimentación de nuestras muestras, lo cual resultó en buenos resultados, considerando como variables de respuesta el color verdadero y la turbidez. A cada jarra se adicionó 2 L de agua residual problema, la combinación de coagulantes y floculantes del diseño experimental y las jarras operaron como reactores discontinuos (tipo Batch).

Tabla 2.-Condiciones de las pruebas de jarras

<i>Gradiente (G^{-1})</i>	<i>RPM</i>	<i>Tiempo</i>	<i>Etapas</i>
300	180	1 segundo	Mezcla rápida
60	60	7 minutos	
40	45	7 minutos	Floculación
20	35	7 minutos	
0	---	30 minutos	Sedimentación

Fuente: elaboración propia

Para calcular las RPM del equipo, se utilizaron las velocidades máximas del equipo ajustadas según el gradiente para volúmenes de 2L de nuestras jarras y se determinaron las RPM exactas para cada etapa del proceso.

Etapas 5.-Análisis de resultados y discusión de los datos obtenidos:

En esta etapa, se procedió al análisis y discusión de los resultados provenientes de los experimentos ejecutados de acuerdo con el diseño experimental previamente establecido. Se identificaron los candidatos más prometedores y se determinó la necesidad de repetir dichos experimentos para evaluar su reproducibilidad, con miras a estudios adicionales. Asimismo, se llevaron a cabo análisis estadísticos y pruebas de varianza (ANOVA) para examinar los datos recopilados y extraer conclusiones significativas sobre los efectos de los factores estudiados. Estos análisis se realizaron utilizando el software Minitab, que facilitó la ejecución de las pruebas estadísticas correspondientes.

Técnicas analíticas:

Para el tratamiento de aguas residuales en la industria minera se utilizaron diversas técnicas analíticas para monitorear la calidad del agua. Entre las técnicas empleadas se incluyen las siguientes:



- PH

Para determinar el pH, se calibró el pHmetro utilizando soluciones buffer de pH 4.01, 7.00 y 10.01. Las muestras de agua residual de mina se prepararon en un vaso de precipitado limpio y se agitaron para asegurar una mezcla homogénea. El electrodo del pHmetro se sumergió en la muestra y se esperó de 2 a 4 segundos hasta que la lectura se estabilizó. Los datos obtenidos se registraron para cada medición realizada.

- Conductividad

Para la determinación de la conductividad, se prepararon los materiales y se calibró el conductímetro para minimizar errores y asegurar la precisión. Se tomaron muestras representativas de agua residual de la mina en vasos de precipitados limpios y secos para evitar contaminación.

Se encendió el conductímetro y se sumergió la sonda en cada muestra, esperando a que la lectura se estabilizara antes de registrar el valor en microsiemens por centímetro ($\mu\text{S}/\text{cm}$). El procedimiento se repitió con múltiples muestras para obtener un promedio representativo. Finalmente, se analizaron los valores de conductividad obtenidos y se compararon con los límites establecidos.

- Sólidos disueltos

Para la determinación de la cantidad de sólidos disueltos, se tomaron muestras representativas de agua residual de la mina de dos puntos de muestreo, empleando vasos de precipitados limpios y secos para evitar contaminación. Se filtró una porción de cada muestra a través de un filtro de fibra de vidrio de la marca Whatman de $0.45 \mu\text{m}$ para separar los sólidos disueltos. Posteriormente, el filtro con los sólidos se secó en una mufla a temperatura constante hasta alcanzar un peso estable. Finalmente, el filtro seco se pesó con una balanza analítica precisa para determinar la cantidad total de sólidos disueltos.



- **Sólidos totales**

Para medir la cantidad de sólidos totales disueltos, se tomaron muestras representativas de agua residual de la mina utilizando vasos de precipitados limpios y secos para prevenir contaminación. Se filtró una porción de la muestra a través de un filtro de fibra de vidrio para separar los sólidos totales (disueltos y en suspensión). El filtro con los sólidos se secó en una mufla a temperatura constante hasta obtener un peso estable. Finalmente, el filtro seco se pesó con una balanza analítica precisa, y la cantidad de sólidos totales se calculó restando el peso del filtro del peso total.

- **Sólidos sedimentables**

Para determinar los sólidos sedimentables en el agua residual minera, se recolectó una muestra representativa en un recipiente limpio. La muestra se agitó suavemente para asegurar su uniformidad. A continuación, se llenaron los conos de Imhoff hasta la marca de 1 litro con la muestra y se dejaron reposar durante 30 minutos. Tras el periodo de sedimentación, se midió la altura de los sólidos sedimentados en los conos y se calculó el volumen de los sólidos sedimentables en mililitros por litro (ml/L). Finalmente, se realizaron los cálculos necesarios para determinar la concentración de sólidos sedimentables en la muestra.

- **Potencial Z**

Para determinar el potencial z del agua residual minera, se calibró el electrodo de pH utilizando soluciones buffer con valores de pH conocidos. Posteriormente, se preparó una muestra representativa del agua residual en un recipiente limpio. Se introdujeron los electrodos en la muestra y se midió el potencial z, agitando suavemente para asegurar una medición homogénea. Se realizaron varias mediciones en diferentes puntos de la muestra para obtener un promedio preciso. Finalmente, se registraron los valores y se calculó el promedio del potencial z del agua residual.



- Color aparente

Para establecer el color visible del agua residual minera, se tomaron muestras representativas en vasos de precipitados limpios y secos para evitar contaminación. La muestra se examinó visualmente en un recipiente transparente con fondo blanco y se comparó con una escala estándar para determinar el tono exacto. Se siguieron las normativas y procedimientos establecidos, y se aseguró la calibración adecuada del equipo.

- Color real

Para determinar el color del agua residual minera, se recogieron muestras representativas en vasos de precipitados limpios y secos. Las muestras se filtraron para eliminar sólidos en suspensión que pudieran afectar la medición. El color se midió utilizando un espectrofotómetro, que se calibró previamente. Los resultados se compararon con estándares de color para identificar el tono exacto de la muestra.

Todo esto encaminado para la obtención de las características fisicoquímicas con las que se encontraba el agua de mina y tener un punto de partida para comparar el nivel de remoción de sólidos y turbidez de las muestras postratamiento.

4.1 Análisis Estadísticos

El análisis estadístico de los datos se realizó empleando el software Minitab 19 Statistical Software. Se aplicaron pruebas t de cola derecha para evaluar las diferencias significativas entre las condiciones evaluadas. Las diferencias con p-value inferiores a 0.05, se consideraron significativas.

CAPITULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Etapas 1.-Recopilación bibliográfica:

Se realizó la búsqueda bibliográfica para identificar las propiedades de los coagulantes y floculantes a utilizar en el tratamiento fisicoquímico del agua residual de la industria minera.

Etapas 2.-Caracterización del agua residual:

Durante esta etapa, se documentó visualmente el estado inicial del agua residual, tal como se muestra en la *ilustración 3*, en la cual fue posible observar las características físicas del agua cruda antes de ser sometida a cualquier proceso de tratamiento. A continuación, se presentan los resultados obtenidos en la caracterización de la muestra compuesta de agua de mina, los cuales se resumen en la siguiente tabla. En ella se detallan las condiciones y los parámetros fisicoquímicos presentes en el agua en su estado original, permitiendo establecer una línea base para evaluar la eficacia de los tratamientos aplicados posteriormente.

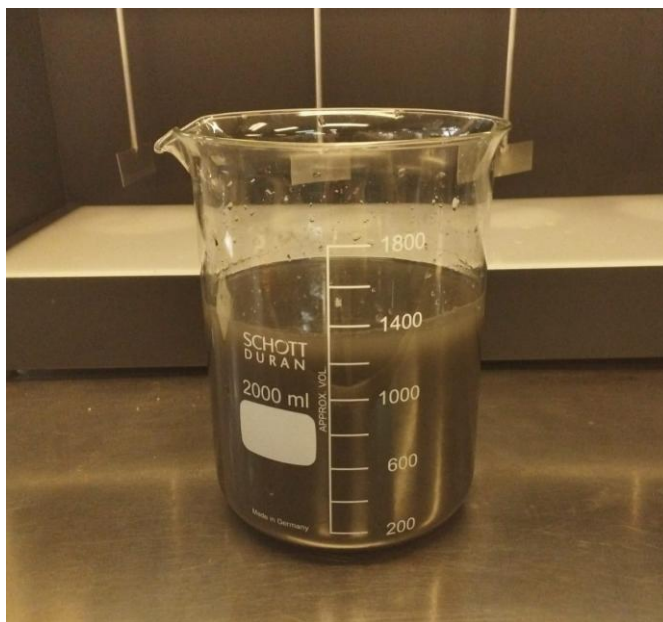


Ilustración 3 Agua residual cruda (sin tratamiento)

Fuente: elaboración propia

Tabla 3 .-Caracterización fisicoquímica de la muestra de agua residual de la industria minera

Parámetro	Medición
pH	8.073 $\pm$ 0.027
Turbidez (NTU)	1961 $\pm$ 20
Conductividad Eléctrica - CE (μ Omh/cm)	1578 $\pm$ 5
Sólidos disueltos totales - SDT (mg/L)	771.0 $\pm$ 0.3
Sólidos totales - ST (mg/L)	3867.61 $\pm$ 96.01
Sólidos sedimentables - SS (mg/L)	3 $\pm$ 0
Potencial Z - Zp (mV)	-35.22 $\pm$ 1.96
Color aparente (U.Pt-Co)	12000 $\pm$ 0
Color real (U.Pt-Co)	3000 $\pm$ 0

Fuente: elaboración propia

Observando la tabla anterior, se pueden identificar las condiciones de la muestra de agua estudiada. El pH de la muestra de agua residual fue de 8.073 ± 0.027 lo que indica que es ligeramente alcalino, sugiriendo que el agua resulta de la lixiviación de minerales calcáreos.

En cuanto a la turbidez, se evidencia una concentración de sólidos suspendidos alta, dado que 1961 ± 20 NTU es significativamente alto en comparación con los estándares comunes para aguas residuales según la NOM-127-SSA1-1994 y la NMX-AA-038-SCFI-2001, teniendo como referencia en ambas NOMS un límite máximo permisible de turbidez de 0 a 0.15 NTU y un intervalo de trabajo de 0,01 a 40 UNT respectivamente, lo que nos indica que este nivel de turbidez sugiere una alta carga de partículas y una posible necesidad de revisar y mejorar el tratamiento del agua residual. Esta condición se refleja también en los altos niveles de color incluso después de la filtración.

Etapas 3.- Selección y preparación de coagulantes y floculantes:

Los factores de dilución y unidades de concentración para los coagulantes y floculantes se describen en subcapítulo 3 de la metodología

Etapa 4.-Prueba de jarras:

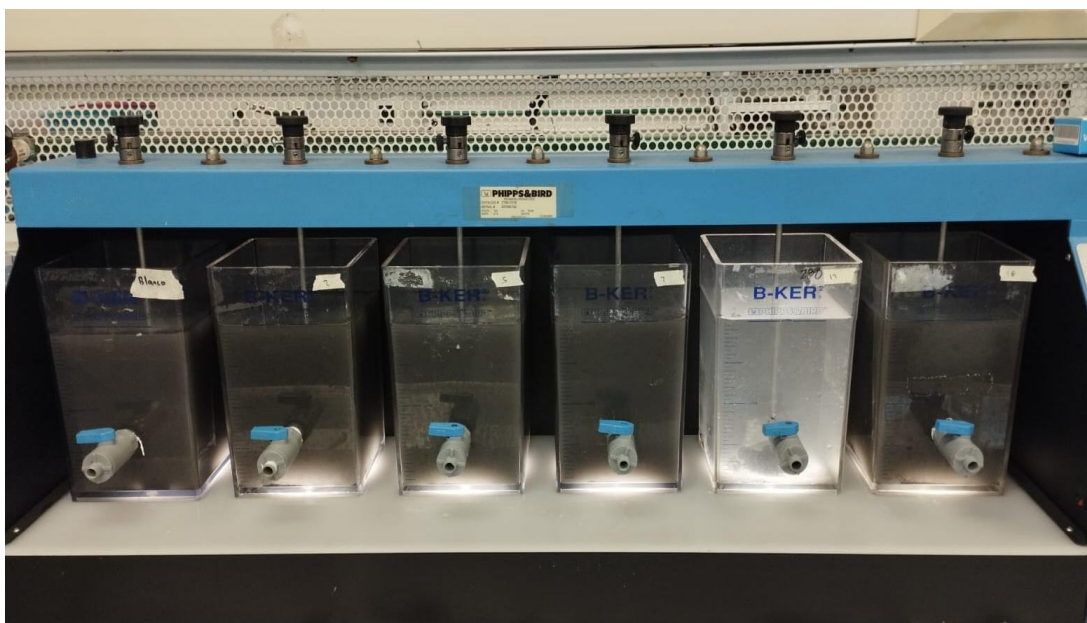


Ilustración 4 distribución de los experimentos en la prueba de jarras

Fuente: elaboración propia

El diseño de experimentos de las pruebas de jarras se presenta en la *tabla 4*. En esta se describen las condiciones de las variables utilizadas en el tratamiento del agua de mina, detallando sus niveles tanto altos como bajos para su posterior combinación de manera aleatoria.

Tabla 4.- Niveles de las variables estudio

Variable de estudio	Niveles		
	-1	0	+1
A= Tipo de coagulante	Sulfato de aluminio	Cloruro férrico	Policloruro de aluminio
B= Dosis de coagulante (mg/L)	10	35	60
C= Tipo de polímero	AN905	AN934	AFL4540
D= Dosis de polímero (mg/L)	0.10	1.05	2

Fuente: elaboración propia

Una vez se tubo definidos los niveles, se realizaron combinaciones de variables utilizando tanto las concentraciones máximas como mínimas de coagulantes y polímeros en los 19 experimentos realizados. Estos se presentan en la siguiente tabla, donde se codificaron los niveles que van de -1 a 1, según el diseño experimental implementado.

Tabla 5.- Distribución de las variables de los experimentos

Prueba	Condiciones de las variables de estudio			
	A	B	C	D
1	-1	-1	-1	-1
2	+1	-1	-1	-1
3	-1	+1	-1	-1
4	+1	+1	-1	-1
5	-1	-1	+1	-1
6	+1	-1	+1	-1
7	-1	+1	+1	-1
8	+1	+1	+1	-1
9	-1	-1	-1	+1
10	+1	-1	-1	+1
11	-1	+1	-1	+1
12	+1	+1	-1	+1
13	-1	-1	+1	+1
14	+1	-1	+1	+1
15	-1	+1	+1	+1
16	+1	+1	+1	+1
17	0	0	0	0
18	0	0	0	0
19	0	0	0	0

Fuente: elaboración propia

Es importante destacar que los experimentos del 17 al 19 se han designado como nuestros puntos centrales, establecidos con valores de 0 para servir como puntos de referencia en cada serie de pruebas de jarras realizadas. Estos experimentos representan uno de los cinco ensayos posibles realizados en el equipo.

Una vez que se distribuyeron las condiciones para cada experimento, se procedió con la ejecución de estos. A continuación, se presentan los resultados obtenidos y la tabla de números reales de las combinaciones que se llevaron a cabo para el desarrollo de cada experimento, que incluye los valores reales de las variables trabajadas junto con sus respectivas concentraciones.

Tabla 6.- Condiciones de las variables de estudio reales

Condiciones de las variables de estudio reales				
Numero de experimento	A	B	C	D
1	Sulfato de aluminio	10mg/L	AN905	0.10mg/L
2	Policloruro de aluminio	10mg/L	AN905	0.10mg/L
3	Sulfato de aluminio	60mg/L	AN905	0.10mg/L
4	Policloruro de aluminio	60mg/L	AN905	0.10mg/L
5	Sulfato de aluminio	10mg/L	AFL4540	0.10mg/L
6	Policloruro de aluminio	10mg/L	AFL4540	0.10mg/L
7	Sulfato de aluminio	60mg/L	AFL4540	0.10mg/L
8	Policloruro de aluminio	60mg/L	AFL4540	0.10mg/L
9	Sulfato de aluminio	10mg/L	AN905	2mg/L
10	Policloruro de aluminio	10mg/L	AN905	2mg/L
11	Sulfato de aluminio	60mg/L	AN905	2mg/L
12	Policloruro de aluminio	60mg/L	AN905	2mg/L
13	Sulfato de aluminio	10mg/L	AFL4540	2mg/L
14	Policloruro de aluminio	10mg/L	AFL4540	2mg/L
15	Sulfato de aluminio	60mg/L	AFL4540	2mg/L
16	Policloruro de aluminio	60mg/L	AFL4540	2mg/L
17	Cloruro férrico	35mg/L	AN934	1.05mg/L
18	Cloruro férrico	35mg/L	AN934	1.05mg/L
19	Cloruro férrico	35mg/L	AN934	1.05mg/L

Fuente: elaboración propia

Tabla 7.- Resultados de la prueba de jarras

N.EXP	PH	Conductividad (μ s/cm)	SDT (ppm)	Turbidez (NTU)	Color aparente	Color real
1	7.761	1578.6667	771.833	17.693 $\pm$ 0.563	90	30
2	7.685	1570.6667	771.8	3.377 $\pm$ 0.026	50	30
3	7.275	1627	799.3	9.59 $\pm$ 0.096	60	20
4	7.830	1565.3333	769.533	14.5 $\pm$ 0.074	120	50
5	7.252	1642.3333	807.367	5.96 $\pm$ 0.094	50	30
6	8.038	1575.6667	772.533	6.23 $\pm$ 0.045	60	30
7	7.637	1618.6667	793.5	5.257 $\pm$ 0.004	40	30
8	7.576	1607	782.467	3.557 $\pm$ 0.024	30	10
9	7.790	1579.3333	773.3	6.233 $\pm$ 0.262	60	40
10	7.556	1607.3333	788.033	5.82 $\pm$ 0.129	50	40
11	6.96	1600.3333	784.667	5.543 $\pm$ 0.054	30	10
12	8.03	1566.3333	767.9	9.38 $\pm$ 0.092	80	30
13	7.524	1587.3333	783.1	2.133 $\pm$ 0.047	20	10
14	7.812	1566	769	1.643 $\pm$ 0.012	20	20
15	7.251	1627.3333	794.7	1.86 $\pm$ 0.037	30	20
16	7.628	1608.6667	790.3	1.593 $\pm$ 0.041	20	20
17	7.513	1583.6667	774.067	11.343 $\pm$ 0.012	100	20
18	7.253	1655.6667	809.933	7.437 $\pm$ 0.061	100	30
19	7.221	1635.6667	802.367	12.303 $\pm$ 0.089	160	20

Fuente: elaboración propia

Al comparar y analizar las tablas superiores, podemos observar cómo la combinación de diferentes coagulantes y polímeros afecta nuestros resultados en las variables de respuesta: turbidez y color. Se puede inferir que la eficacia en la remoción de sólidos y la reducción de la turbidez y el color del agua pueden variar significativamente según la dosis aplicada, ya sea mínima o máxima. Esta variación se debe a la interacción compleja entre estos componentes durante el proceso de remoción de sólidos. La selección adecuada de coagulantes y polímeros puede resultar en una mejor combinación y mayor eficacia, mientras que otras combinaciones pueden no ser tan efectivas como se esperaba.

Después de identificar los resultados más destacados en turbidez y color real entre los 19 experimentos, que fueron los números 8, 13, 14, 15 y 16 marcados en rojo, observamos que estos mostraron niveles significativamente más bajos en comparación con los demás. Esto se traduce en una menor concentración de sólidos y una turbidez reducida en el agua tratada, en comparación con el agua sin tratar. Entre las variables clave en estos experimentos destacan el polímero AFL4045, el cual demostró ser efectivo en ambas dosis, junto con los coagulantes, independientemente de la cantidad añadida. Este resultado facilitó una sedimentación efectiva y una notable mejora, logrando un agua clara y prácticamente libre de sólidos suspendidos al final del proceso.

Sabiendo esto se optó por hacer una repetición de los cinco mejores resultados con la finalidad de ver su nivel de confianza y replicación dando como resulta la siguiente tabla:

Tabla 8.- Resultados de las repeticiones de los mejores candidatos

N.Exp	PH	Conductividad	SDT	Turbidez	Color aparente	Color real
8	7.725	1604	783.066	3.51±0.012	30	10
13	7.854	1591	776.133	2.22±0.062	20	10
14	8.276	1571	773.466	1.66±0.012	20	10
15	7.732	1618	791.433	1.35±0.040	20	0
16	7.985	1639	804.133	1.64±0.081	10	10

Fuente: elaboración propia

Etapa 5.-Análisis comparativo y descripción de resultados:

El análisis de los parámetros físicoquímicos obtenidos durante las pruebas de Jarras en el tratamiento del agua permitió evaluar la eficiencia de los coagulantes y floculantes utilizados en el proceso. A partir de los datos experimentales y las representaciones gráficas elaboradas, fue posible determinar tendencias claras en la remoción de contaminantes como sólidos disueltos totales (SDT), turbidez, color aparente y color real, así como en variables críticas como el pH y la conductividad eléctrica (CE).

Se observó una disminución significativa del pH ($p\text{-value} < 0.05$) en la mayoría de las pruebas de tratamiento (excepto Exp 14) en comparación con el valor original de la muestra (8.07) como podemos apreciar en la *ilustración 5*. Esta reducción puede atribuirse al efecto de la adición de coagulantes férricos y policlorados, los cuales, al hidrolizarse en medio acuoso, generan especies ácidas como HCl o H^+ , que disminuyen el pH del sistema (Jiang, 2001).

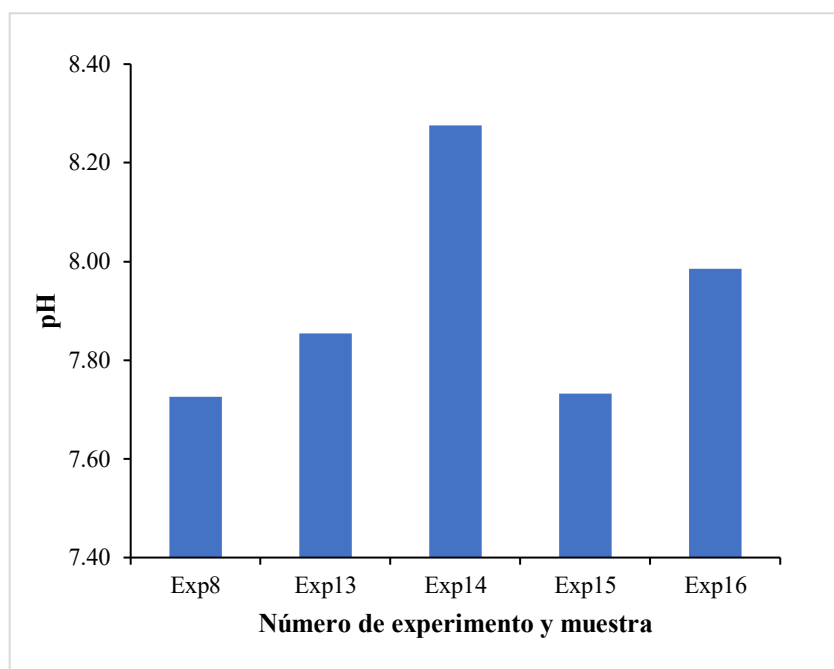


Ilustración 5 resultados de la medición del pH

Fuente: elaboración propia

En cuanto a la conductividad eléctrica (CE), solo se presentó una disminución estadísticamente significativa en el experimento 14 ($p\text{-value} < 0.05$), indicando que la adición de coagulantes y floculantes no alteró significativamente la concentración total de iones móviles en solución. Este comportamiento sugiere una interacción limitada con especies altamente conductoras o una neutralización eficaz durante el tratamiento.

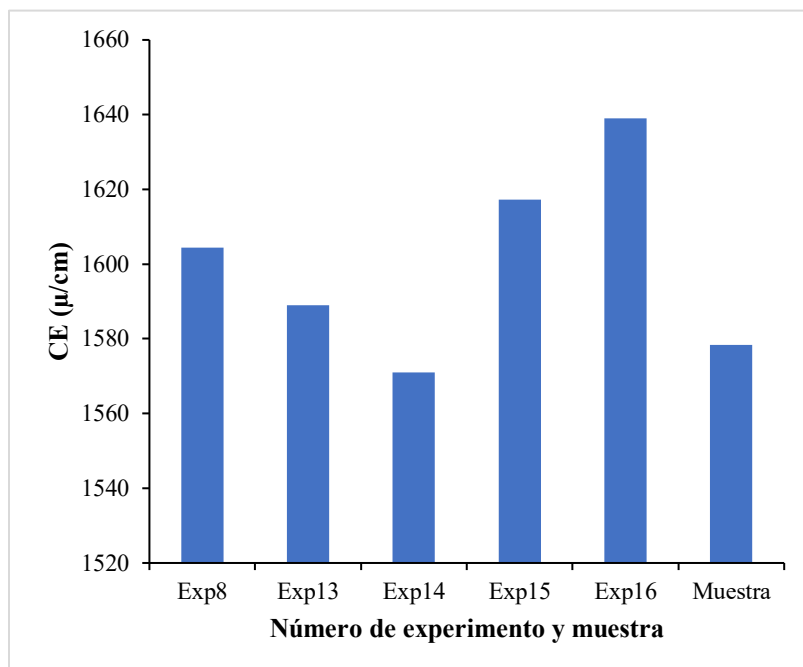


Ilustración 6 resultados de la conductividad en los experimentos

Fuente: elaboración propia

Se identificó un ligero aumento en la concentración de SDT ($p\text{-value} < 1$) en todas las pruebas de tratamiento, causado por la adición de sales provenientes de los coagulantes y polímeros en forma de gel. Estos compuestos, al disolverse, incrementan la carga iónica del medio, afectando directamente los sólidos disueltos (Shon et al., 2006). Por otro la turbidez mostró una reducción drástica ($p\text{-value} < 0.05$) en todas las pruebas de tratamiento, destacando la eficiencia del proceso de coagulación-floculación. La muestra sin tratar presentó valores superiores a 30 NTU, mientras que en los tratamientos finales se redujo a menos de 2 NTU, lo que representa una remoción superior al 90%.

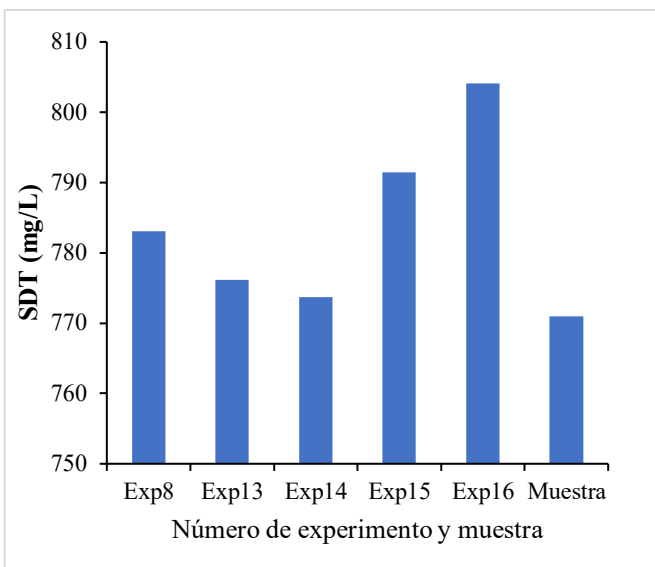
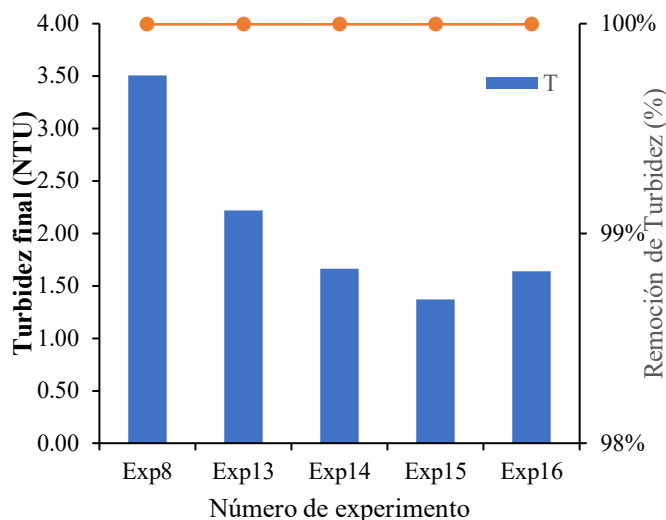


Ilustración 7 tabla de turbidez (parte izquierda) en relación con la tabla de SDT (derecha) en el análisis de datos

Fuente: elaboración propia

En cuanto a la remoción de color, tanto el color aparente como el real mostraron mejoras significativas. El color aparente, que en la muestra sin tratar era de 12000 Pt-Co, se redujo hasta 20 Pt-Co en los mejores tratamientos. El color real, por su parte, se estabilizó en 10 Pt-Co en todas las pruebas.

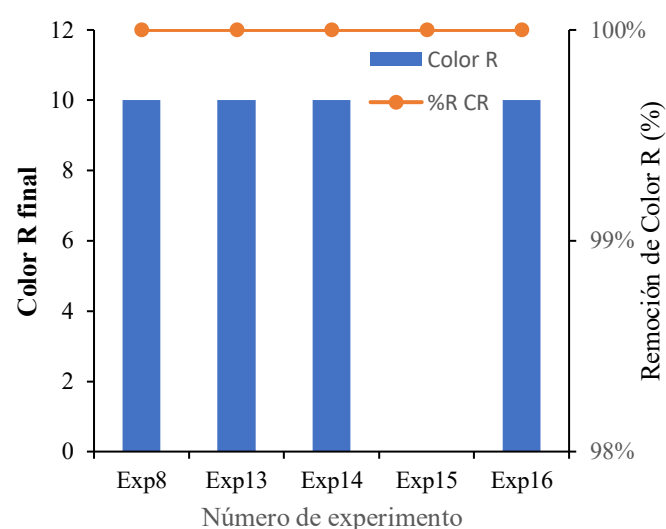
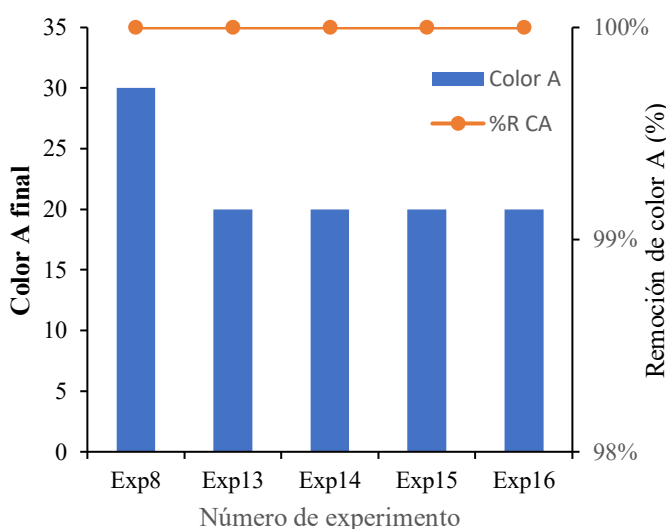


Ilustración 8 comparativa de los resultados del color aparente (izquierda) y color real (derecha)

Fuente: elaboración propia

Cabe destacar que los floculantes aniónicos no ofrecieron los mejores resultados. Su desempeño fue menor comparado con los catiónicos, particularmente el AFL4540, que generó mejores flóculos y mayor eficiencia de remoción. Esto se debe a la mejor compatibilidad de cargas con los coagulantes aplicados.

Comparación de los Mejores Candidatos según Parámetros Críticos

A partir de los resultados obtenidos en las pruebas de coagulación-floculación, se identificaron dos experimentos que destacaron por su desempeño en los parámetros más relevantes para evaluar la calidad del agua tratada: los sólidos disueltos totales (SDT) y la turbidez. Estos dos indicadores son esenciales en los procesos de tratamiento de aguas, ya que permiten estimar tanto la cantidad de materia disuelta como la presencia de partículas suspendidas que afectan la calidad del agua final.

Los experimentos seleccionados fueron el **Experimento 14 (Exp14)** y el **Experimento 15 (Exp15)**. El primero presentó el valor más bajo de SDT (774 mg/L), mientras que el segundo mostró la turbidez más baja (1.37 NTU) y la eliminación completa del color real (0 Pt-Co), con una remoción del 100 %. La siguiente tabla resume los resultados clave de ambos tratamientos, comparándolos con los valores iniciales de la muestra sin tratar:

Tabla 9 comparación de los resultados de los experimentos 14 y 15

Parámetro	Muestra	Exp14	Exp15
pH	8.07	8.26	7.73
CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1578	1571	1617
SDT (mg/L)	771	774	791
Turbidez (NTU)	196.4	1.66	1.37
Color A (Pt-Co)	12000	20	20
Color R (Pt-Co)	3000	10	0

Fuente: elaboración propia

El experimento 14 (Exp14) mostró una notable eficiencia en la reducción de sólidos disueltos, con un valor final de 774 mg/L, el más bajo entre todos los candidatos. Esto sugiere una mayor capacidad del sistema para remover sales y compuestos iónicos disueltos, lo cual es beneficioso en contextos donde se requiere una baja concentración salina en el agua tratada, como en procesos industriales sensibles o en ciertos tratamientos de potabilización.

No obstante, **el experimento 15 (Exp15)** se posicionó como el tratamiento más efectivo en términos integrales. Además de registrar la menor turbidez (1.37 NTU), logró una remoción completa del color real (100 %), lo que implica una eficiencia sobresaliente en la eliminación de contaminantes orgánicos solubles y partículas coloidales. Este desempeño puede atribuirse a una mejor interacción entre los coagulantes y floculantes catiónicos, los cuales, al poseer cargas positivas, neutralizan eficazmente las partículas coloidales cargadas negativamente presentes en el agua residual.

En cuanto a la conductividad eléctrica (CE), ambos tratamientos conservaron valores muy similares a los de la muestra original, indicando que la adición de coagulantes y floculantes no alteró significativamente la salinidad del medio. Este comportamiento es deseable, ya que permite mantener el equilibrio iónico del agua tratada.

El pH final se mantuvo dentro de rangos aceptables para ambos tratamientos, aunque se observó una leve disminución en el experimento 15 ($\text{pH} = 7.73$), posiblemente atribuida a la naturaleza ácida de algunos coagulantes utilizados, como el sulfato de aluminio o el cloruro férrico, que tienden a reducir el pH al hidrolizarse en el agua (Metcalf & Eddy, 2014).

En síntesis, si bien el experimento 14 es superior en la remoción de SDT, el experimento 15 presenta una eficiencia global más equilibrada y efectiva, siendo el más adecuado cuando se busca claridad visual del agua, baja turbidez y remoción completa del color. La elección entre uno u otro dependerá de los objetivos específicos del tratamiento, pero para fines de depuración de aguas con alta carga de color y turbidez, **el experimento 15 representa la mejor alternativa.**

En la *tabla 10* se presentan las pruebas t-Student de cola derecha con $p\text{-value} < 0,05$, donde un valor $p < 0.05$ se rechaza la hipótesis nula y se acepta la alternativa, al comparar el agua residual sin tratar contra el agua posterior al tratamiento con coagulantes y floculantes:

Tabla 10 resultados de las pruebas t-Student de cola derecha con p-value

	Muestra	T8	T13	T14	T15	T16
Turbiedad	196 ± 2	3.50 ± 0.01	2.21 ± 0.07	1.66 ± 0.01	1.37 ± 0.02	1.63 ± 0.1
		CDS	CDS	CDS	CDS	CDS
		($p < 0.05$)	($p < 0.05$)	($p < 0.05$)	($p < 0.05$)	($p < 0.05$)
pH	8.073 ± 0.027	7.725 ± 0.0485	7.855 ± 0.007	8.276 ± 0.048	7.732 ± 0.001	7.985 ± 0.007
		CDS	CDS	NDS	CDS	CDS
		($p < 0.05$)	($p < 0.05$)	($p > 0.05$)	($p < 0.05$)	($p < 0.05$)
Conductividad	1535.33 ± 5.507	1604.333 ± 0.577	1589.00 ± 2.65	1570.00 ± 1	1617.333 ± 0.577	1639 ± 1
		NDS	NDS	CDS	NDS	NDS
		($p > 0.05$)	($p > 0.05$)	($p < 0.05$)	($p > 0.05$)	($p > 0.05$)
SDT	770.967 ± 0.321	783.07 ± 5.69	776.133 ± 0.115	773.67 ± 6.78	791.433 ± 0.153	804.13 ± 1.63
		NDS	NDS	NDS	NDS	NDS
		($p > 0.05$)	($p > 0.05$)	($p > 0.05$)	($p > 0.05$)	($p > 0.05$)

Fuente: elaboración propia



CONCLUSIONES

En el sistema de tratamiento de coagulación – floculación de aguas residuales de la industria minera, los floculantes catiónicos (AFL450) son más idóneos para la formación de flóculos, debido a que este tipo de fluentes presentan mayor concentración de cargas aniónicas lo cual se respalda al medir el potencial – z.

En cuanto al color y la turbidez, el uso de policloruro de aluminio con carga alta remueve mayor cantidad de las partículas suspendidas, sin embargo, se logra una mayor eficiencia de remoción con sulfato de aluminio en dosis alta., además, con dosis bajas de floculante no mejora la remoción de color y turbidez contra una dosis alta. Por lo cual la dosificación idónea para la remoción de turbidez y color es crucial el en tratamiento de aguas residuales de efluentes reales.

La combinación de AFL450 y sulfato de aluminio en dosis alta promueve a la remoción de turbidez y color, además el sulfato de aluminio al ser un producto comercialmente accesible es recomendable en el tratamiento de estos efluentes.



FUENTES DE INFORMACIÓN

- Awasthi, A., et al. (2017). "Coagulation and flocculation for the removal of heavy metals." *Journal of Environmental Management*, 202, 168-177.
- Baker, R.W., & Pritchard, D.W. (2006). *Membrane Technology and Applications*. Wiley.
- Behling, E., Marín, J., Castro, E., Rincón, N., & Colina, G. (2014). Tratabilidad de un efluente industrial sintético (sacarosa/leche) en un sistema RBC anaeróbico de etapa simple. *Boletín del Centro de Investigaciones Biológicas*, 47(1).
Recuperadode:
https://www.researchgate.net/profile/Julio_Cesar_Marin2/publication/274719250_Tratability_of_synthetic_industrial_effluent_sucrose_milk_in_a_single_stage_anaerobic_RBC_system/links/552815160cf2779ab78c4424.pdf
- Bhatnagar, A., Kumar, E., & Sillanpää, M. (2013). Applications of flotation in water and wastewater treatment: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 20(9), 6833-6845.
- Bhatnagar, A., Kumar, E., & Sillanpää, M. (2013). Applications of flotation in water and wastewater treatment: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 20(9), 6833-6845.
- Brix, H., et al. (2018). "Stabilization pond performance: A review." *Water Research*, 135, 23-34.
- Bustamante, L. et al. (2018). "Impacto de la contaminación por aguas residuales mineras en la calidad del agua superficial." *Revista de Ecología y Conservación*, 15(2), 78-92.
- Casilla Q., S. (2014). Evaluación de la calidad de agua en los diferentes puntos de descarga de la cuenca del río Suchez [Tesis de grado, Universidad Nacional del Altiplano Puno].
http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/4546/Casilla_Quispe_Sergio.pdf?sequence=1



- Chávez, A. (2019). "Efectos de las aguas residuales mineras en los ecosistemas terrestres circundantes." *Revista de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible*, 8(1), 23-37.
- Chávez, A. et al. (2018). "Impacto ambiental de las aguas residuales mineras: estudio de caso en una región minera." *Revista de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible*, 7(2), 45-58.
- Chen, L., et al. (2022). "Application of ultrafiltration membranes for mining wastewater treatment." *Separation and Purification Technology*, 276, 119186.
- Cordero, J., et al. (2020). "Effectiveness of sand filtration in mining effluent treatment." *Journal of Hazardous Materials*, 389, 121885.
- Courtens, E., Boon, N., De Clippeleir, H., Berckmoes, K., Mosquera, M., Seuntjens, D., & Vlaeminck, S. (2014). Control of nitrification in an oxygen-limited autotrophic nitrification/denitrification rotating biological contactor through disc immersion level variation. *Bioresource technology*, 155, 182-188. Doi: 10.1016/j.biortech.2013.12.108.
- El Gohari, H., & Javid, A. (2013). *Advanced membrane technology for water treatment*. Elsevier.
- García, A., et al. (2019). Título del artículo. *Revista de Gestión Ambiental y Sostenibilidad*, 5(2), 78-92.
- García, J., et al. (2020). "La presencia de compuestos orgánicos en las aguas residuales mineras: efectos nocivos en los organismos acuáticos y en la calidad del agua".
- Ghosh, P., et al. (2019). "Sedimentation of suspended solids in mining wastewater." *Environmental Engineering Science*, 36(9), 1103-1110.
- Gómez, R. et al. (2017). "Factores que influyen en la generación de aguas residuales en la industria minera." *Revista Internacional de Minería y Medio Ambiente*, 4(1), 23-37.
- González, A., et al. (2007). Advanced Oxidation Processes for the Treatment of Wastewaters. *Journal of Environmental Science and Technology*, 42(11), 3457-3464.



- González, M. (2018). "Impacto ambiental de la minería: análisis de los procesos de generación de aguas residuales."
- González, M. (2019). "Contaminación del agua por metales pesados en áreas mineras." *Revista Internacional de Química Ambiental*, 6(3), 101-115.
- Gonzalez-Martinez, A., M Poyatos, J., Hontoria, E., Gonzalez-Lopez, J., & Osorio, F. (2011). Treatment of effluents polluted by nitrogen with new biological technologies based on autotrophic nitrification-denitrification processes. *Recent patents on biotechnology*, 5(2), 74-84. Doi: 10.2174/187220811796365671.
- Grady, C.P.L., Daigger, G.T., & Lim, H.C. (2011). *Biological Wastewater Treatment*. CRC Press.
- Harris, M., et al. (2018). "Environmental impacts of mining effluents." *Environmental Science & Technology*, 52(12), 7219-7230.
- Kumar, A., & Sinha, R. (2021). "Neutralization of acidic mining wastewater: A sustainable approach." *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 20, 100397.
- Laohaprapanon, S., et al. (2015). *Precipitation of Heavy Metals from Industrial Wastewaters*. *Environmental Engineering Science*, 32(8), 622-628.
- Li, C., et al. (2019). "Impacto de las aguas residuales mineras en la calidad del agua y los ecosistemas acuáticos". *Journal of Environmental Science*, 25(3), 321-335.
- Liu, J., et al. (2019). "Reverse osmosis for mining wastewater treatment." *Desalination*, 451, 78-86.
- López, A., et al. (2021). "Tecnologías de tratamiento para aguas residuales de la industria minera: estado del arte y perspectivas futuras". *Water Research*, 38(4), 567-580.
- López, J. (2019). "Procesos de generación de aguas residuales en la minería a cielo abierto." *Revista de Ingeniería Minera*, 6(3), 101-115.
- López, J. (2021). "Impacto de la contaminación minera en los ecosistemas acuáticos." *Revista de Investigación Ambiental*, 12(4), 122-136.
- López-Maldonado, Y. L., et al. (2016). [Título del artículo]. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 15(3), 747-759.



- Marin, C. (2011). Determinación de la dosis optima de lodos aluminosos para ser utilizada en el proceso de coagulación en aguas residuales provenientes del sector sur de la comuna del café - Parque industrial. Universidad Tecnologica de Pereira, Facultad de Tecnologías, Pereira. <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/2556/62839M337.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Martínez, E. (2020). "Influencia de la geología en la calidad del agua en zonas mineras." Revista de Geología Aplicada, 8(4), 67-82.
- Martínez-Soto, M., et al. (2018). [Título del artículo]. Revista Internacional de Contaminación Ambiental, 34(2), 123-135.
- Metcalf, L., & Eddy, H. (2014). Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery. McGraw-Hill.
- Metcalf, L., & Eddy, H. (2014). Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery. McGraw-Hill.
- Moreno, L. (2020). "Bioacumulación de contaminantes en la cadena alimentaria acuática en áreas mineras." Revista de Ecotoxicología, 7(2), 56-70.
- Orozco, G., et al. (2019). [Título del artículo]. Revista de Gestión Ambiental y Sostenibilidad, 4(1), 45-58.
- Pérez, J., et al. (2020). Título del artículo. Journal of Environmental Engineering, 28(3), 215-230
- Ramírez-Álvarez, C., et al. (2020). [Título del artículo]. Journal of Environmental Engineering, 26(4), 321-335
- Ríos, M. (2018). "Caracterización y tratamiento de aguas residuales de la industria minera". Revista de Ingeniería Ambiental, 12(2), 45-56.
- Rodríguez, D. (2019). "Impacto de las aguas residuales mineras en los ecosistemas acuáticos." Revista de Ecología y Conservación, 12(1), 56-70.
- Sánchez, A. (2021). "Contaminantes químicos en las aguas residuales mineras y su impacto ambiental." Revista de Química Ambiental, 9(2), 89-103.
- Sánchez, A. (2022). "Impacto de la contaminación minera en la salud humana: estudio de caso en comunidades cercanas a operaciones mineras." Revista de Salud Ambiental, 9(1), 34-47.



- Shon, H. K., Vigneswaran, S., & Snyder, S. A. (2006). Effluent organic matter (EfOM) in wastewater: constituents, effects, and treatment. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 36(4), 327–374. <https://doi.org/10.1080/10643380600580011>
- Tchobanoglous, G., Burton, F.L., & Stensel, H.D. (2003). *Wastewater Engineering: Treatment and Disposal*. McGraw-Hill.
- Tchobanoglous, G., Burton, F.L., & Stensel, H.D. (2003). *Wastewater Engineering: Treatment and Disposal*. McGraw-Hill.
- Tchobanoglous, G., Burton, F.L., & Stensel, H.D. (2003). *Wastewater Engineering: Treatment and Disposal*. McGraw-Hill.
- Tejada, R. (2017). Tratamiento y sedimentación de la turbidez con cal en las aguas residuales de los relaves mineros de la unidad operativa Minera Santiago - B. Tesis Para Optar El Título Profesional de Ingeniero de Minas, Universidad Nacional del Altiplano, Facultad de Ingeniería de Minas, Escuela Profesional de Ingeniería de Minas, Puno. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/4695>
- Wang, J., et al. (2011). Application of Chlorine and Ozone for Water Disinfection. *Environmental Engineering and Management Journal*, 10(3), 449-457.
- Zhang, J., Song, W., & Zhang, W. (2015). Adsorption of contaminants in water using activated carbon. *Journal of Environmental Sciences*, 27, 21-30.
- Zhang, Y., et al. (2020). "Performance of activated sludge in treating mining wastewater." *Water Science and Technology*, 81(3), 635-644.
- Galloux, J., Chekli, L., Phuntsho, S., Tijing, L. D., Jeong, S., Zhao, Y. X., ... & Shon, H. K. (2015). Coagulation performance and floc characteristics of polytitanium tetrachloride and titanium tetrachloride compared with ferric chloride for coal mining wastewater treatment. *Separation and Purification Technology*, 152, 94-100.
- Jang, M., Lee, H. J., & Shim, Y. (2010). Rapid removal of fine particles from mine water using sequential processes of coagulation and flocculation. *Environmental technology*, 31(4), 423-432.



- Jiang, J.-Q. (2001). Development of coagulation process for water treatment. In: Advances in Environmental Research, 5(2), 89–97. [https://doi.org/10.1016/S1093-0191\(00\)00055-6](https://doi.org/10.1016/S1093-0191(00)00055-6)
- Park, J. H., Oh, C., Han, Y. S., & Ji, S. W. (2016). Optimizing the addition of flocculants for recycling mineral-processing wastewater. Geosystem Engineering, 19(2), 83-88.