

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL
DE HUAMANGA**

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y METALURGIA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA



TESIS:

**Diseño y puesta en marcha de un sistema de mezcla
rápida para el tratamiento de aguas residuales de
interior mina en la minera Catalina Huanca**

Para optar el título profesional de:

INGENIERO QUÍMICO

PRESENTADO POR:

Bach. Jorge Luis FLORES ALVITES

ASESOR:

Mg. Aníbal Pablo GARCÍA BENDEZÚ

AYACUCHO - PERÚ

2026

RESUMEN

La presente investigación evaluó la influencia de un sistema de mezcla rápida en la eficiencia de remoción de turbidez y la estabilidad del tratamiento de aguas residuales de interior mina en la Minera Catalina Huanca. Se empleó un enfoque cuantitativo, de tipo aplicado y diseño cuasiexperimental de pretest-posttest. Inicialmente, el agua presentó una turbidez promedio de 390,5 NTU. El sistema se diseñó con criterios hidráulicos e ingenieriles, considerando un número de Froude de 4,5, un gradiente de velocidad de $1\,461\text{ s}^{-1}$ y un tiempo de mezcla de 0,606 s. Posteriormente, Se implementó en la línea de tratamiento existente un sistema de mezcla rápida basado en el aprovechamiento del resalto hidráulico, con la finalidad de favorecer la dispersión homogénea del coagulante y mejorar la eficiencia del proceso de coagulación. La evaluación evidenció una eficiencia promedio de remoción de turbidez del 99,76 % y una reducción de la variabilidad del proceso, con una desviación estándar de la turbidez de salida de 0,52 NTU. Asimismo, el pH se mantuvo estable durante el periodo evaluado. Se concluyó que la implementación del sistema de mezcla rápida mejoró significativamente la eficiencia de remoción de turbidez y la estabilidad del proceso de tratamiento, en concordancia con la hipótesis general planteada.

Palabras clave: mezcla rápida, gradiente, aguas de interior mina, coagulación, puesta en marcha, turbidez.

ABSTRACT

This research evaluated the influence of a rapid mixing system on the turbidity removal efficiency and stability of underground wastewater treatment at the Catalina Huanca Mine. A quantitative, applied, quasi-experimental pretest-posttest design was used. Initially, the water had an average turbidity of 390,5 NTU. The system was designed using hydraulic and engineering criteria, considering a Froude number of 4,5, a velocity gradient of $1\,461\text{ s}^{-1}$, and a mixing time of 0.606 s. Subsequently, a rapid mixing system based on the hydraulic jump was implemented in the existing treatment line to promote homogeneous coagulant dispersion and improve the efficiency of the coagulation process. The evaluation showed an average turbidity removal efficiency of 99.76% and a reduction in process variability, with an outlet turbidity standard deviation of 0.52 NTU. Furthermore, the pH remained stable throughout the evaluation period. It was concluded that the implementation of the rapid mixing system significantly improved turbidity removal efficiency and the stability of the treatment process, consistent with the overall hypothesis.

Keywords: rapid mixing, gradient, underground mine waters, coagulation, start-up, turbidity.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN	1
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	2
1.2.1 Problema general	2
1.2.2 Problemas específicos	2
1.3 OBJETIVOS	2
1.3.1 Objetivo general	2
1.3.2 Objetivos específicos	3
1.4 JUSTIFICACIÓN	3
1.4.1 Justificación teórica	3
1.4.2 Justificación práctica	3
1.4.3 Justificación metodológica	4
1.5 DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	4
1.6 HIPÓTESIS	5
1.6.1 Hipótesis general	5
1.6.2 Hipótesis específicas	5
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO	6
2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	6
2.1.1 Antecedentes internacionales	6
2.1.2 Antecedentes nacionales	7
2.1.3 Antecedentes locales	9
2.2 EL AGUA	10
2.2.1 Aguas residuales mineras	10
2.2.2 Características del agua	10
2.2.3 Necesidad del tratamiento del agua	11
2.2.4 Procesos fisicoquímicos en el tratamiento de aguas	11
2.2.5 Planta de tratamiento de agua de Minera Catalina Huanca	12
2.3 TURBIDEZ	15
2.3.1 Factores que inciden en la remoción de turbidez	15

2.3.2 Dimensiones de la remoción de turbidez.....	15
2.4 SISTEMA DE MEZCLA RÁPIDA.....	16
2.4.1 Dimensiones del sistema de mezcla rápida.....	16
2.4.2 Parámetros hidráulicos del sistema.....	17
2.5 ESTABILIDAD DEL PROCESO.....	18
2.5.1 Factores que afectan la estabilidad del proceso.....	18
2.5.2 Constancia de parámetros operacionales.....	18
2.6 MARCO NORMATIVO.....	19
2.6.1 Límites máximos permisibles.....	19
CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS.....	20
3.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA.....	20
3.2 POBLACIÓN Y MUESTRA.....	21
3.2.1 Población.....	21
3.2.2 Muestra.....	21
3.3 DISEÑO METODOLÓGICO.....	21
3.3.1 Tipo de investigación.....	21
3.3.2 Nivel de investigación.....	21
3.4 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....	22
3.5 VARIABLES E INDICADORES.....	22
3.5.1 Variable independiente.....	22
3.5.2 Variable dependiente.....	22
3.5.3 Operacionalización de las variables.....	23
3.6 PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO.....	24
3.6.1 Caracterización del agua residual.....	24
3.6.2 Diseño del sistema de mezcla rápida.....	28
3.7 IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE MEZCLA RÁPIDA.....	34
3.7.1 Instalación del sistema de mezcla rápida.....	34
3.7.2 Condiciones previas del área de instalación.....	34
3.7.3 Materiales y equipos utilizados.....	35
3.7.4 Procedimiento de instalación del sistema de mezcla rápida.....	35

3.7.5 Integración con el sistema de tratamiento existente	40
3.7.6 Consideraciones de seguridad y control.....	40
3.7.7 Capacitación al personal operador para la operación del equipo.....	40
3.8 PUESTA EN MARCHA Y MONITOREO	41
3.8.1 Pruebas de operación inicial	41
3.8.2 Registro de datos de remoción de turbidez	41
3.8.3 Evaluación del desempeño del sistema.....	43
3.9 ANÁLISIS DE DATOS.....	43
CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN	44
4.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE LAS AGUAS RESIDUALES	44
4.2 RESULTADOS DEL DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA.....	52
4.3 EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE TURBIDEZ Y ESTABILIDAD	56
4.3.1 Resultados de la remoción de hierro y manganeso	63
4.3.2 Resultados de turbidez posttest	64
4.3.3 Estabilidad del proceso	65
4.3.4 Interpretación gráfica de turbidez de ingreso vs. salida	66
4.3.5 Interpretación gráfica de pH de ingreso vs. salida	67
4.4 DISCUSIÓN.....	69
CONCLUSIONES	70
RECOMENDACIONES.....	72
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	73
GLOSARIO.....	76
ANEXOS	77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de coagulación.....	12
Figura 2. Diagrama de flujo del proceso de tratamiento de aguas de Mina Catalina Huanca.....	14
Figura 3. Ubicación de la unidad Minera Catalina Huanca.....	20
Figura 4. Reactor de flujo pistón – Punto de dosificación de coagulante.....	24
Figura 5. Toma de muestra en la mezcla rápida.....	25
Figura 6. Toma de muestra en el reactor flujo pistón RFP.....	25
Figura 7. Toma de muestra en el sedimentador 02.....	26
Figura 8. Toma de muestra en el tanque de oxidación.....	26
Figura 9. Toma de muestra en el sistema lamelar.....	27
Figura 10. Toma de muestra en el tanque 15.....	27
Figura 11. pH-metro y turbidímetro.....	28
Figura 12. Prueba de jarras a 200, 250, 300 RPM.....	29
Figura 13. Resultados del ensayo en la prueba de jarras.....	29
Figura 14. Gráfica de revoluciones por minuto vs. turbidez.....	30
Figura 15. Proceso de sistema de mezcla rápida en un vertedero rectangular.....	31
Figura 16. Imagen del Reactor de flujo pistón (RFP) antes de la instalación de la mezcla rápida.....	34
Figura 17. Cortes de plancha de acero al carbono para la construcción de la mezcla rápida.....	36
Figura 18. Ensamblaje de piezas de la mezcla rápida.....	37
Figura 19. Revestimiento con pintura epóxica.....	37
Figura 20. Acondicionamiento del área de instalación.....	38
Figura 21. Montaje del sistema.....	39

Figura 22. Sellado y acoples finales de la mezcla rápida al sistema de tratamiento de agua de mina.....	39
Figura 23. Pruebas hidráulicas de resalto hidráulico en la mezcla rápida.....	41
Figura 24. Puesta en marcha de la mezcla rápida con dosificación de sulfato férrico .	42
Figura 25. Muestras del proceso de tratamiento de aguas residuales de mina	42
Figura 26. Variación de la concentración de hierro (Fe) en el agua residual de ingreso a la PTAR de Interior Mina durante el periodo de evaluación.....	52
Figura 27. Variación temporal de las concentraciones de hierro (Fe) y manganeso (Mn) en el agua tratada antes y después de la implementación del sistema de mezcla rápida	63
Figura 28. Comparativo de turbidez ingreso vs. salida (mayo-septiembre de 2025).....	66
Figura 29. Comparación de la turbidez antes y después de la implementación del sistema de mezcla rápida.....	67
Figura 30. Comparativa estabilidad del pH ingreso vs. salida (mayo-septiembre de 2025).....	68
Figura 31. Plano para la construcción de la mezcla rápida	77
Figura 32. Gráfica de dosificación de sulfato férrico en la mezcla rápida	78

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Operacionalización de las variables	23
Tabla 2. Tabla de resultados de la prueba de jarras	30
Tabla 3. Relación práctica entre G y RPM usando correlaciones experimentales empleadas en tratamiento de agua.....	31
Tabla 4. Materiales para la construcción de la mezcla rápida	33
Tabla 5. Resultados de la caracterización fisicoquímica del agua de ingreso a la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Interior Mina	45
Tabla 6. Análisis estadístico descriptivo del ingreso.....	51
Tabla 7. Criterios de diseño del sistema de mezcla rápida.....	53
Tabla 8. Resultados de monitoreo de la calidad del agua residual en la salida de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Interior Mina	57
Tabla 9. Análisis estadístico descriptivo de la salida	65

LISTA DE ABREVIATURAS

CE: conductividad eléctrica.

DBO: demanda bioquímica de oxígeno.

DQO: demanda química de oxígeno.

Fe: hierro (símbolo químico)

G: gradiente de velocidad (variable física)

LMP: límites máximos permisibles.

Mn: manganeso (símbolo químico)

NTU: unidades nefelométricas de turbidez (del inglés, Nephelometric Turbidity Units).

OMS: Organización Mundial de la Salud.

pH: potencial de hidrógeno.

PTAM: planta de tratamiento de agua de mina.

PTAR: planta de tratamiento de aguas residuales.

RFP: reactor de flujo pistón.

RPM: revoluciones por minuto.

UEA: unidad económica administrativa.

PMBOK: Project Management Body of Knowledge, que en español se traduce como Guía de los Fundamentos para la Dirección de Proyectos.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La gestión de las aguas residuales constituye un desafío de creciente relevancia mundial por sus efectos sobre la salud pública, la sostenibilidad ambiental y el desarrollo socioeconómico. Disponer de agua segura y tratar adecuadamente los efluentes son condiciones esenciales para proteger la calidad de vida de la población y conservar los ecosistemas. En este sentido, la disponibilidad de agua limpia es determinante para el desarrollo de las sociedades; por ello, su tratamiento trasciende el ámbito técnico y representa una necesidad estratégica a escala mundial (Arellano, 2018).

En el ámbito del tratamiento de aguas residuales, los procesos fisicoquímicos, en particular la coagulación-floculación, son fundamentales para remover la turbidez y los sólidos suspendidos. Su eficiencia depende, entre otros factores, de la adecuada dispersión de los reactivos, condición que puede alcanzarse mediante sistemas de mezcla rápida correctamente diseñados. Cuando esta etapa presenta deficiencias, disminuye el desempeño global del tratamiento y puede deteriorarse la calidad del efluente, con posibles efectos adversos sobre la salud humana y el ambiente (Cabrera, 2022).

A nivel nacional, donde la actividad minera tiene una presencia significativa, el tratamiento de las aguas residuales de mina adquiere especial complejidad debido a la variabilidad de sus características fisicoquímicas y a la presencia de sólidos y metales. La normativa ambiental establece requisitos para la descarga de efluentes tratados; no obstante, algunas plantas presentan limitaciones operativas que reducen la estabilidad del proceso y la eficiencia de remoción de contaminantes. Esta situación hace necesario optimizar etapas críticas, como la mezcla rápida, mediante criterios de diseño e implementación acordes con las condiciones reales de operación (Alfaro, 2024).

En este contexto, la Minera Catalina Huanca presenta inestabilidades en la etapa de coagulación del tratamiento de aguas residuales de interior mina, relacionadas principalmente con la ausencia de un sistema de mezcla rápida adecuadamente diseñado y controlado. Esta condición dificulta la dispersión uniforme de los reactivos, disminuye la eficiencia de remoción de turbidez y afecta la estabilidad del proceso. En

consecuencia, constituye una limitación operativa que puede repercutir en la calidad del efluente tratado y, por tanto, en las condiciones del cuerpo receptor y del entorno.

Ante esta situación, el diseño, la implementación y la puesta en marcha de un sistema de mezcla rápida, sustentado en criterios técnicos e hidráulicos, constituyen una alternativa para mejorar la etapa de coagulación. Por ello, esta investigación busca determinar la influencia de dicho sistema en la eficiencia y la estabilidad de la remoción de turbidez del agua residual de interior mina de la Unidad Minera Catalina Huanca.

1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1 Problema general

¿En qué medida el diseño y puesta en marcha de un sistema de mezcla rápida influye en la eficiencia y la estabilidad de la remoción de turbidez del agua residual de interior mina de la Unidad Minera Catalina Huanca?

1.2.2 Problemas específicos

- ¿Cuáles son las características fisicoquímicas del agua residual de interior mina, especialmente la turbidez de ingreso, que deben considerarse para el diseño del sistema de mezcla rápida?
- ¿Qué valores de caudal, número de Froude, tiempo de mezcla y gradiente de velocidad se requieren para el diseño hidráulico del sistema de mezcla rápida?
- ¿Cómo debe implementarse y ponerse en marcha el sistema de mezcla rápida en la línea de tratamiento existente, de acuerdo con los parámetros hidráulicos establecidos en el diseño?
- ¿Qué diferencias existen en la eficiencia y la estabilidad de la remoción de turbidez del efluente tratado antes y después de la implementación del sistema, considerando las condiciones de turbidez del agua de ingreso?

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general

Determinar la influencia del diseño y puesta en marcha de un sistema de mezcla rápida para el tratamiento de aguas residual de interior mina en la Unidad Minera Catalina Huanca, mediante la comparación del efluente tratado antes y después de la intervención, considerando las condiciones de turbidez del agua de ingreso.

1.3.2 Objetivos específicos

- Caracterizar fisicoquímicamente el agua residual de interior mina, con énfasis en la turbidez de ingreso, para establecer las condiciones de diseño del sistema de mezcla rápida.
- Determinar el caudal de diseño, el número de Froude, el tiempo de mezcla y el gradiente de velocidad requeridos para el diseño hidráulico del sistema de mezcla rápida.
- Implementar y poner en marcha el sistema de mezcla rápida en la línea de tratamiento existente, de acuerdo con los parámetros hidráulicos establecidos en el diseño.
- Comparar la eficiencia y la estabilidad de la remoción de turbidez del efluente tratado antes y después de la implementación del sistema, considerando las condiciones de turbidez del agua de ingreso.

1.4 JUSTIFICACIÓN

1.4.1 Justificación teórica

La investigación se sustenta en los fundamentos de la coagulación-floculación y de la mezcla rápida, particularmente en los parámetros hidráulicos que gobiernan la dispersión del coagulante, como el número de Froude, el gradiente de velocidad y el tiempo de mezcla. Estos fundamentos permiten explicar la relación entre la intensidad de mezcla y la eficiencia de remoción de turbidez, y constituyen la base conceptual para el diseño del sistema evaluado en la investigación.

1.4.2 Justificación práctica

El diseño y la implementación de un sistema de mezcla rápida en la planta de tratamiento de aguas residuales de interior mina de la Minera Catalina Huanca se justificó por la necesidad de mejorar la eficiencia de remoción de turbidez y la estabilidad del proceso fisicoquímico.

El diseño propuesto permitió optimizar la dispersión del coagulante mediante el control de parámetros hidráulicos fundamentales, como el gradiente de velocidad (G), el tiempo de mezcla (t) y las condiciones de flujo. Estas mejoras favorecieron la desestabilización de las partículas suspendidas y la formación de flóculos, incrementando la eficiencia de remoción de turbidez y contribuyendo a una mayor

estabilidad del proceso de tratamiento. En consecuencia, la implementación del sistema constituye una mejora técnica orientada al control de la calidad del efluente generado por la actividad minera, en concordancia con las exigencias ambientales aplicables a este tipo de descarga (Ministerio del Ambiente [MINAM], 2010).

La implementación del sistema de mezcla rápida se justificó económicamente por su impacto en la optimización de los costos operativos de la planta de tratamiento. La mejora en la eficiencia del proceso permitió reducir el consumo de reactivos químicos, principalmente coagulantes y agentes alcalinizantes, al lograrse una mejor dispersión y aprovechamiento de los mismos.

Asimismo, la mayor estabilidad del proceso contribuyó a disminuir la frecuencia de ajustes operacionales, reduciendo la generación de lodos y los costos asociados a su manejo y disposición. De igual forma, se redujeron las paradas no programadas y las intervenciones correctivas, lo cual impactó positivamente en la continuidad operativa del sistema.

La implementación del sistema de mezcla rápida contribuyó a la mejora de la calidad del efluente tratado, reduciendo la turbidez y, por ende, el riesgo de afectación a los cuerpos de agua receptores. Esta mejora favoreció la protección de los recursos hídricos utilizados por las poblaciones cercanas para actividades domésticas y productivas.

Asimismo, el fortalecimiento del control del proceso de tratamiento permitió minimizar posibles impactos ambientales asociados a la actividad minera, contribuyendo a la conservación del entorno y a la salud de la población.

1.4.3 Justificación metodológica

La investigación se justifica metodológicamente por el empleo de un enfoque cuantitativo, de tipo aplicado y con diseño cuasiexperimental de pretest-posttest. La comparación de las condiciones anteriores y posteriores a la implementación, mediante mediciones fisicoquímicas y análisis estadístico de la turbidez y el pH, permite evaluar de manera objetiva el desempeño del sistema de mezcla rápida.

1.5 DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

La investigación se delimitó espacialmente a la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Interior Mina de la Unidad Minera Catalina Huanca, ubicada en el distrito de Canaria, provincia de Víctor Fajardo, departamento de Ayacucho. Temáticamente,

comprendió la caracterización fisicoquímica del agua residual, el diseño hidráulico, la implementación y la puesta en marcha del sistema de mezcla rápida, así como la evaluación de la eficiencia y la estabilidad de la remoción de turbidez. El análisis se realizó con los registros operacionales y de laboratorio correspondientes al período de evaluación utilizado en la investigación.

1.6 HIPÓTESIS

1.6.1 Hipótesis general

El diseño y puesta en marcha del sistema de mezcla rápida incrementa significativamente la eficiencia y mejora la estabilidad de la remoción de turbidez del efluente tratado en el período posterior a la intervención, en comparación con el período anterior, considerando las condiciones de turbidez del agua de ingreso.

1.6.2 Hipótesis específicas

Las características fisicoquímicas del agua residual de interior mina, especialmente la turbidez de ingreso y el caudal, permiten establecer las condiciones requeridas para el diseño del sistema de mezcla rápida.

La determinación del caudal, número de Froude, tiempo de mezcla y gradiente de velocidad permite diseñar un sistema de mezcla rápida que cumpla las condiciones hidráulicas requeridas para la dispersión del coagulante.

La implementación y puesta en marcha del sistema de mezcla rápida en la línea de tratamiento existente permite operar de acuerdo con los parámetros hidráulicos establecidos en el diseño.

En el período posterior a la implementación del sistema, la eficiencia de remoción de turbidez es significativamente mayor y el coeficiente de variación de la turbidez del efluente tratado es menor que en el período anterior, considerando las condiciones de turbidez del agua de ingreso.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

2.1.1 Antecedentes internacionales

Ozun (2024) evaluó el efecto de la carga superficial de las partículas en los procesos de coagulación y floculación. Se determinó que partículas con alta carga superficial tienden a repelerse, dificultando su sedimentación, mientras que partículas con baja carga favorecen la aglomeración y sedimentación rápida. La investigación comparó el uso individual y en mezclas binarias de coagulantes y floculantes en condiciones de pH ácido (2–6). Los resultados mostraron que el FeCl_3 a 80 mg/L en pH 4 alcanzó hasta 98 % de remoción de turbidez, mientras que un floculante no iónico logró ≥ 99 % a pH 2. Al emplearse mezclas binarias, se obtuvieron mejores resultados, destacando la combinación FeSO_4 /no iónico a pH 4 (≤ 98 %) y FeCl_3 /aniónico a pH 2 (≥ 99 %). Estos resultados evidencian que las combinaciones mejoran la eficiencia del proceso de clarificación del agua.

Osorio Churque y Solano Martínez (2023) realizaron un estudio en el municipio de Paz de Río, en el departamento de Boyacá, Colombia. El objetivo era crear un sistema de tratamiento de aguas residuales residenciales que cumpliera con los estándares técnicos y legales para mejorar la calidad del agua que vierte al río Chicamocha. La técnica incluyó análisis de alternativas, modelación hidráulica mediante el software Capdetworks y una matriz multicriterio para evaluar la viabilidad técnica, económica, social y ambiental del proyecto. La investigación analizó las aguas residuales de los ciudadanos del municipio. La muestra se describió mediante análisis fisicoquímicos y microbiológicos. Se emplearon herramientas como simuladores, matrices de rendimiento y registros de laboratorio. Uno de los hallazgos mostró que la alternativa elegida, lodos activados con aireación prolongada, logró eliminar el 99 % de la materia orgánica, el 90 % de las partículas en suspensión y el 97 % de los nutrientes. En conclusión, el diseño sugerido representó un gran avance en la gestión sostenible de los recursos hídricos. Ayudaría a la comunidad, protegería el medio ambiente y fomentaría una cultura de cuidado y respeto por el agua, fundamental para la vida cotidiana y el progreso social.

Herrera y Torres (2022) desarrollaron una investigación en Portovelo, provincia de El Oro, Ecuador. El objetivo era modelar un proceso de tratamiento de aguas residuales mineras y determinar la eficacia de la eliminación del cianuro mediante procesos de mezcla rápida y oxidación. La investigación adoptó un enfoque técnico y experimental. Se utilizó el software DWSIM para crear una simulación por computadora utilizando como muestra efluentes mineros típicos de la región. Se emplearon bases de datos científicas, hojas de cálculo y el propio simulador DWSIM. Los hallazgos revelaron que, utilizando un separador de sólidos, un mezclador y dos reactores (CSTR y de conversión), fue posible eliminar hasta el 99,97 % del cianuro, con un margen de error inferior al 0,2 % en comparación con datos experimentales reales. En conclusión, el método de mezcla rápida y oxidación no solo aumentó la eficacia del tratamiento, sino que también contribuyó a reducir los riesgos ambientales asociados al efluente minero y a mejorar las condiciones de protección del recurso hídrico.

Gonzalez Villamil (2021) tuvo como objetivo optimizar los procesos de mezcla rápida y floculación mediante el análisis hidráulico y el rediseño de sus unidades. La investigación evidenció que la planta se abastece principalmente del río Calandaima y, de manera complementaria, del río Magdalena, debido a que el caudal disponible no cubre la demanda poblacional. Asimismo, se realizó la proyección de población a 25 años, estimándose 19 033 habitantes para el año 2045, con una demanda de 43,68 L/s. En la evaluación hidráulica se identificó que los procesos de mezcla rápida y floculación no cumplían con la normativa vigente (Resolución 0330 de 2017), debido a deficiencias como un número de Froude inferior al rango permisible en el vertedero y el funcionamiento parcial del floculador, que operaba solo con una de sus tres cámaras, limitando los gradientes de velocidad requeridos. En cuanto a la calidad del agua, aunque el sistema de clarificación (mezcla rápida, floculación y sedimentación) logró cumplir en la mayoría de parámetros con la Resolución 2115 de 2007, el análisis histórico de datos (2012–2019) mostró incumplimientos en algunos años.

2.1.2 Antecedentes nacionales

Alfaro (2024) desarrollaron el trabajo en Juliaca, ciudad de la región de Puno, Perú, el objetivo fue diseñar, desarrollar e implementar una instalación moderna que purificara las aguas residuales mediante modelos hidráulicos. La técnica empleada fue aplicada y predictiva, y siguió las mejores prácticas del PMBOK para la gestión de proyectos, planificación y control. El estudio analizó las aguas residuales de la ciudad

de Juliaca y describió las muestras física y químicamente. Se emplearon herramientas como simuladores de procesos, análisis de laboratorio y matrices de gestión. Los resultados mostraron que la instalación logró eliminar el 99 % de la materia orgánica y el 90 % de las partículas en suspensión gracias a sus sistemas de mezcla rápida y un tratamiento mejorado. En conclusión, este enfoque permitió mejorar el desempeño ambiental del sistema mediante la reducción de contaminantes presentes en el efluente.

Meléndez (2023) desarrolló su investigación en la mina La Arena, ubicada en La Libertad, Perú. El objetivo principal fue elaborar un plan para mejorar la eficiencia del tratamiento de aguas residuales ácidas, reduciendo su costo operativo y cumpliendo con las normas ambientales. El enfoque utilizado fue descriptivo y aplicado, lo que permitió analizar la situación actual y proponer un sistema eficaz mediante el proceso de lodos de alta densidad (HDS). La muestra se compuso de aguas residuales ácidas del depósito de relaves II, que también incluía líquidos con diversas cantidades de metales pesados. Se emplearon análisis físico-químicos, pruebas de laboratorio y modelos de diseño como herramientas. Uno de los resultados más destacados fue que el sistema HDS, que emplea cal en lugar del método habitual de neutralización con sosa cáustica, redujo los costos de tratamiento en un 93 %, de US\$13,8/m³ a US\$1,64/m³. De igual manera, la efectividad en la remoción de metales fue del 98 %. En resumen, la propuesta aplicada no solo mejoró los recursos y cuidó el medio ambiente, sino que también benefició a las personas de la región que dependen del agua. Estos resultados evidencian el potencial de las alternativas tecnológicas para optimizar el tratamiento y reducir sus impactos ambientales.

Villalta (2021) realizaron su investigación en la mina Coimolache en Cajamarca, Perú. El objetivo era demostrar que el sistema integrado de tres procesos para la clarificación del agua podía reducir el tamaño de las instalaciones, tener un menor impacto ambiental y un costo menor que el sistema clarificador de rastrillo típico. Utilizaron una combinación de métodos experimentales, descriptivos y correlacionales, que incluyeron la revisión de documentos y la creación de modelos tridimensionales. La muestra estuvo compuesta por plantas de tratamiento de aguas residuales mineras, tomando como ejemplo el sistema de la mina Coimolache. Se utilizaron planos de diseño, herramientas de modelado (como AutoCAD, Tekla y Naviswork) y hojas de cálculo. Los resultados revelaron que el área de las plantas era un 29,30 % menor y los costos de instalación, operación y mantenimiento, un 25 % menores. Asimismo, el nuevo

sistema contribuyó a disminuir el impacto ambiental optimizando recursos y espacio. La investigación determinó que esta técnica mejoró considerablemente la eficiencia del tratamiento de aguas residuales mineras. Esta reducción de área y costos evidenció una mejora en la eficiencia del sistema y en el aprovechamiento de recursos.

2.1.3 Antecedentes locales

Loayza Aguilar (2020) tuvo como objetivo el diseño, construcción y evaluación de un prototipo de tratamiento de agua para potabilización a escala de planta piloto, utilizando agua sintética con una turbidez inicial aproximada de 80 NTU, obtenida a partir de lodos provenientes de embalses de una planta de tratamiento. Mediante pruebas de jarras se determinó una dosis óptima de coagulante de 31 mg/L. El sistema diseñado incluyó unidades de mezcla rápida, floculación, sedimentación de alta tasa y filtración. La mezcla rápida se desarrolló en un tanque de 3,2 L con agitación a 312 rpm durante 40 segundos. Posteriormente, la floculación se llevó a cabo en un tanque de 112 L con un tiempo de retención de 24 minutos y un gradiente de velocidad de $9,008 \text{ s}^{-1}$. El proceso de sedimentación se realizó en un decantador de alta tasa de 43 L con un tiempo de retención de 10 minutos, equipado con 36 placas inclinadas a 60° , logrando reducir la turbidez hasta 11 NTU. Finalmente, el sistema de filtración, con una tasa de 300 m/d y un lecho filtrante de 1 m compuesto por grava, arena y antracita, permitió obtener agua con turbidez menor a 5 NTU.

Cusi (2021) optimizó el consumo de cal en el tratamiento de aguas de mina en la PTAM, mediante la implementación de un sistema de inyección de aire. El proceso convencional considera la dosificación de sulfato férrico para la remoción de arsénico a un pH de 6,00–6,30, seguido de la adición de lechada de cal para elevar el pH entre 8,80 y 9,30 y precipitar manganeso. El estudio evaluó la eficiencia de la aireación como alternativa para reducir el consumo de cal, al permitir incrementar el pH inicial hasta valores cercanos a 7,77–7,80 antes de la dosificación química. La metodología se basó en ensayos experimentales a escala de laboratorio y análisis fisicoquímicos del efluente, considerando como parámetro de control la concentración de carbonatos y bicarbonatos. Los resultados evidenciaron que la inyección de aire contribuye a disminuir el uso de cal, optimizando el proceso de tratamiento sin afectar la eficiencia en la remoción de contaminantes.

2.2 EL AGUA

El agua constituye un componente esencial en numerosos procesos físicos, químicos y productivos, cuyas características fisicoquímicas determinan su calidad y condicionan las alternativas tecnológicas requeridas para su tratamiento. En este sentido, pese a su abundancia en el planeta, la disponibilidad de agua con características adecuadas para su aprovechamiento es limitada, por lo que representa un recurso estratégico que requiere una gestión sostenible (Arellano, 2018).

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2023), el acceso limitado a fuentes de agua segura y a servicios adecuados de saneamiento continúa constituyendo una problemática de alcance mundial, debido a sus implicancias sobre la salud pública y las condiciones de vida de la población. En este contexto, garantizar la disponibilidad de agua con condiciones apropiadas de calidad requiere la aplicación de estrategias de gestión, control y tratamiento orientadas a reducir la presencia de contaminantes y preservar este recurso.

2.2.1 Aguas residuales mineras

Las aguas residuales generadas en la actividad minera provienen tanto de explotaciones subterráneas como de operaciones a cielo abierto. Estas aguas son recolectadas y almacenadas en estructuras superficiales, como presas, o en cavidades subterráneas, lo que hace indispensable la implementación de tratamientos adecuados para prevenir la contaminación ambiental. Asimismo, la expansión progresiva de las operaciones mineras hacia zonas más alejadas ha incrementado la generación de efluentes con altas concentraciones de metales pesados, elevando su nivel de impacto potencial (Tech, 2016).

2.2.2 Características del agua

Según Arellano (2018), la calidad del agua se evalúa mediante parámetros físicos, químicos y microbiológicos:

- **Físicos:** color, olor, temperatura, turbidez y sólidos.
- **Químicos:** pH, materia orgánica, demanda bioquímica y química de oxígeno (DBO y DQO), nutrientes y presencia de metales o compuestos tóxicos.
- **Microbiológicos:** presencia de microorganismos indicadores de contaminación, como coliformes.

2.2.3 Necesidad del tratamiento del agua

El tratamiento del agua es fundamental para asegurar su calidad y seguridad de acuerdo con el uso previsto, ya que permite prevenir riesgos para la salud pública asociados al consumo de agua contaminada, proteger las actividades económicas y la infraestructura frente a daños ocasionados por impurezas, y contribuir a la conservación de los ecosistemas, manteniendo condiciones ambientales adecuadas y una calidad estética aceptable del entorno (Arellano, 2018).

2.2.4 Procesos fisicoquímicos en el tratamiento de aguas

Rodríguez (2020) señala los siguientes procesos de tratamiento de aguas:

2.2.4.1 Tratamientos físicos

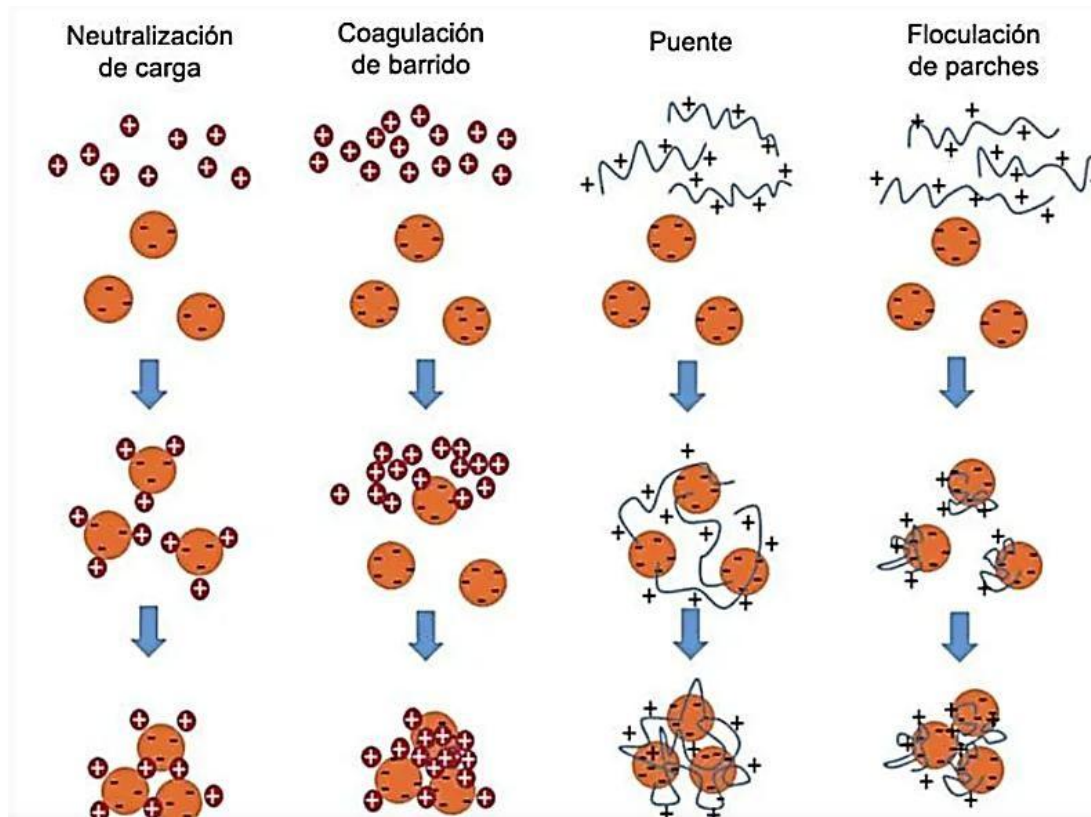
Los tratamientos físicos se basan en la separación de contaminantes presentes en el agua mediante procesos mecánicos o físicos, sin alterar su composición química. Estos métodos aprovechan propiedades como el tamaño de partícula, densidad o flotabilidad para eliminar sólidos suspendidos. Entre los principales procesos se incluyen el tamizado, la sedimentación, la filtración y la separación de fases.

2.2.4.2 Tratamientos químicos

Los tratamientos químicos implican la adición de reactivos o la aplicación de reacciones químicas para modificar o eliminar contaminantes disueltos en el agua. Su objetivo es transformar o precipitar sustancias como metales, nutrientes o compuestos inorgánicos. Dentro de estos procesos destacan la coagulación-floculación, la oxidación, el intercambio iónico y la precipitación química de compuestos como fosfatos o metales.

- **La coagulación:** es un proceso mediante el cual se desestabilizan las partículas coloidales presentes en el agua, con el objetivo de facilitar su posterior remoción. Esta desestabilización se logra mediante la adición de un agente químico coagulante que neutraliza las cargas eléctricas de las partículas, reduciendo las fuerzas de repulsión y permitiendo su aproximación y agregación (Pérez & Urrea, 2018).

- **La floculación:** consiste en la agrupación de estas partículas previamente desestabilizadas, formando estructuras de mayor tamaño denominadas flóculos. Estos flóculos, debido a su mayor peso, tienden a sedimentar en unidades como los decantadores, facilitando su separación del agua (Pérez & Urrea, 2018).

Figura 1.*Esquema de coagulación*

Nota. Mecanismo de acción del proceso de coagulación-floculación. Adaptado de Ibañez (2024).

2.2.5 Planta de tratamiento de agua de Minera Catalina Huanca

La planta de tratamiento de aguas residuales de la Minera Catalina Huanca está diseñada para tratar un caudal promedio de 30 L/s proveniente de las operaciones en el interior mina. El agua tiene una conductividad que varía entre 12 mS/cm y 35 mS/cm, lo cual se clasifica como agua salada. El proceso de tratamiento comienza con coagulación utilizando una solución de sulfato férrico, lo que permite alcanzar un pH establecido de entre 6,20 y 6,30. A continuación, se incrementa el pH mediante la adición de lechada de cal, logrando un pH final de entre 8,4 y 8,5, con el fin de abatir arsénico y manganeso (Catalina Huanca Sociedad Minera S.A.C., 2017).

La planta maneja dos aguas: una dulce, con conductividad de 1 mS/cm a 3 mS/cm, y otra salada, con 39 mS/cm a 45 mS/cm. La combinación de ambas aguas es la que entra al sistema de tratamiento. El agua residual ingresa al reactor de flujo pistón (RFP), que tiene una capacidad de 42 m³, donde se mezcla el sulfato férrico con el agua.

Después, el agua ingresa al reactor de cal, donde se añade hidróxido de calcio al 5 % para seguir el proceso de ajuste de pH. Después, el agua va a los sedimentadores, uno de 40 m³ y otro de 65 m³, donde se lleva a cabo la sedimentación. El agua procesada se traslada a un tanque de oxidación de 165 m³ para filtrarla después. Finalmente, el agua es impulsada por bombas a un tanque de 15 m³, desde el cual se descarga al cuerpo receptor.

2.3 TURBIDEZ

La turbidez es un indicador de la presencia de partículas suspendidas y coloidales que dispersan la luz y reducen la transparencia del agua. Su determinación se realiza mediante un turbidímetro, el cual cuantifica la intensidad de la luz dispersada por la muestra y expresa el resultado en unidades nefelométricas de turbidez (NTU) (Bejarano et al., 2022).

2.3.1 Factores que inciden en la remoción de turbidez

Según Vera et al. (2024), diversos factores influyen en la eficiencia de remoción de turbidez durante el tratamiento del agua. Los aspectos esenciales que afectan esto son el tipo y cantidad de partículas, el tipo y cantidad de coagulante, el pH del agua, la velocidad de mezcla y el tiempo de contacto entre reactivos y partículas.

Un procedimiento de mezcla rápida, bien diseñado y ejecutado, facilita la distribución de los coagulantes e interactúa con los sólidos, produciendo flóculos que pueden eliminarse en las fases de sedimentación y filtrado. Por otro lado, no administrar la dosis adecuada de coagulante o mezclarlo de forma adecuada puede generar turbidez, lo que reduce la calidad del efluente final. Además, la temperatura y la presencia de compuestos orgánicos o inorgánicos pueden alterar el funcionamiento de los coagulantes, por lo que es fundamental revisar y modificar constantemente los ajustes de funcionamiento (Vera et al., 2024).

2.3.2 Dimensiones de la remoción de turbidez

Según Arcila et al. (2024), la evaluación de la remoción de turbidez requiere comparar cuantitativamente las condiciones de ingreso y salida del sistema, de modo que pueda estimarse la eficiencia del tratamiento y analizarse la variabilidad del efluente.

2.3.2.1 Fórmula y método para calcular el porcentaje de remoción

El porcentaje de reducción de turbidez es una forma importante de ver qué tan bien funciona el sistema de tratamiento. Este valor se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Porcentaje de remoción} = \left(\frac{\text{Turbiedad de entrada} - \text{Turbiedad de salida}}{\text{Turbiedad de entrada}} \right) \times 100$$

Al comparar el nivel de turbidez del agua antes y después del tratamiento, este método permite determinar con precisión la cantidad de partículas suspendidas eliminadas durante el procedimiento. Se utilizan turbidímetros para obtener y analizar datos. Estas herramientas garantizan que las lecturas sean correctas y precisas.

2.3.2.2 Interpretación y significancia de los resultados

El porcentaje de eliminación de turbidez es una información útil tanto para los responsables del tratamiento como para los usuarios finales. Un porcentaje alto indica que el sistema funciona correctamente, cumple con todos los estándares y proporciona agua potable limpia. Por otro lado, un porcentaje bajo podría indicar que el sistema no funciona correctamente o que necesita reparaciones para proteger la salud de las personas y el medio ambiente (Arcila et al., 2024).

2.4 SISTEMA DE MEZCLA RÁPIDA

La mezcla rápida constituye una etapa fundamental del proceso de coagulación, debido a que permite dispersar el coagulante de manera uniforme en el agua y favorecer su contacto con las partículas suspendidas. El sistema de mezcla comprende una cámara o dispositivo hidráulico o mecánico en el que el agua residual y los reactivos químicos son sometidos a una agitación controlada. Esta condición facilita la desestabilización de las partículas y la posterior formación de flóculos durante la floculación, contribuyendo a la eficiencia y estabilidad del tratamiento (Santiago Muíño, 2023).

La eficiencia de la mezcla rápida influye directamente en la calidad del agua tratada, ya que una adecuada dispersión de los reactivos reduce la presencia de partículas suspendidas y mejora el desempeño de las etapas posteriores. En aplicaciones mineras, su correcta operación contribuye a disminuir el impacto del efluente tratado sobre los cuerpos receptores (Santiago Muíño, 2023).

2.4.1 Dimensiones del sistema de mezcla rápida

El desempeño de un sistema de mezcla rápida depende de la integración adecuada de sus criterios de diseño, construcción y operación dentro de la línea de tratamiento. La selección de las condiciones hidráulicas y operativas debe asegurar una dispersión eficiente del coagulante, minimizar zonas muertas o cortocircuitos hidráulicos y mantener condiciones reproducibles de funcionamiento (Winckler et al., 2021).

2.4.2 Parámetros hidráulicos del sistema

Según Gonzalez Villamil (2021), se consideran cuatro parámetros hidráulicos fundamentales:

2.4.2.1 Definición y relevancia del gradiente de velocidad

Una métrica hidráulica que indica el nivel de agitación en la cámara de mezcla es el gradiente de velocidad, abreviado como G (s^{-1}). Con un valor de G alto, los coagulantes se distribuyen uniformemente en el agua. Una agitación inadecuada provocará una mala distribución de los reactivos. Sin embargo, la producción de flóculos y la eficiencia del proceso pueden verse afectadas negativamente por una agitación demasiado vigorosa.

2.4.2.2 Tiempo de mezcla y su determinación

El tiempo de mezcla es el tiempo que el agua y los reactivos permanecen en la cámara de mezcla rápida y se agitan con frecuencia. Este tiempo debe ser suficiente para distribuir uniformemente los coagulantes, pero no tanto como para que el flóculo se vuelva inestable.

2.4.2.3 Volumen de la cámara de mezcla

Un aspecto relevante es el tamaño de la cámara de mezcla. Este elemento afecta la rapidez del agua y el tiempo necesario para su integración. Un buen diseño garantiza que toda el agua entrante reciba el tratamiento adecuado sin causar zonas muertas ni cortocircuitos hidráulicos. Además, un volumen adecuado facilita la regulación de las operaciones y la eficiencia energética del sistema.

2.4.2.4 Selección y funcionamiento del tipo de agitador

El agitador es el motor de la cámara de mezcla. La elección del mejor (mecánico, hidráulico o neumático) dependerá de las necesidades de la planta de tratamiento. Para lograr el gradiente de velocidad ideal y mezclar los componentes eficazmente, se debe operar el agitador a la velocidad correcta y aplicar la potencia adecuada. Un agitador adecuado puede disminuir el consumo energético y los gastos de mantenimiento, factores que afectan directamente el tiempo operativo.

2.5 ESTABILIDAD DEL PROCESO

La estabilidad del tratamiento de aguas residuales se relaciona con la capacidad del sistema para mantener sus variables operacionales y la calidad del efluente dentro de rangos controlados frente a variaciones en las condiciones de ingreso. Un proceso estable presenta menor variabilidad y responde de manera predecible a cambios en el caudal o en la composición del agua residual, reduciendo desviaciones que puedan afectar el desempeño de las etapas posteriores (Osorio Churque & Solano Martínez, 2023).

2.5.1 Factores que afectan la estabilidad del proceso

La estabilidad del proceso puede verse afectada por factores internos y externos, entre ellos las variaciones de caudal y composición del afluente, las condiciones climáticas, las descargas no previstas y las fluctuaciones propias de la operación industrial (Tipán et al., 2025).

Además, aspectos como la calibración regular de los instrumentos de medición, la reparación regular de los equipos y la monitorización frecuente de parámetros importantes son fundamentales para mantener la estabilidad de las operaciones. En el proceso de coagulación-floculación, una mezcla rápida, bien planificada y realizada marca la diferencia. Garantiza que los reactivos funcionen de la misma manera en todas las partes del agua tratada (Tipán et al., 2025).

2.5.2 Constancia de parámetros operacionales

2.5.2.1 Mantenimiento del pH y turbidez dentro de rangos óptimos

Mantener los niveles de turbidez y pH constantes durante todo el tratamiento es una condición operativa necesaria para favorecer el funcionamiento estable del proceso. La eficiencia y la fiabilidad de procesos químicos como la floculación y la coagulación mejoran cuando estos parámetros se mantienen dentro de sus límites ideales. Un proceso inestable o partículas no eliminadas podrían indicar una turbidez excesiva en el efluente o un nivel de pH insuficiente. Por lo tanto, controlar el pH y la turbidez constantemente constituye una medida técnica de control para mantener la calidad del efluente y prevenir desviaciones operacionales.

2.5.2.2 Control y seguimiento de variables durante la operación

El control operativo implica supervisar y ajustar constantemente los parámetros clave del proceso mediante herramientas de medición precisas y un registro constante. Esto facilita la detección e implementación de soluciones cuando la calidad del agua tratada comienza a deteriorarse debido a cambios en los valores de referencia. Por ejemplo, si el operador detecta un aumento de la turbidez en una planta de tratamiento, podría modificar la cantidad de coagulante o la velocidad de agitación para garantizar que el proceso siga funcionando. Esta estrategia proactiva estabiliza la situación de inmediato, contribuyendo a mantener la estabilidad y el desempeño del tratamiento

2.6 MARCO NORMATIVO

2.6.1 Límites máximos permisibles

De acuerdo con el Ministerio del Ambiente (MINAM, 2010), el D. S. N.° 010-2010-MINAM establece los Límites Máximos Permisibles (LMP) para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero-metalúrgicas. Entre los parámetros regulados se encuentran el pH, los sólidos totales en suspensión, aceites y grasas y diversos metales y metaloides. En consecuencia, la evaluación del cumplimiento normativo del efluente minero debe efectuarse respecto de los parámetros expresamente contemplados en dicha norma. La turbidez constituye un indicador operativo relevante para evaluar la clarificación y el desempeño del tratamiento, pero no debe presentarse como un LMP de descarga establecido por este decreto.

Por otra parte, el D. S. N.° 031-2010-SA aprueba el Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano y establece requisitos aplicables al agua destinada al consumo de la población (Ministerio de Salud, 2010). Por ello, sus valores de referencia no se utilizan en esta investigación como criterio de cumplimiento para la descarga del efluente minero.

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA

Catalina Huanca Sociedad Minera S.A.C. está ubicada en el distrito de Canaria, provincia de Fajardo, departamento de Ayacucho, a una altitud promedio de 3 300 m s. n. m. Su actividad minera se desarrolla en la Unidad Económica de Actividad (UEA) Catalina Huanca, compuesta por seis concesiones mineras. La mina tiene 4 bocaminas y 34 chimeneas que la conectan a la superficie; el mineral se lleva a la planta concentradora San Jerónimo, a 15 km. Los relaves generados se filtran y se almacenan temporalmente en un depósito junto al río Mishka, alimentado por las quebradas Raccaure y Marcachata. A lo largo del río, se encuentran afloramientos naturales y tuberías de la empresa minera, algunas con agua de filtración.

Figura 3.

Ubicación de la unidad Minera Catalina Huanca



Nota. Adaptado de Google Earth, 2025.

3.2 POBLACIÓN Y MUESTRA

3.2.1 Población

La población de estudio estuvo constituida por las aguas residuales provenientes del interior de la mina y conducidas hacia la planta de tratamiento de la Minera Catalina Huanca. Esta población comprende el agua que ingresa al sistema de tratamiento y que, posteriormente, pasa por las diferentes etapas del proceso, incluyendo el sistema de mezcla rápida implementado, cuyo desempeño se evaluó en términos de eficiencia de remoción de turbidez y estabilidad del tratamiento.

3.2.2 Muestra

En cuanto a la muestra, se analizaron muestras de aguas residuales tomadas antes y después de la implementación del sistema de mezcla rápida. Estas muestras fueron recolectadas en diferentes días y en distintos horarios operativos, con el propósito de obtener datos representativos de las condiciones reales y habituales del proceso de tratamiento.

El criterio de selección fue no probabilístico por conveniencia, dado que se priorizó la obtención de muestras durante los períodos de operación normal de la planta, asegurando así que los resultados reflejaran fielmente la eficacia del nuevo sistema bajo condiciones rutinarias.

3.3 DISEÑO METODOLÓGICO

3.3.1 Tipo de investigación

Este estudio es de tipo aplicado porque busca una solución práctica y directa a un problema específico en la Minera Catalina Huanca. Utiliza principios de ingeniería para diseñar, implementar y evaluar un sistema de mezcla rápida que mejore la calidad del agua, contribuyendo así al cumplimiento de las normativas ambientales y a la protección del ecosistema local. A diferencia de una investigación básica que busca generar conocimiento puro, este estudio se enfoca en la aplicación de conocimientos existentes para resolver una necesidad real y tangible.

3.3.2 Nivel de investigación

El estudio correspondió a un nivel explicativo, porque busca determinar la influencia de la implementación y puesta en marcha del sistema de mezcla rápida

(variable independiente) sobre la remoción de turbidez (variable dependiente), evaluada mediante las dimensiones de eficiencia y estabilidad del efluente tratado.

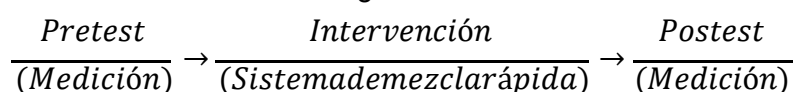
3.4 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

La investigación se diseñó como cuasiexperimental, con un único grupo evaluado mediante pretest y posttest.

Para ello, se realizó una medición inicial o pretest, que consiste en la caracterización del sistema actual sin la intervención. Posteriormente, se llevó a cabo una medición final o posttest después de la instalación y puesta en marcha del nuevo sistema. La comparación de los datos de ambas mediciones permitió evaluar con precisión el impacto de la intervención.

La muestra de la investigación está conformada por el flujo de aguas residuales y las muestras puntuales extraídas de la planta de tratamiento. El procedimiento de muestreo se realizó en puntos definidos del proceso y en horarios representativos de la operación, asegurando la objetividad y representatividad de los datos recopilados para su análisis.

Esquema del diseño de la investigación



Donde:

- Pretest: Medición de variables antes de la implementación.
- Intervención: Diseño e instalación del sistema de mezcla rápida.
- Posttest: Medición de variables después de la intervención.

3.5 VARIABLES E INDICADORES

3.5.1 Variable independiente

- Implementación y puesta en marcha del sistema de mezcla rápida
- Dimensiones: diseño hidráulico; implementación y puesta en marcha.

3.5.2 Variable dependiente

- Remoción de turbidez
- Dimensiones: eficiencia de remoción y estabilidad de la turbidez del efluente tratado.

3.5.3 Operacionalización de las variables

Tabla 1.

Operacionalización de las variables

VARIABLE	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES Y CRITERIOS	UNIDAD / ESCALA	TÉCNICA E INSTRUMENTO
VARIABLE INDEPENDIENTE DISEÑO Y PUESTA EN MARCHA DEL SISTEMA DE MEZCLA RÁPIDA	Se evaluará mediante los parámetros hidráulicos del diseño y la evidencia documental de la implementación y puesta en marcha del sistema, diferenciando la condición anterior y posterior a la intervención.	Diseño hidráulico	Q: caudal de diseño (m³/s). F: número de Froude (adimensional). t: tiempo de mezcla (s). G: gradiente de velocidad (s⁻¹). F $= \frac{V_1}{\sqrt{(g \times h_1)}} ; t$ $= \frac{L_j}{V_m} ; G$ $= \sqrt{\left[\frac{\gamma \times h}{(\mu \times t)} \right]}$	Razón Cuantitativa continua	Medición y cálculo hidráulico. Medidor de caudal, planos y hojas de cálculo.
		Puesta en marcha	Condición del sistema: antes/después. Montaje verificado. Prueba hidráulica. Registro de operación.	Nominal Dicotómica	Observación y revisión documental. Lista de verificación, fotografías y registros de puesta en marcha.
VARIABLE DEPENDIENTE REMOCIÓN DE TURBIDEZ	Se determinará mediante la turbidez del agua de ingreso y del efluente tratado. La eficiencia se expresará como porcentaje de reducción y la estabilidad mediante la dispersión de la turbidez de salida en los periodos validados antes y después de la intervención.	Eficiencia de remoción	T _i : turbidez de ingreso (NTU). T _s : turbidez de salida (NTU). E: eficiencia de remoción (%). $E = \frac{[(T_i - T_s)]}{T_i} \times 100$	Razón Cuantitativa continua	Análisis fisicoquímico. Turbidímetro y ficha de registro.
		Estabilidad de la turbidez del efluente	σ _s : desviación estándar de T _s (NTU).	Razón Cuantitativa continua	Análisis estadístico. Registros validados y hoja de cálculo.

3.6 PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO

3.6.1 Caracterización del agua residual

Para evaluar el impacto del sistema de mezcla rápida en el tratamiento de aguas residuales, se empleó la técnica de análisis físico-químico. Este método permite determinar parámetros fundamentales como la turbidez, el pH y el caudal del agua en diferentes etapas del proceso. Los instrumentos utilizados incluyen el turbidímetro, para medir la turbidez en Unidades Nefelométricas de Turbidez (NTU), y el pH-metro, que facilita la medición precisa de la acidez o alcalinidad del agua. Además, se utilizó un medidor de caudal para cuantificar el volumen de agua tratado por unidad de tiempo.

Además, se emplearon fichas de registro diseñadas específicamente para consignar información sobre el funcionamiento de los equipos, la frecuencia de intervenciones técnicas y cualquier incidencia relevante durante la operación. Esta técnica facilita la identificación de posibles mejoras y la toma de decisiones informadas, contribuyendo a la sostenibilidad operativa del sistema.

Figura

4.

Reactor de flujo pistón – Punto de dosificación de coagulante



Nota. Imágenes del sistema de tratamiento de aguas residuales (PTAM).

Figura 5.

Toma de muestra en la mezcla rápida



Nota. Imágenes del sistema de tratamiento de aguas residuales (PTAM).

Figura 6.

Toma de muestra en el reactor flujo pistón RFP



Nota. Imágenes del sistema de tratamiento de aguas residuales (PTAM).

Figura 7.

Toma de muestra en el sedimentador 02



Nota. Imágenes del sistema de tratamiento de aguas residuales (PTAM).

Figura 8.

Toma de muestra en el tanque de oxidación



Nota. Imágenes del sistema de tratamiento de aguas residuales (PTAM).

Figura 9.

Toma de muestra en el sistema la melar



Nota. Imágenes del sistema de tratamiento de aguas residuales (PTAM).

Figura 10.

Toma de muestra en el tanque 15



Nota. Imágenes del sistema de tratamiento de aguas residuales (PTAM).

Figura 11.*pH-metro y turbidímetro*

Nota. Imágenes del laboratorio de la Minera Catalina Huanca.

3.6.2 Diseño del sistema de mezcla rápida

El diseño del sistema de mezcla rápida fue una etapa importante dentro del tratamiento de las aguas residuales, ya que permitió asegurar una distribución homogénea del coagulante en un corto tiempo. Una adecuada mezcla favorece el contacto inmediato entre el reactivo químico y los contaminantes presentes en el agua, contribuyendo a la desestabilización de las partículas coloidales.

3.6.2.1 Ensayo de prueba de jarras para la determinación de las RPM óptimas de mezcla rápida

Con la finalidad de determinar las condiciones óptimas de mezcla rápida para el proceso de coagulación del agua residual proveniente del interior mina, se realizaron ensayos de prueba de jarras utilizando diferentes velocidades de agitación durante la etapa de mezcla rápida. Para el desarrollo del ensayo se utilizó sulfato férrico como coagulante principal, manteniendo constantes las condiciones de dosificación y tiempo de floculación, mientras que se variaron únicamente las revoluciones por minuto (RPM) durante la mezcla rápida. Las velocidades evaluadas fueron 200, 240, 280 y 300 RPM, aplicadas durante un tiempo de mezcla rápida de 1 a 2 segundos. Posteriormente, las muestras fueron sometidas a una etapa de floculación lenta y sedimentación para evaluar la eficiencia de remoción de turbidez.

Figura 12.

Prueba de jarras a 200, 240, 280, 300 RPM



Nota. Imágenes del laboratorio de la Minera Catalina Huanca.

Figura 13.

Resultados del ensayo en la prueba de jarras

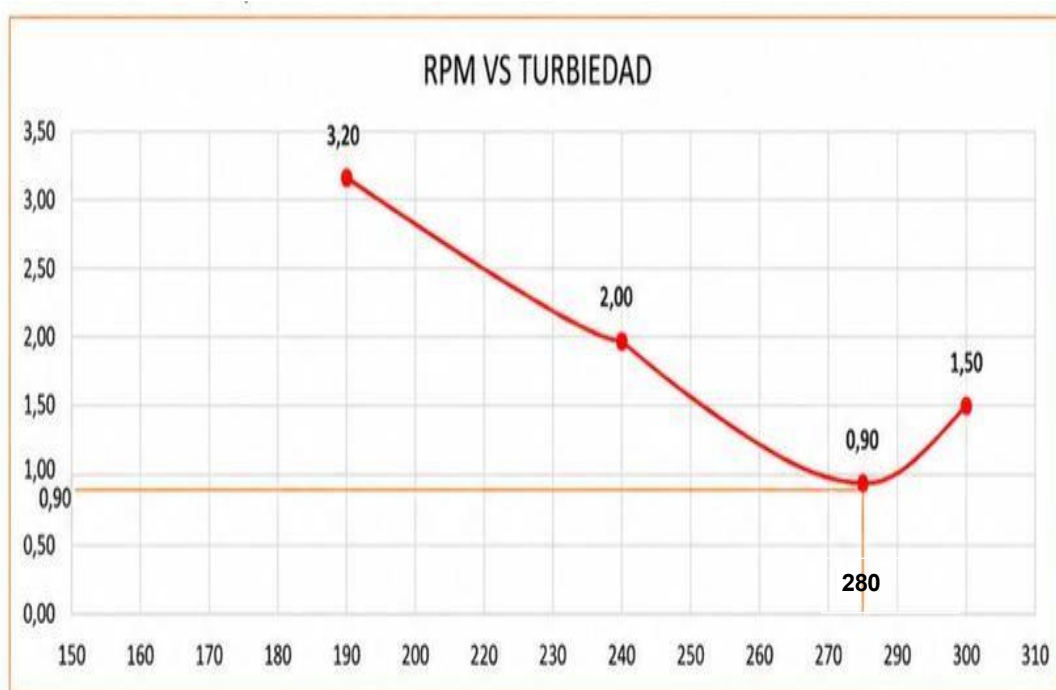


Nota. Imágenes del laboratorio de la Minera Catalina Huanca.

Tabla 2.*Tabla de resultados de la prueba de jarras*

código	Sulfato Férrico (ppm)	RPM	Turbiedad NTU	pH
ING SAL	0	0	171	8,21
DFPX1	1520	200	3,2	7,15
DFPX2	1520	240	2	7,11
DFPX3	1520	280	0,92	7,16
DFPX4	1520	300	1,5	7,13

Nota. Fuente: laboratorio de la Planta de Tratamiento de Agua de Mina Catalina Huanca.

Figura 14. *Gráfica de revoluciones por minuto vs. turbidez*

Los resultados obtenidos evidenciaron que velocidades inferiores a 240 RPM no permitían una dispersión homogénea del coagulante, observándose formación deficiente de microflóculos y mayor turbidez residual. Asimismo, velocidades excesivamente altas generaban ruptura parcial de flóculos debido al exceso de energía impartida al sistema. Experimentalmente se determinó que la condición óptima de mezcla rápida se alcanzó aproximadamente a 280 RPM, valor que permitió obtener una rápida dispersión del reactivo y una adecuada formación de flóculos estables. A partir de esta condición experimental se estimó un gradiente de velocidad cercano a:

$$G \approx 1\,400\text{ s}^{-1}$$

Tabla 3. Relación práctica entre G y RPM usando correlaciones experimentales empleadas en tratamiento de agua

RPM	G aproximado (s^{-1})
50	20-80
100	80-250
150	250-500
200	500-900
250	900-1 400
300	1 400-1 800

Nota. Fuente: laboratorio de la Planta de Tratamiento SEDA Ayacucho.

La relación entre el gradiente de velocidad y las revoluciones por minuto permitió establecer los criterios hidráulicos para el diseño del sistema de mezcla rápida basado en resalto hidráulico implementado en la planta de tratamiento.

3.6.2.2 Determinación de parámetros hidráulicos

Q (caudal) = $0,035 \text{ m}^3/\text{s}$

$B = 0,5 \text{ m}$

$P = 0,5 \text{ m}$

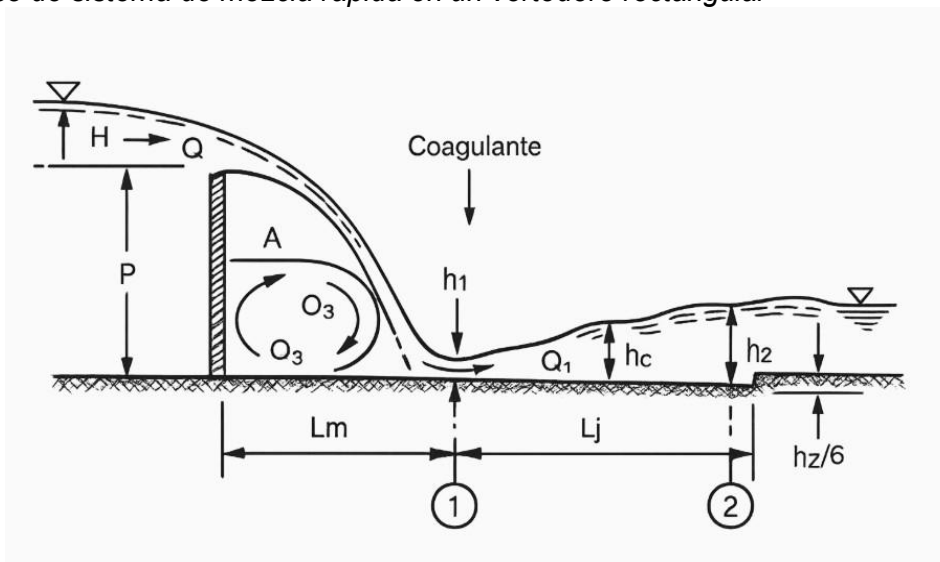
Viscosidad = $0,00112 \text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$.

Peso específico = $10\,074,9 \text{ N}/\text{m}^3$

Gravedad (g) = $9,81 \text{ m}/\text{s}^2$

Figura 15.

Proceso de sistema de mezcla rápida en un vertedero rectangular



Nota. Fuente: Tomado de Potabilización del agua (p. 69), por Jairo Romero Rojas (1999), Alfaomega.

Caudal unitario

$$q = \frac{Q}{B} = 0,07 \text{ m}^2/\text{s} \quad (1)$$

Profundidad crítica

$$h_c = \left(\frac{q^2}{g}\right)^{\frac{1}{3}} = 0,079349 \text{ m} \quad (2)$$

verificar si se puede medir el caudal (mayor a 3).

$$\frac{P}{h_c} = 6,3017472 \quad (3)$$

Profundidad conjugada 1

$$h_1 \frac{\sqrt{2 \cdot h_c}}{1,06 + \sqrt{\frac{P}{h_c} + 1,5}} = 0,029121 \text{ m} \quad (4)$$

velocidad en la sección 1

$$V_1 = \frac{q}{h_1} = 2,40376 \text{ m/s} \quad (5)$$

Número de Froude ($4,5 \leq F < 9$)

$$F = \frac{V_1}{\sqrt{g \cdot h_1}} = 4,5 \quad (6)$$

Profundidad conjugada 2

$$h_2 = \frac{h_1}{2} \times (\sqrt{1 + 8 \cdot F^2} - 1) = 0,171225 \text{ m} \quad (7)$$

Velocidad en la sección 2

$$V_2 = \frac{q}{h_2} = 0,408817 \text{ m/s} \quad (8)$$

Pérdida de energía en el resalto (menor a 0,3).

$$h = \frac{(h_2 - h_1)^3}{4 \times h_2 \times h_1} = 0,143875 \text{ m} \quad (9)$$

Longitud del resalto

$$L_j = 6 \times (h_2 - h_1) = 0,852626 \text{ m} \quad (10)$$

Velocidad media

$$v_m = \frac{(V_1 + V_2)}{2} = 1,40628 \text{ m/s} \quad (11)$$

Distancia del vertedero

$$L_m = 4,3 \times P^{0,1} \cdot h_c^{0,9} = 0,410131 \text{ m} \quad (12)$$

Tiempo de mezcla rápida (menor a 1).

$$t = \frac{L_j}{v_m} = 0,6062 \text{ s} \quad (13)$$

Gradiente de velocidad ($1\,000\,s^{-1} < G < 2\,000\,s^{-1}$).

$$G = \sqrt{\frac{\gamma \times n}{\mu \times t}} = 1\,461,04\,s^{-1} \quad (14)$$

3.6.2.3 Selección de materiales y equipos según las condiciones del agua residual

La selección de materiales y equipos para la mezcla rápida de aguas residuales se basó en las características específicas del agua a tratar, como su composición química, la carga de contaminantes y su variabilidad. Para garantizar una mezcla eficiente, es fundamental elegir materiales resistentes a la corrosión y equipos capaces de generar turbulencias adecuadas, como agitadores mecánicos o sistemas de difusión de aire. Además, se debe considerar la capacidad de los equipos para adaptarse a diferentes caudales y concentraciones de contaminantes. La elección correcta de materiales y equipos optimiza el proceso de tratamiento, reduciendo costos operativos y mejorando la eficiencia en la eliminación de contaminantes.

Tabla 4. *Materiales para la construcción de la mezcla rápida*

Descripción	Unidad	Costo unitario (US\$)	Cantidad	Costo total (US\$)
Plancha de acero al carbono 1/4"	unid.	145,00	4	580,00
Angulo de fierro espesor 1/4" a-36 3"x 3" largo 20(pies)	unid.	48,57	4	194,28
Electrodo aws a5,1: e 6011 1/8" (3,2 mm)	kg	3,15	20	63,00
Electrodo aws a5,1: e 7018 1/8" (3,2 mm)	kg	3,67	20	73,40
Electrodo básico (día) 5/32"-4mm;(por) e-7018;(lg) 350mm	kg	3,16	20	63,20
Disco abrasivo corte 9"x1/8" dw44600	unid.	5,00	50	250,00
Disco corte 4 1/2	unid.	2,00	50	100,00
Disco desbaste 4 1/2 x 1/4 x 7/8	unid.	1,18	15	17,70
Pintura base roja epoxica	gal	80,00	2	160,00
Pintura sobre base ploma	gal	80,00	2	160,00
Pintura azul eléctrico	gal	80,00	1	80,00
Pintura verde botella	gal	80,00	2	160,00
Angulo de fierro espesor 1/4" a-36 2"x 2" largo 20(ft)	unid.	31,00	3	93,00
Brida 8" ASTM a-53 soldable SCH40 150 PSI	unid.	30,00	1	30,00
Tubo de acero sin costura (día) 8";(SCH) 40;(res) 42 kg/mm2;(nor) ASTM a-53 grado b;(mat) acero ASTM a-53;(lg) 6mt	m	55,00	3	165,00
Horas hombre soldador	día	140,00	14	1 960,00
Total				4 149,58

3.7 IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE MEZCLA RÁPIDA

3.7.1 Instalación del sistema de mezcla rápida

La instalación del sistema de mezcla rápida tuvo como objetivo principal asegurar una adecuada dispersión y homogeneización del coagulante en el agua residual proveniente del interior mina, optimizando el proceso de coagulación dentro de la planta de tratamiento de aguas residuales de la Minera Catalina Huanca.

Asimismo, la instalación buscó garantizar la integración hidráulica y operativa del nuevo sistema con la infraestructura existente, asegurando condiciones de operación seguras, eficientes y sostenibles.

Figura 16.

Imagen del Reactor de flujo pistón (RFP) antes de la instalación de la mezcla rápida



Nota. Fuente: Planta de tratamiento de agua de mina Catalina Huanca

3.7.2 Condiciones previas del área de instalación

Previo a la instalación del sistema de mezcla rápida, se realizó una evaluación del área destinada a su implementación, verificándose las siguientes condiciones:



Estas condiciones permitieron realizar la instalación sin afectar la continuidad operativa de la planta de tratamiento.

3.7.3 Materiales y equipos utilizados

Para la construcción e instalación del sistema de mezcla rápida se emplearon los siguientes materiales y equipos:

Materiales:

- Planchas de acero estructural para la fabricación del vertedero y canal de mezcla.
- Pintura epóxica anticorrosiva para el revestimiento interno y externo del sistema.
- Pernos, anclajes y elementos de fijación metálicos.
- Sellantes industriales resistentes a la humedad y agentes químicos.

Equipos y herramientas:

- Equipos de soldadura eléctrica.
- Esmeriles y herramientas de corte.
- Equipos de medición (nivel, wincha, plomada).
- Equipos de izaje manual para posicionamiento de las estructuras.

3.7.4 Procedimiento de instalación del sistema de mezcla rápida

La instalación del sistema de mezcla rápida se desarrolló siguiendo un procedimiento secuencial, descrito a continuación:

1. Fabricación del sistema:

Se fabricaron el vertedero y el canal de mezcla rápida utilizando planchas de acero, conforme a los planos constructivos y dimensiones establecidas en el diseño hidráulico.

Figura 17.

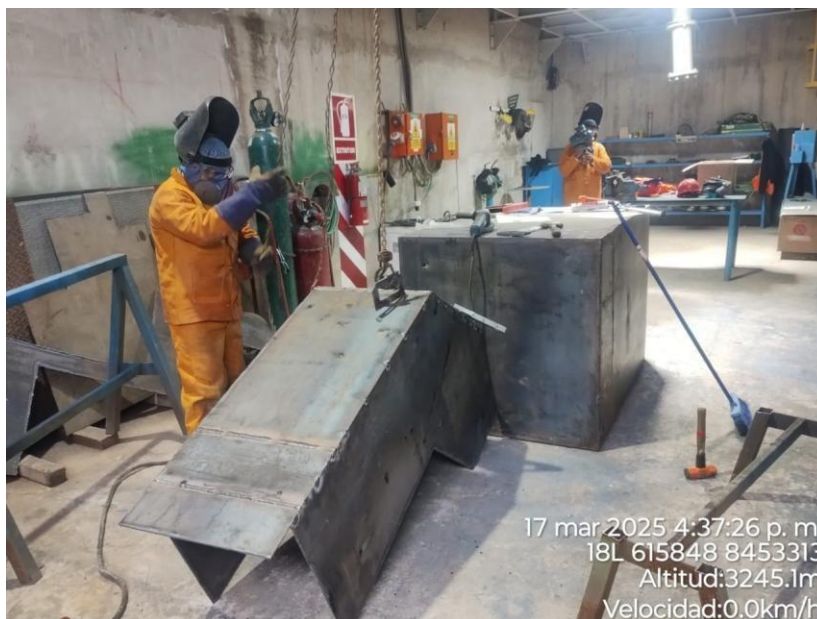
Cortes de plancha de acero al carbono para la construcción de la mezcla rápida



Nota. Taller de soldadura de la planta de tratamiento de agua de mina.

Figura 18.

Ensamblaje de piezas de la mezcla rápida



3.7.4.1 Revestimiento protector

Las superficies internas y externas del sistema fueron revestidas con pintura epóxica, con el fin de proteger la estructura contra la corrosión y prolongar su vida útil en condiciones de operación minera.

Figura 19.

Revestimiento con pintura epóxica



3.7.4.2 Preparación del área

Se acondicionó el área de instalación, nivelando la superficie y verificando la correcta alineación con el flujo de ingreso del agua residual.

Figura 20.

Acondicionamiento del área de instalación



3.7.4.3 Montaje del sistema

El sistema de mezcla rápida fue posicionado y fijado mediante pernos de anclaje, asegurando su estabilidad estructural y correcta orientación hidráulica.

Con la finalidad de garantizar el adecuado régimen de mezcla y la seguridad operativa en la planta, el sistema de mezcla rápida fue alineado, posicionado y fijado mecánicamente a la estructura receptora utilizando pernos de anclaje de especificación técnica industrial. Este procedimiento de anclaje aseguró la rigidez y estabilidad estructural del sistema frente al empuje hidráulico y el régimen turbulento propio del proceso. Dicha fijación rigurosa posibilitó mantener la orientación e inclinación hidráulica de diseño, condición fundamental para que las líneas de corriente ingresen de manera tangencial o perpendicular según el modelo implementado, logrando así maximizar el gradiente de velocidad (G) proyectado sin comprometer la integridad física de las instalaciones.

Figura 21.

Montaje del sistema



3.7.4.4 Sellado y ajustes finales:

Se realizaron sellos en las uniones para evitar fugas y se ajustaron los elementos estructurales según las tolerancias especificadas en los planos.

Figura 22.

Sellado y acoples finales de la mezcla rápida al sistema de tratamiento de agua de mina



3.7.5 Integración con el sistema de tratamiento existente

El sistema de mezcla rápida se incorporó antes del proceso de coagulación, permitiendo que el agua residual y el coagulante dosificado vayan directamente al vertedero de mezcla.

La integración se realizó respetando los niveles hidráulicos y el caudal de diseño del sistema existente, evitando pérdidas de carga excesivas o alteraciones en la operación de las unidades posteriores.

Esta integración permitió una transición eficiente del flujo, mejorando la estabilidad del proceso y la eficiencia de remoción de turbidez.

3.7.6 Consideraciones de seguridad y control

Durante la instalación se aplicaron las siguientes medidas de seguridad y control:

- Uso obligatorio de equipos de protección personal (casco, guantes, lentes, botas de seguridad).
- Control de trabajos en caliente durante las labores de soldadura.
- Señalización del área de trabajo para evitar accesos no autorizados.
- Verificación del cumplimiento de las normas de seguridad industrial de la Minera Catalina Huanca.

Estas medidas garantizaron la seguridad del personal y la correcta ejecución de la instalación.

3.7.7 Capacitación al personal operador para la operación del equipo

Como parte de la fase de implementación, se realizó la capacitación al personal operador de la planta de tratamiento, con el objetivo de garantizar una operación adecuada y sostenible del sistema de mezcla rápida.

La capacitación incluyó:

- Principios de funcionamiento del sistema de mezcla rápida.
- Importancia de la correcta dosificación del coagulante.
- Parámetros operativos clave (caudal, nivel de agua y estabilidad del resalto).
- Procedimientos de inspección y mantenimiento básico.
- Medidas de seguridad durante la operación.

Esta capacitación permitió que el personal operador comprendiera el impacto del sistema en la eficiencia del tratamiento y contribuyera a mantener condiciones operativas estables.

3.8 PUESTA EN MARCHA Y MONITOREO

3.8.1 Pruebas de operación inicial

Luego de la instalación, se llevaron a cabo pruebas de operación inicial con el fin de calibrar los parámetros hidráulicos del sistema.

Estas pruebas permitieron verificar el comportamiento del flujo, la correcta formación del resalto hidráulico y la adecuada dispersión del coagulante.

- Pruebas de operación inicial para calibración de parámetros.
- Registro de datos de remoción de turbidez antes y después de la mezcla rápida.
- Evaluación del desempeño del sistema en condiciones reales.

Figura 23.

Pruebas hidráulicas de resalto hidráulico en la mezcla rápida



3.8.2 Registro de datos de remoción de turbidez

Durante la puesta en marcha, se realizó el registro sistemático de datos de turbidez del agua:

Figura 24.

Puesta en marcha de la mezcla rápida con dosificación de sulfato férrico



- Turbidez antes de la implementación del sistema de mezcla rápida.
- Turbidez después de la implementación del sistema.

Estos datos permitieron comparar el desempeño del proceso y cuantificar la eficiencia de remoción alcanzada.

Figura 25.

Muestras del proceso de tratamiento de aguas residuales de mina



3.8.3 Evaluación del desempeño del sistema

La evaluación del sistema se realizó bajo condiciones reales de operación, considerando la variabilidad del caudal y la calidad del agua de mina.

Los resultados demostraron una mejora significativa en la eficiencia de remoción de turbidez, una mayor estabilidad del proceso y una reducción en el consumo de coagulante, confirmando la efectividad del sistema de mezcla rápida implementado.

3.9 ANÁLISIS DE DATOS

- Análisis comparativo de la eficiencia de remoción de turbidez antes y después de la implementación.
- Cálculo del porcentaje de remoción de turbidez.
- Análisis estadístico de la variación en turbidez y pH (media, desviación estándar).
- Interpretación gráfica mediante diagramas de barras o líneas.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 CARACTERIZACIÓN FISCOQUÍMICA DE LAS AGUAS RESIDUALES

La caracterización físicoquímica del agua residual de ingreso a la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Interior Mina de la Unidad Minera Catalina Huanca se realizó mediante el análisis de muestras recolectadas durante el período comprendido entre mayo y septiembre de 2025. Los análisis fueron efectuados en el laboratorio de la propia planta de tratamiento, siguiendo los procedimientos de control operacional establecidos para el monitoreo de la calidad del agua.

Los parámetros evaluados incluyeron turbidez, pH, conductividad eléctrica, hierro (Fe), manganeso (Mn), bicarbonatos, carbonatos, dureza total, calcio, magnesio, cloruros, sulfatos. Sin embargo, para efectos del presente estudio se analizó principalmente los parámetros de turbidez, pH, hierro y manganeso, debido a su influencia directa sobre los procesos de coagulación, floculación y sedimentación, así como en el diseño hidráulico del sistema de mezcla rápida.

Los resultados obtenidos evidencian una alta variabilidad en la calidad del agua de ingreso, característica común de las aguas residuales provenientes de labores mineras subterráneas. Esta variabilidad se refleja principalmente en los valores de turbidez y concentraciones de metales, lo que condiciona la eficiencia del tratamiento y justifica la necesidad de optimizar el proceso de mezcla rápida para garantizar una adecuada dispersión del coagulante.

Tabla 5.*Resultados de la caracterización fisicoquímica del agua de ingreso a la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Interior Mina*

Fecha	Turbidez (NTU)	Bicarbonatos (mg/L)	Carbonatos (mg/L)	Dureza (ppm)	pH	CE (mS/cm)	Fe (ppm)	Mn (ppm)	Ca (ppm)	Mg (ppm)	Cloruros (ppm)	Sulfatos (ppm)
01-05-25	285,0	1658	585	810	8,05	28,2	0,26	0,7	260	68	8333	700
02-05-25	227,0	1463	976	915	8,07	30,4	0,4	0,5	251	64	9694	820
03-05-25	294,0	1463	780	850	8,08	28,6	0,89	0,5	287	49	8908	650
04-05-25	334,0	1756	780	840	8,05	32,4	0,2	0,8	175	61	10 210	760
05-05-25	441,0	2243	585	840	7,94	33,2	0,05	0,7	290	61	10 920	700
06-05-25	174,0	1661	956	885	8,07	29,4	0,2	0,6	171	62	10 200	800
07-05-25	240,0	970	976	690	8,08	27,1	0,7	0,5	265	50	8908	700
08-05-25	758,0	1268	585	840	8,06	27,1	0,1	0,3	168	60	8226	780
09-05-25	594,0	1853	195	600	8,05	27,7	0,17	0,3	233	58	8520	720
10-05-25	800,0	1258	575	840	8,09	26,4	0,2	0,3	161	61	8206	760
11-05-25	972,0	1950	585	510	8,1	25,8	1,2	1,8	256	68	8994	720
12-05-25	847,0	1058	775	945	8,16	28,8	0,2	0,4	170	66	8226	840
13-05-25	>1000	1820	630	510	8,07	28,4	1,14	1,2	289	68	8610	690
14-05-25	971,0	1073	976	675	8,1	28,7	0,4	0,5	194	72	9076	860
15-05-25	887,0	1170	585	511	8,07	28,4	1,01	0,4	281	67	9467	720
16-05-25	>1000	2243	390	555	8,1	29,9	1,15	0,2	192	49	9628	690
17-05-25	>1000	1951	585	525	8,09	27,4	0,3	1,5	163	60	10 407	710
19-05-25	280,0	2230	390	550	8,1	30,1	1,1	0,5	200	50	9052	660
20-05-25	111,0	1366	585	570	7,99	28,8	1,2	0,5	286	66	9010	690
21-05-25	133,0	1560	585	420	7,99	32,9	1,84	2,2	222	68	10 887	750
22-05-25	144,0	1658	585	795	7,99	29,2	0,1	1,2	251	69	11 002	700
23-05-25	354,0	780	976	675	7,96	26	0,1	0,6	190	69	8624	900

Fecha	Turbidez (NTU)	Bicarbonatos (mg/L)	Carbonatos (mg/L)	Dureza (ppm)	pH	CE (mS/cm)	Fe (ppm)	Mn (ppm)	Ca (ppm)	Mg (ppm)	Cloruros (ppm)	Sulfatos (ppm)
24-05-25	779,0	1853	390	645	8,02	30,1	0,35	0,8	210	51	10 704	720
26-05-25	692,0	1658	585	600	7,94	29	0,23	0,2	195	89	10 408	560
27-05-25	898,0	1280	780	705	7,95	29,6	1,2	0,6	196	76	9812	1060
28-05-25	930,0	1756	390	690	7,94	28,1	1,55	0,9	219	91	10 408	810
29-05-25	415,0	1270	790	720	7,96	29,8	1,3	0,5	198	78	9816	1080
30-05-25	613,0	1186	658	675	7,95	29,2	0,4	0,7	195	85	9086	850
02-06-25	126,0	780	976	675	7,95	27,6	1,1	0,5	190	78	10 110	1020
04-06-25	476,0	1280	780	705	7,95	29,6	1,2	0,6	196	76	9812	1060
05-06-25	272,0	2200	390	825	7,98	26,4	1,17	1,2	274	84	9470	980
06-06-25	430,0	1365	585	540	8,02	28,8	1,14	0,2	260	68	9620	810
07-06-25	487,0	976	1560	570	8,05	26,6	0,35	0,2	162	63	8994	750
08-06-25	326,0	1658	390	750	8,15	27,3	0,3	0,6	176	58	9200	750
09-06-25	306,0	1170	975	750	8,16	25,9	0,56	0,8	256	57	8520	840
11-06-25	207,0	1360	0	620	8,18	21,26	0,2	0,6	220	68	6880	760
12-06-25	272,0	1063	638	975	8,16	20,24	0,3	0,6	219	61	7826	800
14-06-25	379,0	1488	950	855	8,04	28	0,63	3,5	231	65	9218	700
16-06-25	482,0	1658	585	720	8,05	30,5	0,7	1,3	245	68	10 705	815
17-06-25	527,0	1756	585	825	8,02	33,1	0,3	0,8	212	88	11 300	900
18-06-25	465,0	1951	390	690	7,94	30,8	0,04	0,5	186	92	11 002	783
19-06-25	444,0	1366	780	735	7,99	29,5	0,1	0,3	202	41	9516	900
20-06-25	745,0	1073	975	600	7,93	29,9	0,1	0,5	150	58	8994	840
21-06-25	932,0	1366	780	750	7,93	30,7	0,1	0,5	185	73	10 704	880
23-06-25	988,0	1366	780	720	7,97	30,7	0,2	0,6	185	65	10 704	940
25-06-25	990,0	561	585	690	7,91	28,3	0,1	0,5	185	63	10 704	840
26-06-25	990,0	1366	780	680	7,98	30,7	0,12	0,8	158	58	12 307	930

Fecha	Turbidez (NTU)	Bicarbonatos (mg/L)	Carbonatos (mg/L)	Dureza (ppm)	pH	CE (mS/cm)	Fe (ppm)	Mn (ppm)	Ca (ppm)	Mg (ppm)	Cloruros (ppm)	Sulfatos (ppm)
27-06-25	620,0	1853	195	680	7,98	29,2	1,15	0,8	192	49	9812	690
28-06-25	975,0	1380	760	570	8,01	29,3	0,2	0,6	220	68	9780	870
01-07-25	272,0	1951	585	750	8,1	32,6	0,92	1,1	176	46	11 002	870
02-07-25	322,0	1366	585	630	7,9	26,9	0,6	0,8	156	67	8804	810
03-07-25	289,0	1658	585	890	7,86	27,8	0,09	2,3	247	64	8621	675
04-07-25	268,0	1268	780	675	7,96	26,7	0,1	0,6	183	61	9218	800
05-07-25	84,6	1170	585	750	7,91	25,2	0,05	0,5	195	71	8623	675
06-07-25	259,0	780	585	750	7,88	20,94	0,2	0,6	180	61	6840	740
07-07-25	366,0	1658	390	840	7,89	25,4	0,26	3,07	260	53	8921	500
08-07-25	212,0	1171	585	870	8	22,5	0,2	0,5	194	68	6542	700
09-07-25	167,0	1073	585	750	7,92	21,07	0,13	0	279	41	7136	575
10-07-25	171,0	976	780	900	7,84	24,8	0,3	0,6	198	72	8924	760
11-07-25	408,0	1480	410	590	7,97	25,8	0,31	0,5	160	65	7831	780
12-07-25	113,0	1073	780	750	7,76	23,5	0,3	0,4	197	70	7732	740
14-07-25	239,0	1366	585	795	7,82	24,7	0,1	0,5	199	78	8028	760
15-07-25	440,0	1480	420	560	7,84	24,9	0,21	0,9	158	70	7831	770
16-07-25	412,0	1384	588	775	7,89	25,1	0,3	0,7	168	68	7914	750
17-07-25	393,0	1366	390	630	7,73	26,0	0,05	0,5	183	48	7794	700
18-07-25	371,0	1399	496	690	7,82	25,2	0,2	0,65	177	66	7892	745
20-07-25	208,0	1360	456	640	7,97	24,7	0,21	0,8	168	70	7840	770
21-07-25	330,0	1365	390	650	7,95	23,7	0,21	0,5	179	76	7620	790
22-07-25	361,0	1560	292	660	7,95	25,1	0,05	0,7	170	70	7731	710
23-07-25	290,0	1658	390	710	8,02	25,8	0,62	0,8	180	75	8028	830
24-07-25	298,0	1171	780	780	8,04	23,2	0,8	0,9	337	107	8028	600
25-07-25	290,0	976	585	900	8,07	18,1	0,6	0,5	295	73	6542	750

Fecha	Turbidez (NTU)	Bicarbonatos (mg/L)	Carbonatos (mg/L)	Dureza (ppm)	pH	CE (mS/cm)	Fe (ppm)	Mn (ppm)	Ca (ppm)	Mg (ppm)	Cloruros (ppm)	Sulfatos (ppm)
26-07-25	290,0	976	585	900	8,07	18,1	0,6	0,5	295	73	6542	750
27-07-25	474,0	1171	390	780	7,91	23,3	0,8	0,9	274	72	7434	750
28-07-25	268,0	975	780	720	7,84	25,4	0,18	0,8	187	52	8028	625
29-07-25	376,0	1658	585	705	7,84	28,9	0,7	0,6	176	66	9218	700
30-07-25	319,0	1658	780	870	7,9	31,3	0,15	0,9	287	72	11 299	950
31-07-25	282,0	1951	390	750	7,93	31,7	0,57	0,6	232	80	10 408	840
01-08-25	207,0	1658	585	870	7,96	30,6	0,3	0,5	184	72	10 408	940
02-08-25	288,0	2049	585	765	7,95	34,8	0,82	0,6	217	70	11 478	850
03-08-25	262,0	1658	585	870	7,97	31,2	0,5	0,4	196	75	10 408	940
04-08-25	352,0	1658	390	675	7,88	32,9	0,31	0,3	284	62	11 300	840
05-08-25	134,0	1463	976	750	7,98	32,0	0,27	0,3	198	69	11 002	820
07-08-25	216,0	2146	390	780	7,97	31,0	0,48	0,6	231	79	9447	850
08-08-25	257,0	1658	585	750	7,99	30,7	0,72	0,4	260	65	10 110	890
09-08-25	263,0	1756	390	795	7,97	31,3	0,86	0,7	229	72	9447	850
11-08-25	252,0	1756	780	780	7,96	31,3	0,78	0,5	313	57	10 864	875
13-08-25	559,0	1853	195	660	7,86	30,4	0,7	0,5	224	57	9447	850
14-08-25	454,0	2074	462	750	7,96	32,5	0,32	0,1	228	54	11 002	800
15-08-25	262,0	1171	780	915	7,99	24,3	0,3	0,3	264	62	8326	800
16-08-25	242,0	1561	682	810	7,96	29,3	0,77	0,98	284	51	10 407	825
17-08-25	172,0	1463	780	960	7,99	29,7	0,3	0,4	270	68	10 110	840
18-08-25	251,0	1171	585	765	7,98	31,7	0,95	2,4	227	54	11 002	733
19-08-25	268,0	976	683	810	8,05	30,2	0,3	0,3	180	69	9812	660
20-08-25	343,0	976	585	870	8,06	29,6	0,68	1,3	254	55	10 407	767
22-08-25	304,0	585	1171	780	8,03	30,8	0,68	1,3	188	77	10 408	880
23-08-25	276,0	1591	585	750	8,1	31,6	0,92	1,1	176	76	11 002	870

Fecha	Turbidez (NTU)	Bicarbonatos (mg/L)	Carbonatos (mg/L)	Dureza (ppm)	pH	CE (mS/cm)	Fe (ppm)	Mn (ppm)	Ca (ppm)	Mg (ppm)	Cloruros (ppm)	Sulfatos (ppm)
25-08-25	285,0	1853	195	750	8,06	28,7	0,62	0,9	156	67	9620	840
26-08-25	311,0	683	976	780	8,09	31,0	0,3	0,4	186	80	10 110	880
27-08-25	219,0	1480	420	770	8,09	27,9	0,57	0,8	179	71	9240	930
28-08-25	326,0	1560	390	760	8,06	29,6	0,1	0,7	170	70	9890	810
29-08-25	330,0	1268	390	780	8,07	31,7	0,2	0,5	290	80	10 407	860
30-08-25	397,0	1398	410	750	8,02	30,8	0,2	0,6	180	75	9840	990
01-09-25	352,0	878	780	720	8,08	30,9	0,97	2	198	68	10 650	840
02-09-25	347,0	1658	390	785	8,10	33,8	0,31	0,2	275	79	11 299	870
03-09-25	460,0	1853	390	690	8,17	32,1	0,63	0,5	281	77	10 414	900
04-09-25	526,0	1951	390	675	8,04	29,8	0,45	0,4	223	70	10 407	733
05-09-25	310,0	683	976	780	8,18	32,1	0,3	0,3	208	84	10 110	880
06-09-25	295,0	2048	585	795	8,06	32,1	0,46	2,8	240	68	11 597	667
08-09-25	412,0	1756	585	870	8,13	31,2	0,94	0,67	262	62	10 704	750
09-09-25	235,0	1366	976	750	8,08	29,8	0,45	0,4	220	66	11 300	840
10-09-25	279,0	1853	585	825	8,07	28,9	1,2	0,8	293	59	10 110	717
11-09-25	334,0	850	638	795	7,99	29,7	1,12	0,13	242	84	8779	800
12-09-25	300,0	1463	780	870	8,00	29,2	0,2	0,4	226	82	10 110	840
13-09-25	272,0	904	319	975	7,93	23,2	1,08	0,18	264	82	8029	750
15-09-25	321,0	1951	585	780	8,05	27,8	1,27	0,28	213	82	9416	650
16-09-25	210,0	1268	635	720	8,01	26,9	1,04	0,5	190	79	8624	840
17-09-25	210,0	1458	412	715	7,99	28,5	0,92	0,4	215	80	9125	714
18-09-25	210,0	1620	712	512	8,06	29,2	1,01	0,3	232	84	10 256	825
19-09-25	210,0	1347	518	745	8,10	28,9	0,89	0,2	262	68	9951	862
20-09-25	324,0	1750	380	770	8,1	29,6	0,9	0,7	170	70	9890	810
21-09-25	88,7	2633	780	810	8,04	30,1	0,78	0,5	286	60	10 110	567

Fecha	Turbidez (NTU)	Bicarbonatos (mg/L)	Carbonatos (mg/L)	Dureza (ppm)	pH	CE (mS/cm)	Fe (ppm)	Mn (ppm)	Ca (ppm)	Mg (ppm)	Cloruros (ppm)	Sulfatos (ppm)
22-09-25	206,0	2192	580	790	8,08	29,9	0,84	0,6	228	65	10 050	689
23-09-25	58,5	1756	390	855	8,06	26,1	0,32	0,5	280	64	9218	533
24-09-25	56,2	1658	975	750	8,06	29,2	0,51	1,3	235	70	9515	780
25-09-25	51,9	1756	585	975	8,02	30,6	0,48	2,3	310	56	10 407	683
26-09-25	215,0	1561	780	750	8,02	32,2	0,59	0,198	232	68	10 408	750
27-09-25	386,0	1658	780	840	8,04	31,1	0,58	0,9	279	44	12 489	867
29-09-25	361,0	1888	532	765	8,17	28,3	0,27	0,8	289	89	10 407	733
30-09-25	325,0	1756	780	825	8,29	28,9	0,74	0,46	231	51	9416	680

Nota. Los resultados corresponden a los análisis fisicoquímicos realizados en muestras de agua residual de ingreso a la planta de tratamiento durante el período de mayo a septiembre de 2025. Los análisis fueron efectuados en el laboratorio de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Interior Mina de la Unidad Minera Catalina Huanca.

Este análisis corresponde a la caracterización fisicoquímica del agua residual de interior de mina antes de ser tratada por el nuevo sistema de mezcla rápida y coagulación. Se analizaron 130 muestras durante el período de operación (mayo-septiembre de 2025) (tabla 6).

Tabla 6.

Análisis estadístico descriptivo del ingreso

Parámetro	N	Media	Desviación Estándar (DE)	Mínimo	Máximo
pH	130	8,01	0,09	7,73	8,29
Turbidez (NTU)	130	390,5	240,9	51,9	>1000

Nota. Fuente: Elaborado a partir de los datos de análisis de ingresos. Nota: Para el cálculo estadístico de la turbidez, los valores ">1000" se trataron como 1000.

Los resultados muestran que el agua de ingreso es consistentemente alcalina, con una media de 8,01. La desviación estándar (0,09) es muy baja, indicando una alta estabilidad en el pH de entrada.

En cuanto a la turbidez, el ingreso presenta una alta carga de sólidos y una extrema variabilidad. La turbidez media es de 390,5 NTU, pero la alta desviación estándar (240,9 NTU) muestra que el sistema recibe picos de turbidez muy elevados (superiores a 1000 NTU) y valles (51,9 NTU). Esta variabilidad es el principal desafío operativo que el sistema de mezcla rápida debe estabilizar.

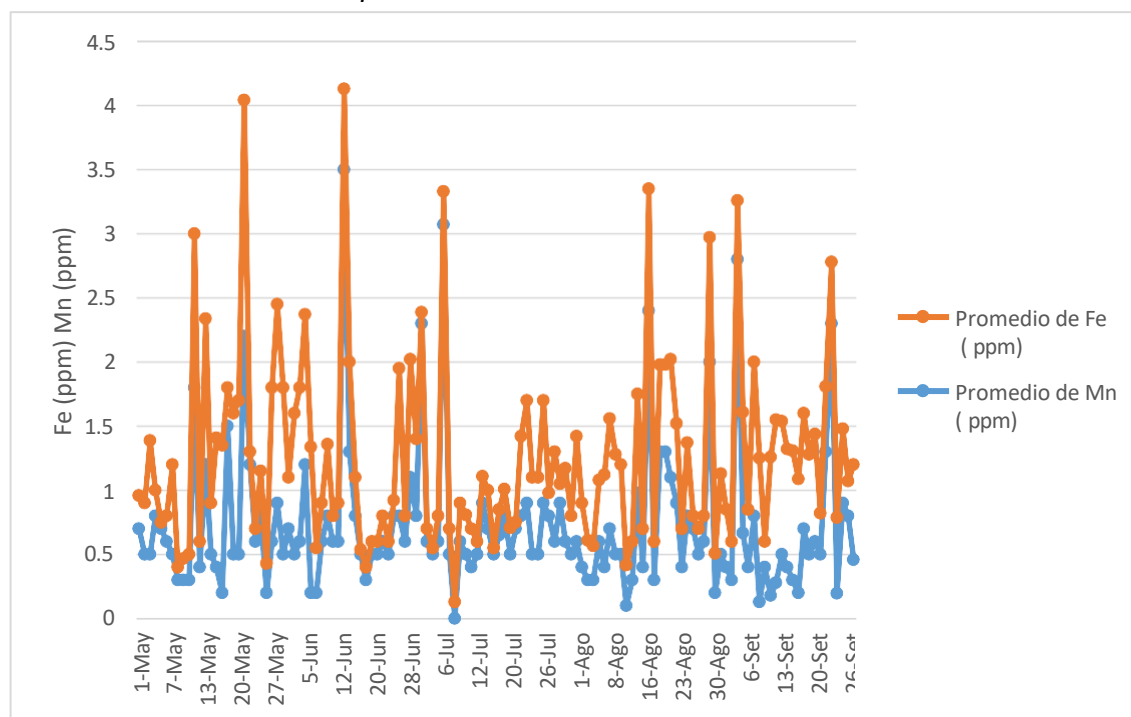
El análisis estadístico del agua residual de ingreso evidenció una alta variabilidad en la turbidez, con una desviación estándar de 240,9 NTU y valores máximos superiores a 1000 NTU. Esta condición representa un desafío crítico para cualquier sistema de coagulación, ya que las fluctuaciones abruptas en la carga de sólidos suelen generar inestabilidad operativa, sobredosificación de coagulante y baja eficiencia de remoción.

En contraste, el pH del agua de ingreso mostró una alta estabilidad (DE 0,09), manteniéndose alrededor de 8,01. Este comportamiento confirma que el principal problema del sistema previo no estaba asociado al control químico del pH, sino a la deficiente dispersión inicial del coagulante, atribuible a un sistema de mezcla rápida inadecuado o inexistente.

Estos resultados justifican plenamente la necesidad de implementar un sistema de mezcla rápida eficiente, capaz de absorber las variaciones extremas de turbidez sin comprometer la calidad del efluente tratado.

Figura 26.

Variación de la concentración de hierro (Fe) en el agua residual de ingreso a la PTAR de Interior Mina durante el periodo de evaluación



La Figura 26 muestra la evolución temporal de las concentraciones de hierro y manganeso presentes en el agua residual de ingreso. Ambos metales presentan una variabilidad significativa a lo largo del período de monitoreo, observándose concentraciones de hierro entre 0,04 y 2,33 ppm y de manganeso entre 0 y 7,7 ppm.

Los resultados evidencian que el hierro presentó una mayor estabilidad relativa, mientras que el manganeso registró eventos puntuales de alta concentración. Estas fluctuaciones son características de las aguas residuales mineras y constituyen un factor importante en el diseño y operación del sistema de tratamiento.

La presencia simultánea de hierro y manganeso, sumada a las elevadas concentraciones de turbidez registradas, justificó la implementación de un sistema de mezcla rápida capaz de garantizar una adecuada dispersión del coagulante y una eficiente remoción de contaminantes durante el proceso de tratamiento.

4.2 RESULTADOS DEL DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA

Tras la implementación del sistema de mezcla rápida, se observó una reducción drástica de la turbidez, alcanzando una media de 0,93 NTU y una desviación estándar

de solo 0,52 NTU. Este resultado demuestra que el sistema no solo es altamente eficiente, sino también extraordinariamente estable, incluso frente a un ingreso altamente variable.

La eficiencia promedio de remoción de turbidez del 99,76 % confirma que la nueva configuración hidráulica permite una dispersión inmediata y homogénea del coagulante, optimizando la desestabilización de partículas coloidales y favoreciendo la formación de micro flóculos desde las primeras etapas del proceso.

Desde el punto de vista operativo, la baja variabilidad de la turbidez de salida evidencia que el sistema de mezcla rápida actúa como un amortiguador hidráulico y químico, estabilizando el proceso aguas abajo y reduciendo la dependencia de ajustes constantes en la dosificación de reactivos.

A continuación, se muestra el cálculo de parámetros que definen el sistema de mezcla rápida:

Tabla 7.

Criterios de diseño del sistema de mezcla rápida

Parámetro Técnico/ Hidráulico	Símbolo	Valor Adoptado	Uds.	Justificación / Referencia
Caudal de Diseño (Promedio)	Q	0,035	m ³ /s	Análisis de datos de ingreso/Control de parámetros físicos
	B	0,5	m	Análisis de datos de ingreso/Control de parámetros físicos
	P	0,5	m	Análisis de datos de ingreso/Control de parámetros físicos
Viscosidad	μ	0,00112	Pa·s	Análisis de datos de ingreso/Control de parámetros físicos
Peso específico	γ	10 074,9	N/m ³	Análisis de datos de ingreso/Control de parámetros físicos
Gravedad	g	9,81	m/s ²	Análisis de datos de ingreso/Control de parámetros físicos

Parámetro Técnico/ Hidráulico	Símbolo	Valor Adoptado	Uds.	Justificación / Referencia
Caudal Unitario	q	0,07	m ² /s	$q = \frac{Q}{B}$
Profundidad Crítica	h_c	0,0793	m	$h_c = \left(\frac{q^2}{g}\right)^{1/3}$
Medición del Caudal		6,301 > 3	—	$\frac{P}{h_c}$
Profundidad Conjugada1	h_1	0,0291	m	$h_1 = \frac{\sqrt{2}h_c}{1,06 + \sqrt{\frac{P}{h_c}} + 0,5}$
Velocidad en la sección1	V_1	2,4038	m/s	$V_1 = \frac{q}{h_1}$
Número de Froude	F	4,5	—	$F = \frac{V_1}{\sqrt{g \cdot h_1}}$
Profundidad Conjugada2	h_2	0,1712	m	$h_2 = \frac{h_1}{2} (\sqrt{(1 + 8F^2)} - 1)$
Velocidad en la sección2	V_2	0,4088	m/s	$V_2 = \frac{q}{h_2}$
Pérdida de energía en el resalto	h	0,1439	m	$h = \frac{(h_2 - h_1)^3}{4 \cdot h_2 \cdot h_1}$
Longitud de resalto	L_j	0,8526	m	$L_j = 6 \cdot (h_2 - h_1)$
Velocidad media	V_m	1,4063	m/s	$V_m = \frac{V_1 + V_2}{2}$
Distancia del vertedero	L_m	0,4101	m	$L_m = 4,3P^{0,1}h_c^{0,9}$
Tiempo de mezcla rápida	t	0,6063	s	$t = \frac{L_j}{V_m}$

Parámetro Técnico/ Hidráulico	Símbolo	Valor Adoptado	Uds.	Justificación / Referencia
Gradiente de Velocidad	G	1 461,04	s^{-1}	$G = \sqrt{\frac{\gamma \cdot h}{\mu \cdot t}}$

El sistema de mezcla rápida fue diseñado basándose en el principio del Resalto Hidráulico provocado por un vertedero o una estructura de caída, lo cual se evidencia por el cálculo de parámetros como la Profundidad Crítica, las Profundidades Conjugadas y el Número de Froude.

Los parámetros de la Tabla 7 permiten establecer que el diseño cumple simultáneamente con dos criterios fundamentales de ingeniería:

- El criterio de eficiencia química (Gradiente de velocidad, G): Asegura la energía necesaria para la dispersión inmediata del coagulante.
- El criterio de eficiencia hidráulica (Número de Froude, F): Garantiza que la mezcla se produzca por la turbulencia del resalto, un método de bajo mantenimiento.

En detalle, los resultados del cálculo de los parámetros hidráulicos confirman el diseño óptimo para la mezcla rápida:

1. Rendimiento del resalto hidráulico (Número de Froude, F): $F = 4,5$

Dado que el valor 4,5 está en el rango $4,5 \leq 4,5 < 9$, el diseño genera un Resalto Oscilante o Fuerte (dependiendo del criterio exacto usado). Este tipo de resalto garantiza la intensidad turbulenta necesaria para la mezcla completa y violenta del coagulante en el agua.

2. Intensidad de mezcla (Gradiente de Velocidad, G): $G = 1\,461,04\, s^{-1}$

El valor calculado $1\,461,04\, s^{-1}$ cae dentro del rango de diseño óptimo sugerido por la teoría ($1\,000\, s^{-1} < G = 1\,461,04\, s^{-1} < 2\,000\, s^{-1}$). Este alto gradiente asegura la dispersión instantánea de las moléculas de coagulante (dispersión uniforme) y la desestabilización de las partículas de turbidez, cumpliendo el objetivo químico del proceso.

3. Tiempo de retención (t): $t = 0,6063\, s$

Este tiempo de contacto es extremadamente rápido (menos de 1 segundo), ideal para la mezcla instantánea requerida en la coagulación. Esto se logra gracias al resalto hidráulico que concentra la energía en una distancia muy corta.

4. Eficiencia Energética (Pérdida de energía, h): $h=0,1439<0,3$

El sistema está diseñado para operar con una pérdida de energía mínima (la energía se disipa en la mezcla y no se desperdicia), lo que resulta en una operación eficiente y sostenible al utilizar la propia energía hidráulica del flujo.

Los parámetros hidráulicos calculados (Número de Froude = 4,5; Gradiente de velocidad $G = 1\,461\text{ s}^{-1}$; Tiempo de mezcla = 0,606 s) se encuentran dentro de los rangos óptimos recomendados por la literatura técnica para sistemas de mezcla rápida.

El resalto hidráulico generado por el vertedero proporciona la energía necesaria para lograr una mezcla intensa en un tiempo extremadamente corto, sin requerir equipos mecánicos adicionales. Esto explica directamente la elevada eficiencia de remoción y la estabilidad observada en la turbidez de salida.

Asimismo, la baja pérdida de energía ($h = 0,1439\text{ m}$) demuestra que el sistema es energéticamente eficiente, aprovechando la energía del propio flujo, lo que resulta en una solución robusta, de bajo mantenimiento y adecuada para operaciones mineras.

4.3 EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE TURBIDEZ Y ESTABILIDAD

En esta investigación, la eficiencia del proceso fue evaluada mediante el análisis comparativo de la calidad del agua en los puntos de ingreso y salida de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Interior Mina, con el propósito de verificar el impacto de la implementación del sistema de mezcla rápida sobre la estabilidad operacional y la calidad del efluente tratado.

Tabla 8.*Resultados de monitoreo de la calidad del agua residual en la salida de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Interior Mina*

Fecha	Turbidez (NTU)	Bicarbonatos (mg/L)	Carbonatos (mg/L)	Dureza (ppm)	pH	CE (mS/cm)	Fe (ppm)	Mn (ppm)	Ca (ppm)	Mg (ppm)	Cloruros (ppm)	Sulfatos (ppm)
1-May-25	1,04	293	195	900	8,54	11,86	0,03	0,19	195	41	3448	800
2-May-25	1,59	0	171	630	8,51	28,80	0,1	0,12	191	61	9360	1760
3-May-25	1,04	0	390	790	8,41	17,05	0,04	0,12	170	40	5172	833
4-May-25	1,41	0	976	645	8,58	29,40	0,04	0,15	136	58	9644	1640
5-May-25	1,80	98	975	730	8,69	27,10	0,04	0,13	180	49	8621	1316
6-May-25	0,75	0	976	600	8,75	25,70	0,04	0,2	120	59	9620	1480
7-May-25	1,06	0	487	660	8,56	22,80	0,04	0,19	180	44	7471	867
8-May-25	1,98	195	585	585	8,58	21,01	0,04	0,14	116	52	6240	1280
9-May-25	1,46	390	390	540	8,48	20,15	0,04	0,15	294	86	6153	1160
10-May-25	1,63	205	595	600	8,56	24,50	0,04	0,16	118	61	6226	1440
11-May-25	1,88	780	585	570	8,63	23,00	0,04	0,15	160	48	7100	1240
12-May-25	0,99	215	585	765	8,68	17,85	0,04	0,13	130	57	6220	1200
13-May-25	2,66	686	392	540	8,61	22,70	0,04	0,13	160	69	6830	1320
14-May-25	0,70	0	585	795	8,71	25,30	0,04	0,17	180	66	7374	2120
15-May-25	1,87	107	780	600	8,56	24,00	0,04	0,18	196	58	8520	1580
16-May-25	1,15	585	390	675	8,45	27,90	0,04	0,11	209	48	9470	1660
17-May-25	1,18	390	585	600	8,52	29,40	0,04	0,12	215	57	9812	1760
19-May-25	1,92	580	560	670	8,39	28,20	0,01	0,11	210	50	9052	1668
20-May-25	2,48	420	566	590	8,54	14,59	0,01	0,2	169	48	5986	1740
21-May-25	1,20	0	585	600	8,50	23,80	0,11	0,18	252	74	8994	1440

Fecha	Turbidez (NTU)	Bicarbonatos (mg/L)	Carbonatos (mg/L)	Dureza (ppm)	pH	CE (mS/cm)	Fe (ppm)	Mn (ppm)	Ca (ppm)	Mg (ppm)	Cloruros (ppm)	Sulfatos (ppm)
22-May-25	1,15	292	585	705	8,56	22,80	0,18	0,14	195	53	8921	1083
23-May-25	1,19	0	780	765	8,50	17,93	0,1	0,17	165	60	5650	1600
24-May-25	1,49	585	195	660	8,52	25,20	0,18	0,1	110	35	8623	1240
26-May-25	1,38	0	97	705	8,80	13,85	0,18	0,18	126	55	4758	420
27-May-25	1,84	293	585	735	8,54	22,70	0,2	0,12	181	64	3866	1800
28-May-25	0,74	97	585	1170	8,65	23,70	0,07	0,1	308	71	8326	1660
29-May-25	0,87	0	195	645	8,61	4,94	0,1	0,19	180	63	1430	1680
30-May-25	0,92	96	348	736	8,54	7,51	0	0,12	242	51	1578	700
2-Jun-25	0,91	0	780	615	8,69	13,57	0,1	0,1	184	63	2379	1680
4-Jun-25	1,98	680	585	570	8,63	23,00	0,04	0,12	160	48	7100	1240
5-Jun-25	2,01	585	390	835	8,47	15,03	0,08	0,11	236	78	6030	1680
6-Jun-25	2,07	0	780	570	8,58	26,10	0,18	0,12	191	71	9632	1640
7-Jun-25	3,27	0	780	540	8,55	22,80	0,17	0,08	157	52	8047	1320
8-Jun-25	1,83	0	1366	600	8,38	25,40	0,13	0,08	203	34	8740	920
9-Jun-25	0,50	0	585	510	8,63	14,73	0,15	0,11	280	76	4733	680
11-Jun-25	1,91	0	350	580	8,89	20,56	0,1	0,09	160	48	6720	2200
12-Jun-25	0,64	0	638	690	8,67	18,67	0	0,08	191	53	7746	1200
14-Jun-25	0,50	0	780	930	8,59	15,50	0,07	0,08	264	45	5055	1100
16-Jun-25	1,03	0	195	735	8,90	14,67	0,05	0,07	225	39	3568	1230
17-Jun-25	0,92	293	976	645	8,49	28,40	0	0,09	144	58	9516	1400
18-Jun-25	0,68	0	390	1155	8,73	25,40	0	0,08	306	81	9218	1950
19-Jun-25	0,58	195	585	735	8,46	20,76	0	0,07	149	52	6840	1440
20-Jun-25	0,88	0	780	480	8,54	20,83	0,15	0,05	213	38	7100	1160

Fecha	Turbidez (NTU)	Bicarbonatos (mg/L)	Carbonatos (mg/L)	Dureza (ppm)	pH	CE (mS/cm)	Fe (ppm)	Mn (ppm)	Ca (ppm)	Mg (ppm)	Cloruros (ppm)	Sulfatos (ppm)
21-Jun-25	0,74	0	390	660	8,53	15,24	0	0,057	118	50	4758	1000
23-Jun-25	0,92	0	390	780	8,35	19,62	0,1	0,04	122	54	5558	1160
25-Jun-25	0,91	0	780	615	8,54	23,90	0,1	0,024	135	52	4014	1520
26-Jun-25	0,47	0	585	450	8,66	14,25	0,08	0,067	247	47	5207	920
27-Jun-25	1,10	390	195	490	8,50	14,00	0,1	0,06	209	48	4640	980
28-Jun-25	1,06	96	780	510	8,35	13,84	0,1	0,04	160	48	3984	1040
30-Jun-25	2,30	91	547	705	8,50	14,8	0,12	0,04	227	53	5105	950
1-Jul-25	0,75	98	390	585	8,46	14,7	0,09	0,05	167	44	4460	940
2-Jul-25	0,80	0	195	930	8,78	23,4	0,17	0,06	232	61	7952	1640
3-Jul-25	0,57	195	780	945	8,47	24,40	0,15	0,05	221	41	8333	1220
4-Jul-25	0,70	195	585	540	8,50	18,49	0,1	0,03	129	48	6244	1360
5-Jul-25	0,69	293	780	765	8,65	25,20	0,15	0,02	295	59	8921	875
6-Jul-25	0,67	195	585	645	8,56	18,14	0,2	0,02	125	46	6244	1160
7-Jul-25	0,76	195	780	705	8,56	22,30	0,17	0	268	48	7434	1260
8-Jul-25	0,64	0	780	780	8,51	22,30	0,1	0,02	146	61	7136	1440
9-Jul-25	0,62	0	98	960	8,60	19,37	0,08	0	334	50	6541	1280
10-Jul-25	0,34	0	585	510	8,58	11,65	0,1	0,03	150	64	4460	1160
11-Jul-25	1,05	97	585	820	8,41	23,80	0,21	0,03	230	58	6541	1300
12-Jul-25	0,50	0	780	720	8,43	20,98	0,2	0,03	150	59	7136	1520
14-Jul-25	1,56	0	780	735	8,33	15,86	0,1	0,02	160	66	5650	920
15-Jul-25	0,51	97	580	770	8,39	23,00	0,2	0,02	240	65	7580	1250
16-Jul-25	0,5	190	650	712	8,41	24,1	0,1	0,02	284	62	7485	980
17-Jul-25	0,67	0	585	615	8,56	11,63	0,07	0,05	210	56	3070	600

Fecha	Turbidez (NTU)	Bicarbonatos (mg/L)	Carbonatos (mg/L)	Dureza (ppm)	pH	CE (mS/cm)	Fe (ppm)	Mn (ppm)	Ca (ppm)	Mg (ppm)	Cloruros (ppm)	Sulfatos (ppm)
18-Jul-25	0,81	90	648	708	8,42	18,65	0,11	0,03	233	49	6540	1280
20-Jul-25	0,51	97	587	770	8,31	18,3	0,1	0,07	246	51	6430	1260
21-Jul-25	0,71	195	780	760	8,29	22,2	0,2	0,03	245	56	7536	1276
22-Jul-25	0,71	487	585	570	8,27	22,6	0,11	0,03	165	70	7136	1080
23-Jul-25	0,73	0	780	610	8,5	23,7	0,18	0,03	170	68	7434	1540
24-Jul-25	0,33	97	585	975	8,36	15,5	0,03	0,09	308	58	5055	1175
25-Jul-25	0,49	98	390	810	8,47	17,95	0	0,07	241	58	5352	1200
27-Jul-25	0,48	0	390	600	8,37	21,3	0	0,08	192	45	6839	1250
28-Jul-25	0,42	0	97	810	8,37	16,86	0,07	0,05	170	30	5649	1000
29-Jul-25	0,4	146	293	660	8,29	18,29	0	0,09	193	62	5352	1080
30-Jul-25	0,52	97	780	885	8,31	20,22	0,08	0,05	275	57	6244	1400
31-Jul-25	0,42	390	585	570	8,28	14,62	0,07	0,08	228	56	4758	1220
1-Ago-25	0,88	390	585	720	8,3	23,9	0,1	0,04	192	74	8624	1200
2-Ago-25	0,56	39	1171	585	8,25	29,5	0,18	0,07	138	68	10 110	1600
3-Ago-25	0,5	390	585	840	8,26	21,11	0,1	0,02	185	69	7136	1640
4-Ago-25	0,82	390	976	615	8,24	31,4	0,21	0,06	195	55	10 408	1560
5-Ago-25	0,7	390	780	645	8,23	30,1	0,1	0,07	180	70	10 408	1760
7-Ago-25	0,65	195	780	645	8,24	26,6	0,16	0,04	247	65	8036	1500
8-Ago-25	0,65	97	780	525	8,27	29,4	0,18	0,03	265	68	9515	1640
9-Ago-25	0,41	0	780	570	8,37	22,5	0,07	0,07	154	53	4724	1200
11-Ago-25	0,38	780	0	585	8,36	16,58	0,07	0,05	216	42	5196	950
13-Ago-25	0,66	0	585	675	8,45	24,7	0,13	0,05	177	44	8502	1550
14-Ago-25	0,47	390	585	525	8,26	20,53	0,06	0,02	278	39	6541	1200

Fecha	Turbidez (NTU)	Bicarbonatos (mg/L)	Carbonatos (mg/L)	Dureza (ppm)	pH	CE (mS/cm)	Fe (ppm)	Mn (ppm)	Ca (ppm)	Mg (ppm)	Cloruros (ppm)	Sulfatos (ppm)
15-Ago-25	0,42	293	585	810	8,19	19,46	0,2	0,09	105	46	6542	1360
16-Ago-25	0,57	390	780	705	8,29	26,0	0,08	0,084	222	42	8623	1420
17-Ago-25	0,73	0	976	840	8,18	23,2	0,1	0,08	104	48	7732	1400
18-Ago-25	0,43	293	390	615	8,21	23,4	0,08	0,05	258	41	7731	1233
19-Ago-25	0,56	98	585	675	8,28	24,4	0,2	0,04	210	46	8028	1440
20-Ago-25	0,61	292	390	795	8,37	25,3	0,1	0,074	116	50	8921	1533
22-Ago-25	0,9	0	585	675	8,26	26,6	0,1	0,074	112	55	8624	1680
23-Ago-25	0,96	0	780	637	8,40	29,8	0,17	0,05	128	61	9784	1100
25-Ago-25	0,83	390	195	540	8,28	21,6	0,09	0,06	240	65	8082	880
26-Ago-25	0,7	0	585	675	8,28	28,6	0,1	0,09	124	64	9516	1680
27-Ago-25	1,23	97	580	580	8,42	24,6	0,1	0,04	165	70	7868	1620
28-Ago-25	0,71	195	780	760	8,29	22,2	0,2	0,05	168	65	7563	1480
29-Ago-25	0,82	292	585	562	8,33	30,8	0,12	0,03	275	75	10 110	1540
30-Ago-25	0,82	97	580	510	8,34	24,2	0,18	0,05	156	62	7650	880
1-Set-25	0,84	97	390	540	8,35	17,8	0,08	0,05	139	62	5964	800
2-Set-25	0,74	292	390	630	8,42	14,1	0,15	0,05	259	69	4163	1220
3-Set-25	0,57	292	585	450	8,35	23,5	0,12	0,06	185	65	7574	1000
4-Set-25	1,14	292	585	690	8,39	16,6	0,09	0,06	258	52	5352	973
5-Set-25	0,79	292	585	585	8,38	13,8	0,2	0,02	120	64	9516	1360
6-Set-25	0,62	195	780	720	8,31	22,5	0,13	0,07	210	50	8028	1267
8-Set-25	0,43	586	390	765	8,37	17,7	0,07	0,06	254	52	5649	947
9-Set-25	0,61	98	780	660	8,41	17,9	0,07	0,04	210	60	6542	1480
10-Set-25	0,63	196	780	825	8,42	26,1	0,15	0,03	274	70	8921	1467

Fecha	Turbidez (NTU)	Bicarbonatos (mg/L)	Carbonatos (mg/L)	Dureza (ppm)	pH	CE (mS/cm)	Fe (ppm)	Mn (ppm)	Ca (ppm)	Mg (ppm)	Cloruros (ppm)	Sulfatos (ppm)
11-Set-25	0,53	106	425	680	8,29	28,1	0,15	0	280	59	8218	1500
12-Set-25	0,56	98	780	750	8,36	18,6	0,1	0,03	260	66	6542	1200
13-Set-25	0,77	53	425	810	8,33	22,4	0,11	0	247	62	7434	1450
15-Set-25	0,78	0	970	660	8,57	15,93	0,1	0	203	69	4956	1000
16-Set-25	0,68	0	976	810	8,28	26,50	0,07	0	118	42	8920	1760
17-Set-25	0,74	292	390	630	8,42	14,06	0,15	0,03	259	69	4163	1220
18-Set-25	0,71	195	780	760	8,29	22,20	0,2	0,05	168	65	7563	1480
19-Set-25	0,75	215	795	680	8,30	17,90	0,18	0,06	152	69	8950	1390
20-Set-25	0,63	196	780	825	8,41	19,00	0,1	0,05	215	65	8975	1350
21-Set-25	0,92	488	585	605	8,38	25,50	0,23	0,07	262	46	8695	1360
22-Set-25	0,78	342	682	715	8,40	26,20	0,18	0,04	2,45	55	8795	1290
23-Set-25	1,01	293	585	675	8,53	23,40	0,22	0,09	275	53	8326	1233
24-Set-25	0,67	292	780	675	8,66	23,20	0,17	0,08	260	57	7434	1300
25-Set-25	0,59	195	195	825	8,48	14,54	0,14	0,08	244	40	4757	933
26-Set-25	0,93	0	1171	705	8,41	29,40	0,25	0,07	225	59	9416	1640
27-Set-25	0,93	195	780	600	8,44	29,80	0,17	0,08	228	37	11 299	1467
29-Set-25	0,79	375	780	600	8,66	27,20	0,1	0,04	225	38	8921	1466
30-Set-25	0,64	0	780	570	8,48	26,70	0,08	0,05	225	36	8425	1400

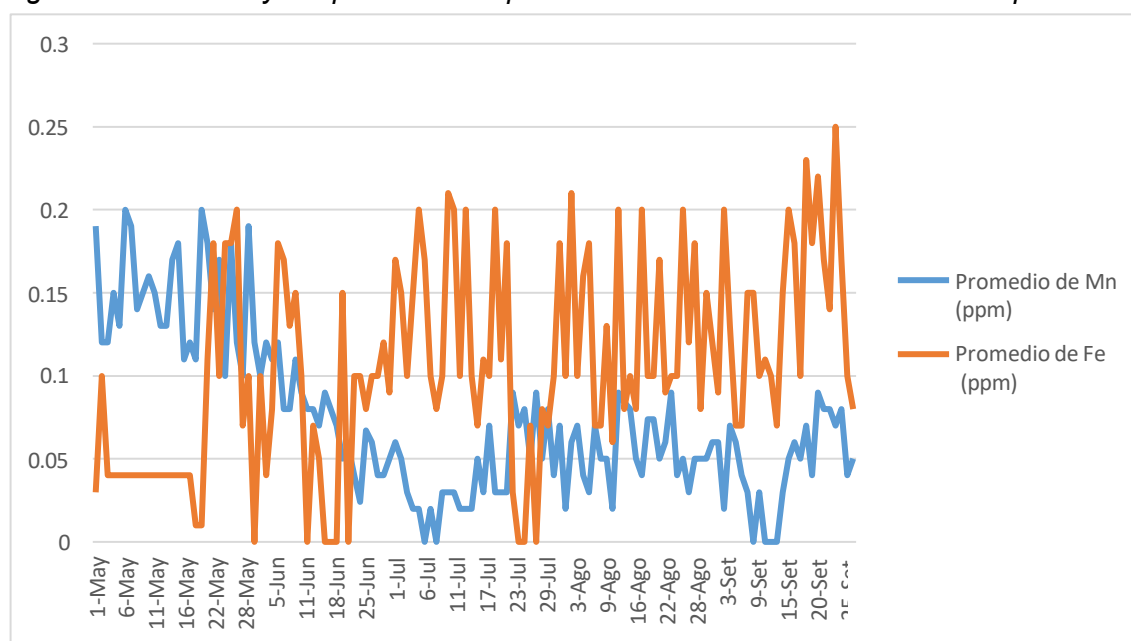
Nota. La tabla presenta los resultados de los análisis de turbidez, pH, conductividad eléctrica, hierro, manganeso, alcalinidad, dureza, calcio, magnesio, cloruros, sulfatos del agua residual. Los ensayos fueron realizados en el laboratorio de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la Unidad Minera Catalina Huanca durante el período mayo–septiembre de 2025.

4.3.1 Resultados de la remoción de hierro y manganeso

Con la finalidad de analizar el comportamiento de estos parámetros, se realizó el seguimiento de los resultados obtenidos en el agua tratada durante el período comprendido entre mayo y septiembre de 2025. Asimismo, se consideró como punto de referencia la puesta en marcha del sistema de mezcla rápida el 09 de junio de 2025, permitiendo comparar el desempeño del proceso antes y después de su implementación.

Figura 27.

Variación temporal de las concentraciones de hierro (Fe) y manganeso (Mn) en el agua tratada antes y después de la implementación del sistema de mezcla rápida



Nota. La línea vertical indica la fecha de puesta en marcha del sistema de mezcla rápida (09 de junio de 2025) en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Interior Mina de la Unidad Minera Catalina Huanca.

La Figura 27 presenta la evolución temporal de las concentraciones de hierro (Fe) y manganeso (Mn) en el agua tratada de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Interior Mina durante el período comprendido entre mayo y septiembre de 2025. Los resultados muestran que ambos parámetros mantuvieron concentraciones relativamente bajas a lo largo del período de evaluación, evidenciando la capacidad del sistema para remover metales presentes en el agua residual.

En el caso del **hierro (Fe)**, las concentraciones oscilaron aproximadamente entre 0,00 y 0,25 ppm, observándose una variabilidad moderada asociada a las fluctuaciones de calidad del agua de ingreso. A partir de la implementación del sistema de mezcla rápida, las concentraciones se mantuvieron dentro de rangos controlados, predominando valores cercanos a 0,10 ppm. Esto indica que la dispersión homogénea del coagulante favoreció la formación de flóculos más eficientes para la remoción de compuestos férricos.

Por otro lado, el **manganeso (Mn)** presentó concentraciones comprendidas principalmente entre 0,00 y 0,20 ppm. Si bien se registraron algunos incrementos puntuales, la mayoría de los resultados se mantuvieron por debajo de 0,10 ppm, reflejando una adecuada eficiencia de remoción durante el proceso de tratamiento. Asimismo, se observa una menor dispersión de los datos después de la puesta en marcha del sistema de mezcla rápida, evidenciando una mejora en la estabilidad operacional del proceso.

La comparación de ambos parámetros permite identificar que el hierro presentó una variabilidad ligeramente superior respecto al manganeso, comportamiento atribuible a las fluctuaciones propias de las aguas residuales de origen minero y a los mecanismos de precipitación asociados a este metal. Sin embargo, en ambos casos las concentraciones finales permanecieron en niveles bajos y relativamente constantes.

En términos generales, los resultados demuestran que la implementación del sistema de mezcla rápida contribuyó a mejorar la eficiencia de coagulación y la estabilidad del tratamiento, permitiendo mantener concentraciones reducidas de hierro y manganeso en el efluente tratado, aun cuando las características del agua de ingreso presentaron variaciones significativas durante el período de estudio.

4.3.2 Resultados de turbidez postest

Este análisis presenta los resultados del agua después de pasar por el sistema de mezcla rápida diseñado y puesto en marcha. Se analizaron 130 muestras correspondientes al mismo período operacional (Tabla 8).

Tabla 9.*Análisis estadístico descriptivo de la salida*

Parámetro	N	Media	Desviación Estándar (DE)	Mínimo	Máximo
pH	130	8,46	0,15	8,18	8,90
Turbidez (NTU)	130	0,93	0,52	0,33	3,27

Nota. Fuente: Elaborado a partir de los datos de análisis de salida.

Los resultados muestran que la salida mantiene una estabilidad alta (DE 0,15), con una media de 8,46. El ligero aumento respecto al ingreso (8,01) es un resultado esperado del proceso de coagulación-floculación.

En cuanto a la turbidez, se observa una reducción drástica y una estabilización excepcional. La turbidez media de la salida es de solo 0,93 NTU, con una desviación estándar mínima (0,52 NTU). El valor máximo registrado (3,27 NTU) se mantiene muy por debajo de la media de ingreso (390,5 NTU).

La eficiencia del sistema se calcula utilizando el método de cálculo de porcentaje de remoción, comparando la turbidez media de entrada con la turbidez media de salida.

Turbidez media de entrada: 390,5 NTU

Turbidez media de salida: 0,93 NTU

$$\text{Porcentaje de remoción} = \left(\frac{\text{turbidez}_{\text{entrada}} - \text{turbidez}_{\text{salida}}}{\text{turbidez}_{\text{entrada}}} \right) \times 100$$

$$\text{Porcentaje de remoción} = \left(\frac{390,5 - 0,93}{390,5} \right) \times 100 = 99,76\%$$

La implementación del sistema de mezcla rápida ha resultado en una eficiencia promedio de remoción de turbidez del 99,76 %.

4.3.3 Estabilidad del proceso

La estabilidad del proceso, uno de los objetivos clave, se evalúa comparando la variabilidad (medida por la desviación estándar DE) de la turbidez en el ingreso versus la salida.

DE al ingreso: 240,9 NTU

DE a la salida: 0,52 NTU

El sistema de mezcla rápida demuestra una capacidad de estabilización superior. A pesar de enfrentar una variabilidad extrema en el ingreso (DE 240,9), entrega una salida con variabilidad mínima (DE 0,52). El sistema absorbe exitosamente los picos de turbidez, garantizando una calidad de agua constante y estable a la salida.

Uno de los aportes más relevantes del sistema implementado es la estabilidad del proceso de tratamiento, evaluada mediante la comparación de la desviación estándar de la turbidez antes y después del sistema.

Mientras que el agua de ingreso presentó una variabilidad extrema (DE = 240,9 NTU), la salida mantuvo una variabilidad mínima (DE = 0,52 NTU). Esta diferencia evidencia que el sistema de mezcla rápida cumple eficazmente su función de absorber picos de carga contaminante, entregando una calidad de agua constante y predecible.

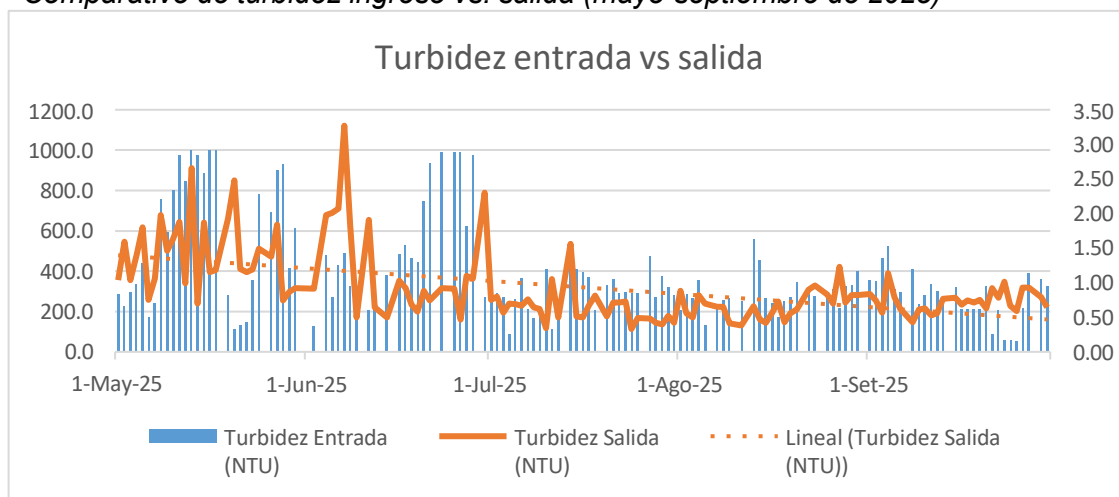
Este comportamiento es coherente con la teoría de la coagulación, que establece que una mezcla rápida eficiente es crítica para evitar zonas muertas, cortocircuitos hidráulicos y sobredosificación, problemas comúnmente asociados a sistemas de mezcla deficiente.

4.3.4 Interpretación gráfica de turbidez de ingreso vs. salida

A continuación, se muestran los resultados para visualizar el impacto y la estabilidad del sistema, mediante un gráfico combinado que compara la turbidez del ingreso y de la salida a lo largo del tiempo (Figura 28).

Figura 28.

Comparativo de turbidez ingreso vs. salida (mayo-septiembre de 2025)

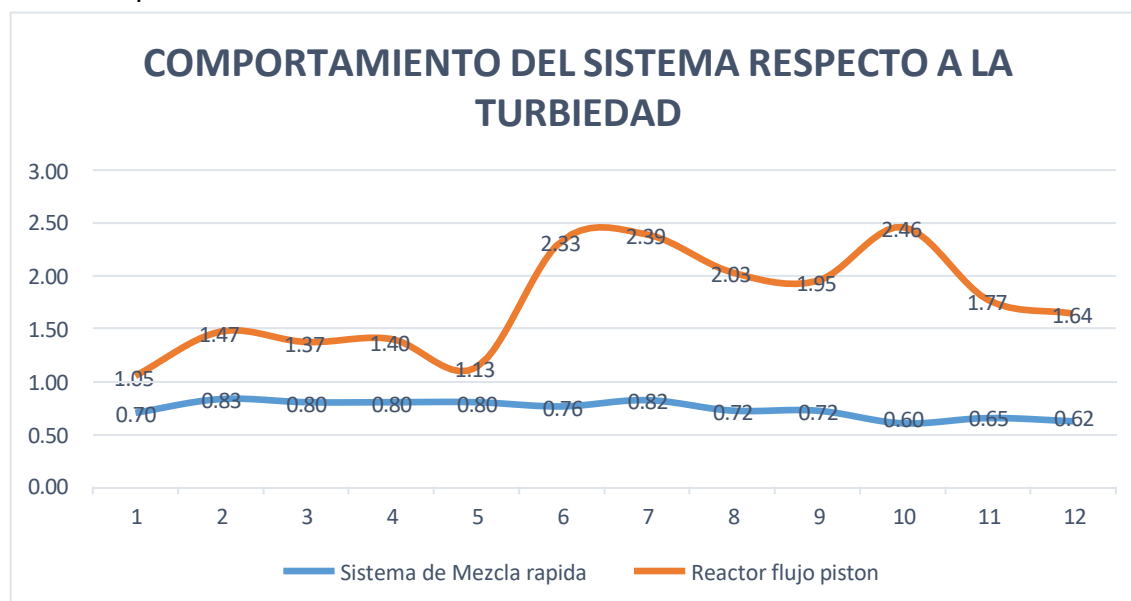


Nota. Fuente: Elaborado a partir de los datos de análisis de ingresos y egresos de turbidez. Nota: Eje izquierdo muestra la turbidez entrada y el eje derecho turbidez salida.

El gráfico muestra la turbidez del ingreso como barras con alta variabilidad y picos frecuentes. En contraste, la turbidez de la salida se muestra una línea casi plana muy cercana a cero (tendencia a cero), demostrando gráficamente la eficiencia y estabilidad del sistema.

Figura 29.

Comparación de la turbidez antes y después de la implementación del sistema de mezcla rápida



Nota. Fuente: Elaborado en base a datos obtenidos antes y después del sistema nuevo.

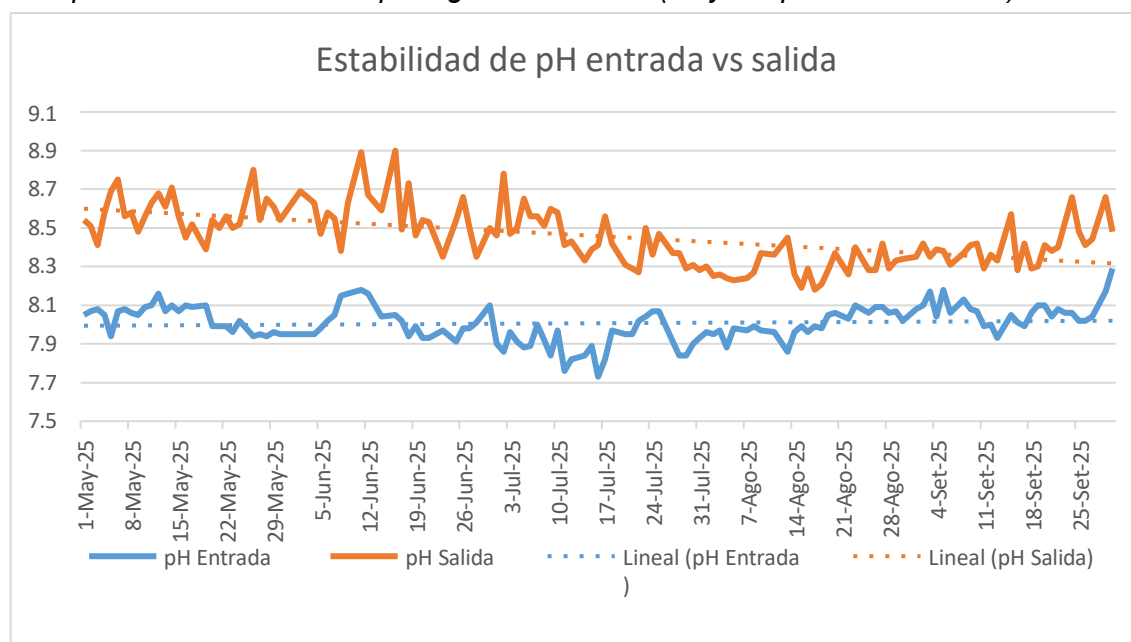
En la Figura 29 se presenta la comparación de los valores de turbidez obtenidos en el sistema de tratamiento de aguas residuales del interior mina antes y después de la implementación del sistema de mezcla rápida, con el fin de evaluar el impacto de la nueva configuración hidráulica sobre la eficiencia del proceso de coagulación, donde se observa notablemente la mejora en turbidez y en la estabilización del proceso de tratamiento.

4.3.5 Interpretación gráfica de pH de ingreso vs. salida

A continuación, se muestra un gráfico de la evolución del pH, un parámetro crítico para la eficiencia del proceso de coagulación (Figura 30).

Figura 30.

Comparativa estabilidad del pH ingreso vs. salida (mayo-septiembre de 2025)



Nota. Fuente: Elaborado a partir de los datos de análisis de ingresos y egresos de pH.

A diferencia del gráfico de turbidez (donde una entrada altamente variable se transforma en una salida estable), el análisis del pH muestra un escenario de control y consistencia:

- La línea de pH de entrada se visualiza estable y oscila alrededor de su media de 8,01, en concordancia con la desviación estándar de 0,09 presentada en la Tabla 6.
- La línea de pH salida también se muestra muy estable. Se sitúa de forma casi paralela y consistente por encima de la línea de entrada, alrededor de su media de 8,46.

Se demuestra que el nuevo sistema de mezcla rápida y el proceso de coagulación asociado no introducen inestabilidad en el pH. El sistema eleva el pH de forma controlada y predecible (un incremento promedio de 0,45 unidades). Esta estabilidad es crucial para optimizar la dosificación de coagulantes y asegurar que la salida se mantenga dentro de los rangos operativos esperados (rango de 6,5 – 8,5).

4.4 DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos confirman que el comportamiento hidráulico de la mezcla rápida es determinante para la eficiencia de la coagulación. El sistema implementado alcanzó un número de Froude de 4,5, un gradiente de velocidad de $1\,461\text{ s}^{-1}$ y un tiempo de mezcla de 0,606 s, parámetros que permitieron una dispersión rápida del coagulante. Este comportamiento es concordante con el antecedente de Gonzalez Gonzalez Villamil (2021), quien identificó al número de Froude y al gradiente de velocidad como parámetros críticos para el adecuado funcionamiento de las unidades de mezcla rápida y floculación.

La reducción de la turbidez del efluente hasta una media de 0,93 NTU y una desviación estándar de 0,52 NTU evidencia, además de una alta eficiencia de remoción, una mayor estabilidad operativa. Este resultado guarda relación con lo señalado por Loayza Aguilar (2020), cuyo prototipo de tratamiento incorporó una etapa de mezcla rápida como parte del proceso de coagulación, floculación, sedimentación y filtración para disminuir la turbidez del agua.

Asimismo, la estabilidad observada en el pH y las bajas concentraciones de hierro y manganeso después de la intervención muestran que la mejora hidráulica de la mezcla rápida no generó una alteración desfavorable del proceso químico. En el contexto de la misma unidad minera, Cusi (2021) demostró que la optimización de condiciones operativas puede reducir el consumo de reactivos sin comprometer la eficiencia del tratamiento, lo que refuerza la importancia del control de las variables del proceso.

En conjunto, la comparación entre las condiciones anteriores y posteriores a la implementación respalda la hipótesis general de la investigación. La mejora obtenida no se limita al porcentaje de remoción de turbidez, sino que se expresa también en una menor variabilidad del efluente tratado y en condiciones más estables para las etapas posteriores del tratamiento. Por tanto, el sistema de mezcla rápida basado en resalto hidráulico constituye una alternativa técnicamente viable para la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Interior Mina de la Unidad Minera Catalina Huanca.

CONCLUSIONES

- Se determinaron las características fisicoquímicas del agua residual de interior mina, identificándose una turbidez promedio de 240,9 NTU, con valores superiores a 1000 NTU, además de elevadas concentraciones de sales disueltas y presencia de hierro y manganeso con máximos de 2,33 ppm y 7,7 ppm, respectivamente. Estos resultados permitieron establecer los criterios técnicos necesarios para el diseño del sistema de mezcla rápida.

- Se diseñó un sistema de mezcla rápida basado en resalto hidráulico a partir de los resultados obtenidos en las pruebas de jarras, las cuales permitieron determinar experimentalmente una velocidad óptima de mezcla de 280 RPM, equivalente a un gradiente de velocidad aproximado de $1\,400\text{ s}^{-1}$. Con base en este criterio se desarrolló el diseño hidráulico del sistema, obteniéndose un Número de Froude de 4,5, un gradiente de velocidad de $1\,461\text{ s}^{-1}$ y un tiempo de mezcla de 0,606 s. La cercanía entre el gradiente experimental y el gradiente de diseño confirmó la validez de los parámetros adoptados, por lo que se procedió a la construcción e implementación del sistema de mezcla rápida, garantizando una adecuada dispersión del coagulante y condiciones favorables para el proceso de coagulación-floculación.

- Se implementó y puso en marcha el sistema de mezcla rápida mediante una estructura metálica revestida con pintura epóxica, incorporándola antes del reactor de flujo pistón (RFP) e integrándola adecuadamente a la línea de tratamiento existente. Asimismo, la dosificación de sulfato férrico fue reubicada a la nueva unidad de mezcla rápida, permitiendo una dispersión más eficiente del coagulante antes del ingreso al RFP. Esta modificación se realizó sin afectar la continuidad operativa de las etapas posteriores del proceso, conformadas por la adición de lechada de cal, dosificación de floculante, sedimentación, oxidación y filtración. Como resultado, se logró optimizar significativamente las condiciones de coagulación-floculación y mejorar el desempeño global del sistema de tratamiento de aguas residuales de interior mina.

- La implementación del sistema permitió alcanzar una eficiencia promedio de remoción de turbidez de **99,76 %**, reduciendo la variabilidad del proceso y obteniendo una desviación estándar de **0,52 NTU** en el efluente tratado. Asimismo, las concentraciones de hierro y manganeso se mantuvieron generalmente por debajo de

0,20 ppm y 0,10 ppm, respectivamente, evidenciando una mejora en la estabilidad operacional y en la calidad del agua tratada.

- Se concluye que el diseño e implementación del sistema de mezcla rápida mejoró significativamente la eficiencia de remoción de turbidez, metales y la estabilidad del proceso de tratamiento, optimizando la dispersión del coagulante y favoreciendo la remoción de sólidos suspendidos y metales presentes en el agua residual. Los resultados obtenidos demuestran la viabilidad técnica y la efectividad del sistema para mejorar el desempeño de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Interior Mina de la Minera Catalina Huanca.

RECOMENDACIONES

Implementar un sistema de monitoreo continuo de turbidez en la entrada y salida del sistema de mezcla rápida, con el fin de optimizar en tiempo real la dosificación del coagulante.

Analizar la automatización de la dosificación de sulfato férrico, conectando la señal de turbidez de entrada al sistema de control, para optimizar la eficiencia química y minimizar el uso de reactivos.

Realizar inspecciones periódicas del vertedero y de las superficies revestidas con pintura epóxica, a fin de asegurar condiciones hidráulicas óptimas y prevenir pérdidas de eficiencia por desgaste o incrustaciones.

Capacitar de forma continua al personal operador en los principios de funcionamiento hidráulico del sistema de mezcla rápida, fortaleciendo la toma de decisiones operativas ante cambios en la calidad del agua de ingreso.

Replicar el diseño del sistema de mezcla rápida en otras unidades o plantas de tratamiento de la minera, adaptando los parámetros hidráulicos a los caudales específicos de cada operación.

Desarrollar estudios complementarios que evalúen el impacto del sistema en la reducción del consumo de reactivos y generación de lodos, con el fin de cuantificar beneficios económicos y ambientales a largo plazo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alfaro, M. A. (2024). *Planta de tratamiento de aguas residuales municipales de la ciudad de Juliaca—Puno* [Tesis de licenciatura, Universidad ESAN]. Repositorio Institucional ESAN. <https://hdl.handle.net/20.500.12640/4199>
- Arcila, C. C., Correa, G., & Arango, Á. (2024). *Remoción de turbidez en el proceso de potabilización del agua utilizando Moringa oleífera y Opuntia ficus-indica*. *Producción + Limpia*, 19(1). <https://doi.org/10.22507/pml.v19n1a4>
- Arellano, M. A. (2018). *El agua en la naturaleza*. <https://doi.org/10.7476/9789978108208.0002>
- Bejarano, J. C., Poveda, J. D., & Ospitia, J. F. (2022). Optimización del tratamiento de agua para consumo humano en la inspección de policía de Cambao del municipio de San Juan de Rioseco, Cundinamarca, Colombia. *Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería ACOFI 2022*. <https://doi.org/10.26507/paper.2402>
- Cabrera, J. J.-E. (2022). Eficiencia de remoción e impacto del sistema de tratamiento de aguas residuales del sector urbano y rural de la provincia de Santa Elena. *Manglar*, 19(2). <https://doi.org/10.17268/manglar.2022.022>
- Catalina Huanca Sociedad Minera S.A.C. (2017). Informe Técnico Sustentatorio de la “Ampliación, Reubicación y Modificación de Componentes Auxiliares en La Zona Planta y Zona Mina de La Unidad Minera Catalina Huanca”. Ministerio de Energía y Minas (MINEM); Dirección General de Asuntos Ambientales Mineros (DGAAM).
- Cusi, N. (2021). *Optimización de consumo de cal en el tratamiento de agua de mina por inyección de aire en la Unidad Minera Catalina Huanca* [Tesis, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga].
- Gonzalez Villamil, O. F. (2021). *Evaluación hidráulica de los procesos de mezcla rápida y floculación de la planta de tratamiento de agua potable del municipio de Tocaima—Cundinamarca* [Trabajo de grado, Universidad Piloto de Colombia]. Repositorio Institucional Universidad Piloto de Colombia. <http://repository.unipiloto.edu.co/handle/20500.12277/10078>
- Herrera, L. I., & Torres, G. C. (2022). *Simulación de un proceso de tratamiento de agua residual en el programa DWSIM, para efluentes mineros en el cantón Portovelo* [Tesis de licenciatura, Universidad Técnica de Machala]. Repositorio

- Institucional de la Universidad Técnica de Machala.
<http://repositorio.utmachala.edu.ec/handle/48000/21149>
- Ibañez, C. (2024). Coagulación y floculación en el tratamiento de aguas residuales. SIGMADAF.
<https://sigmadafclarifiers.com/la-coagulacion-y-la-floculacion-en-el-tratamiento-de-separacion-de-materia-coloidal-en-los-vertidos/>
- Loayza Aguilar, N. L. (2020). Diseño, construcción y evaluación de un prototipo de tratamiento de agua para su potabilización a nivel planta piloto [Tesis, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga].
https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UNSJ_8dbca79e64656a04e0e3c99ec22a962f
- Meléndez, L. J. (2023). Propuesta de optimización del sistema de tratamiento de efluentes ácidos de la Compañía Minera La Arena S. A., La Libertad, Perú [Tesis, Escuela de Posgrado Newman].
<https://repositorio.epnewman.edu.pe/handle/20.500.12892/714>
- Ministerio del Ambiente. (2010, 23 de agosto). Decreto Supremo N.° 010-2010-MINAM: Aprueban Límites Máximos Permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero-metalúrgicas.
<https://www.gob.pe/institucion/minam/normas-legales/317458-010-2010-minam>
- Ministerio de Salud. (2010, 26 de setiembre). Decreto Supremo N.° 031-2010-SA: Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano.
<https://www.gob.pe/institucion/minsa/normas-legales/244805-031-2010-sa>
- Organización Mundial de la Salud. (2023, 28 de agosto). Agua para consumo humano.
<https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>
- Osorio Churque, Y. T., & Solano Martínez, M. D. (2023). *Diseño del sistema de tratamiento de agua residual del municipio de Paz de Río, Boyacá* [Trabajo de grado de pregrado, Universidad de Boyacá]. Repositorio Institucional Universidad de Boyacá.
<https://repositorio.uniboyaca.edu.co/entities/publication/1c82e90b-aaaa-4dec-bbbb-4d2b0a19d495>
- Ozun, S. (2024). Enhanced implications on turbidity removal from natural stone wastewater by binary mixtures. *Journal of water Process Engineering*

- Pérez, F. J., & Urrea, M. A. (2018). Coagulación y floculación. Universidad Politécnica de Cartagena.
- Rodríguez, L. G. (2020). El proceso de tratamiento de aguas residuales y eliminación de contaminantes emergentes. iAgua. <https://www.iagua.es/blogs/lander-rodriguez-jorge/proceso-tratamiento-aguas-residuales-y-eliminacion-contaminantes>.
- Romero Rojas, J. (1999). Potabilización del agua (3.^a ed.). Alfaomega.
- Santiago Muíño, E. (2023). Contra el mito del colapso ecológico. Ediciones Akal.
- Tech, G. W. (2016). Introducción al tratamiento de aguas residuales mineras: La guía general. Genesis Water Technologies. <https://es.genesiswatertech.com/entrada-en-el-blog/Introducci%C3%B3n-a-la-gu%C3%ADa-general-de-tratamiento-de-aguas-residuales-mineras/>
- Tipán, E., Carrillo, J. M., Castillo, L. G., & García, J. T. (2025). Análisis de la superficie libre de un resalto hidráulico usando una cámara de profundidad. <https://doi.org/10.4995/ia.2025.23207>
- Vera, M. J., Giler, J. M., Patiño, K. A., & Alcívar, F. E. (2024). Calidad del agua potable y funcionamiento de su red de distribución: Un análisis de caso en Ecuador. *Revista Científica*.
- Villalta, D. W. (2021). Mejoramiento de las PTAR de uso minero usando un sistema integrado de clarificación de agua de 3 procesos, mina Coimolache—Cajamarca [Tesis de licenciatura, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/658767>
- Winckler, P., Arteaga, M., Fadic, X., Almar, R., Cienfuegos, R., & Marín, V. (2021). Guía para el modelado de la hidrodinámica y del proceso de mezcla de descargas salinas y térmicas asociadas a proyectos de plantas termoeléctricas y desalinizadoras. Dirección de Intereses Marítimos y Medio Ambiente Acuático (DIRINMAR). *researchgate.net*

GLOSARIO

Coagulación: Proceso de desestabilización de partículas coloidales mediante la adición de un coagulante que neutraliza o reduce las fuerzas de repulsión entre partículas.

Floculación: Etapa posterior a la coagulación en la que las partículas desestabilizadas se agrupan para formar flóculos de mayor tamaño.

Gradiente de velocidad: Parámetro que representa la intensidad de agitación aplicada al agua durante el proceso de mezcla.

Mezcla rápida: Etapa del tratamiento destinada a dispersar el coagulante de manera uniforme en un tiempo corto.

Número de Froude: Parámetro adimensional que relaciona las fuerzas de inercia y gravedad y permite caracterizar el régimen del flujo.

Resalto hidráulico: Transición brusca de un flujo supercrítico a uno subcrítico, acompañada de una elevada disipación de energía y turbulencia.

Turbidez: Propiedad óptica del agua asociada a la presencia de partículas suspendidas que dispersan la luz.

Remoción de turbidez: Reducción de la turbidez entre el agua de ingreso y el efluente tratado, expresada como porcentaje.

ANEXOS

Figura 31.

Plano para la construcción de la mezcla rápida (vertedero rectangular)

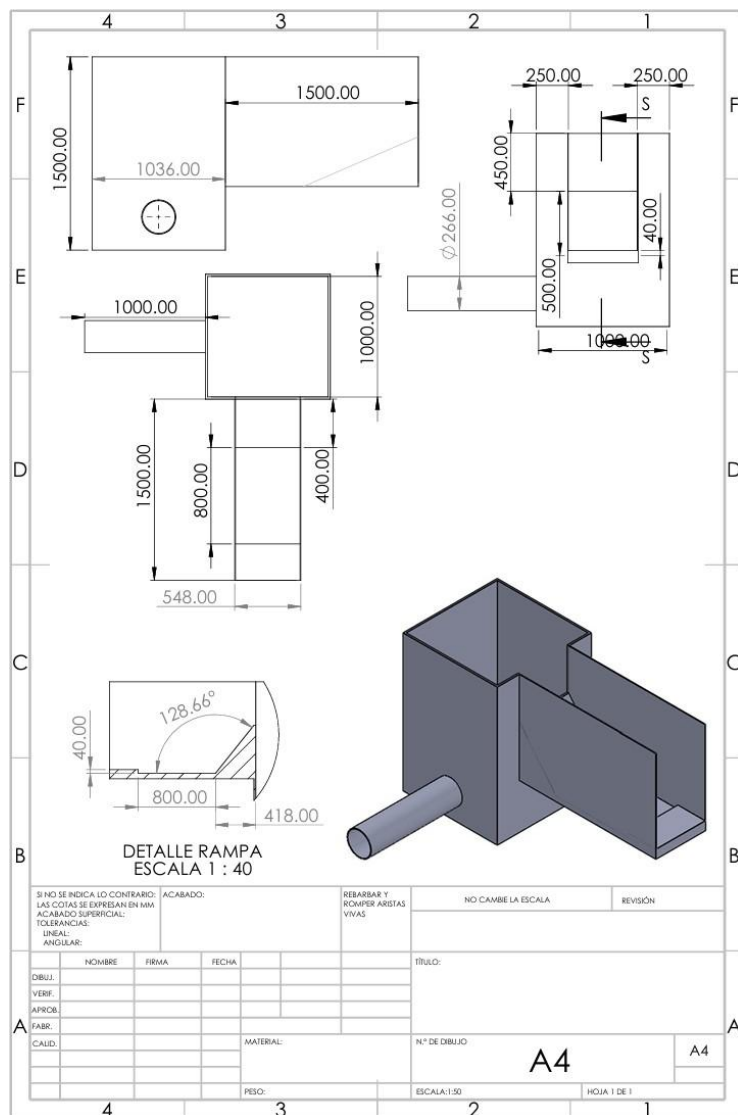
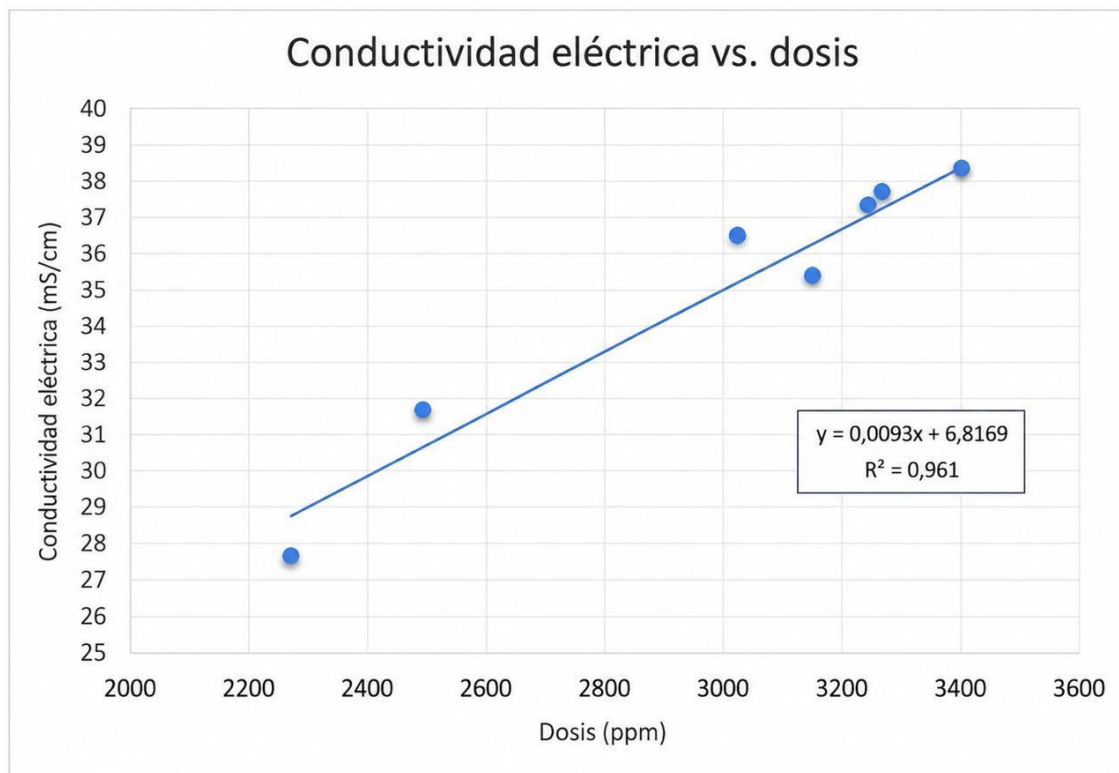


Figura 32.

Gráfica de dosificación de sulfato férrico en la mezcla rápida

Nota. Elaboración por los operadores químicos de la Planta de Tratamiento de Agua de Mina Catalina Huanca.



FICHA TÉCNICA DEL SULFATO FÉRRICO

Technical Service Bulletin #11

Handling and Dissolving of KEMIRA FERIX-3™

Kemira provides a dry, granulated ferric sulfate, KEMIRA FERIX-3, for use in potable water and wastewater treatment. An advantage offered by KEMIRA FERIX-3 is that it can be transported in the dry form and dissolved at the final destination before use to a solution of up to 11.8% Fe. If stored, handled and dissolved properly, KEMIRA FERIX-3 is easy to use. We therefore make some suggestions to assist our customers in these areas.

Materials of Construction

Suitable materials for storage and piping of KEMIRA FERIX-3 solutions are stainless steel, fiberglass, or cross-linked polyethylene. Dissolvers made out of epoxy-coated concrete tanks are also suitable.

Storage

KEMIRA FERIX-3, ferric sulfate, is a dry, granulated coagulant. The dry granules are mildly hygroscopic and care should be taken to ensure the storage vessel is completely dry. Moisture in the air can cause a thin, grayish crust to form on the exposed granules. This thin crust is easily broken and dissolves readily.

Dissolving

The granules should be dissolved prior to introduction to the process for the best results. Two different methods of dissolving that have proven to give good dissolving are discussed below. The effectiveness of the dissolving is dependent on the concentration of the solution, the temperature of the water and the time, see figures #1 and 2. **KEMIRA FERIX-3 can be dissolved to as high as an 11.8% Fe solution; however we recommend a concentration of 2-8% Fe to decrease the required time for dissolving.** The percentage of iron can be calculated by multiplying the percentage of granules added to the water by the iron concentration of the granules which is 20.5%. For example: Adding 10% granules to 90% water would give a $0.10 \times 20.5\%$ or 2.05% iron solution.

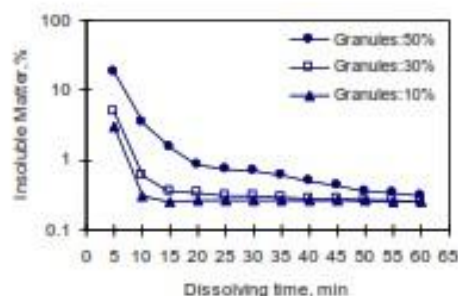


Figure #1: Dissolving Times at a Water Temperature of 76-89 °F (Insoluble matter based on the weight of granules).

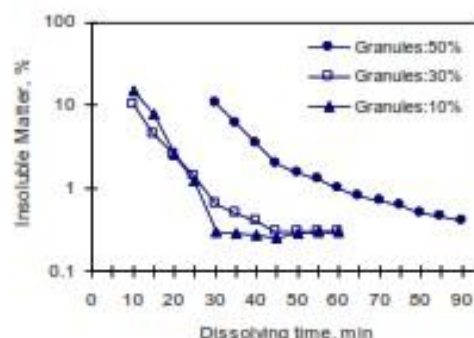


Figure #2: Dissolving Times at a Water Temperature of 45 °F (Insoluble matter based on the weight of granules).

• Continuous Dissolving

KEMIRA FERIX-3 can be easily dissolved in water by using a continuous dissolver made of stainless steel. The granules are fed into the dissolver with a screw conveyor, see figure #3. Depending on the temperature of the water, the required time for dissolving will be 30-60 minutes to achieve a solution of 2-8% Fe. Even at water temperatures as low as 41°F, concentrations of 7% Fe are easy to achieve. Mixing energy is of great importance to the final result. Make sure to avoid settling of the granules on the bottom of the dissolver. The dissolving time is determined by the detention time of the water in the dissolver.

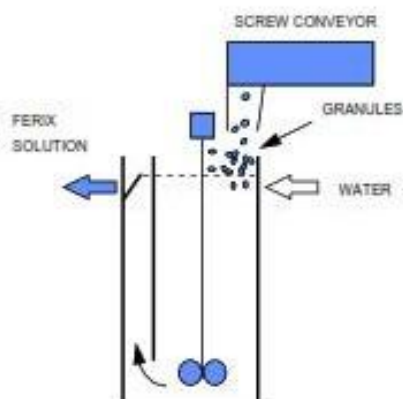


Figure #3: Continuous Dissolving of FERIX-3

• **Batch Dissolving**

KEMIRA FERIX-3 can also be dissolved in batches, see figure #4. The amount of water added to the tank is determined by the desired concentration of the solution. The dissolver has to be equipped with a mixer in the bottom that is able to keep the granule slurry suspended to achieve good mixing between the water and the granules. Settling of granules on the bottom of the dissolver must be avoided.

In a batch dissolving process the time to dissolve KEMIRA FERIX-3 will be approx. 1 to 2 hours to achieve an 8% Fe solution of ferric sulfate.

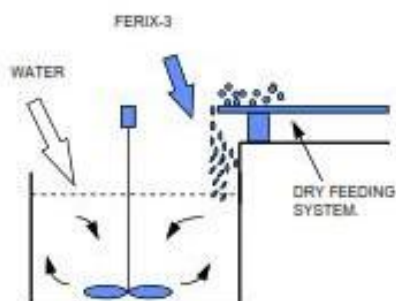


Figure #4: Batch Dissolving of FERIX-3

Kemira makes this information available as an accommodation to its customers and it is intended to be solely a guide in customer's evaluation of the products. You must test our products, to determine if they are suitable for your intended uses and applications, as well as from the health, safety and environmental standpoint. You must also instruct employees, agents, contractors, customers or any third party which may be exposed to the products about all applicable precautions. All information and technical assistance is given without warranty or guarantee and is subject to change without notice. You assume full liability and responsibility for compliance with all information and precautions, and with all laws and statutes, ordinances and regulations of any governmental authority applicable to the processing, transportation, delivery, unloading, discharge, storage, handling, sale and use of each product. Nothing herein shall be construed as a recommendation to use any product in conflict with patents covering any material or its use.

Insoluble Material

The insoluble matter in FERIX-3 is less than 1% by weight and will appear as very small, yellow particles in the solution. These particles have shown to improve the floc formation in full-scale applications. They are relatively low in heavy metals content. They will dissolve to less than 0.1% insoluble matter (based on the weight of the granules) if retained in a mixer for several days or if immersed in a sulfuric acid solution.

Product Delivery

FERIX-3 can be delivered in

- 50 lb Bags
- 1 Ton Super Sacks
- Rail Car
- Bulk Trucks (~48,000 lbs)

Customer Service

If you have any questions concerning this material, please contact our Customer Service Departments or your local sales representative.

US

Lawrence, KS (800) 879-6353

Canada

Varennnes, QC (800) 465-6171

Kemira
1000 Parkwood Circle, Ste 500
Atlanta, GA 30339
USA
www.kemira.com

United States
Tel +1 500 679 6353

Canada
Tel +1 450 652 0665

Mexico
Tel +52 55 9000 4140

kemira
Water is the connection

FICHA TÉCNICA DE ÓXIDO DE CALCIO



CERTIFICADO DE CALIDAD

DE : CONTROL DE CALIDAD – HOLCIM PERÚ SOLUCIONES S.A.
 A : CATALINA HUANCA SOCIEDAD MINERA S.A.C.
 FECHA : 23 DE ENERO DEL 2026

FORMULA : CaO
 TIPO DE CAL : CAL VIVA SELECTA MOLIDA A GRANEL
 GUIA N° : G010-17086
 FECHA DE FABRICACION : 23 / 01 / 2026
 CaO Útil : 87.30%
 LOTE : 331320

ENSAYOS REALIZADOS
(ASTM C 25-06)

#Muestra	% CaO Útil
1	87.30
2	87.34
3	87.26

COMPANIA MINERA LURCH S.A.
 CONTROL DE CALIDAD

23 ENE 2026

Control de Calidad
 HOLCIM PERÚ SOLUCIONES S.A.

LACASA

Planta: Panamericana Sur Km.23.5 V.E.S.
www.holcim.com.pe

FICHA TÉCNICA DE FLOCULANTE



FLOCULANTE HISA 5434

HOJA TÉCNICA

1) DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO

Es un producto efectivo en los procesos de separación líquido / sólido incluidos la clarificación de aguas, deshidratación de lodos y todas las aplicaciones de coagulación.

2) APLICACIÓN Y DOSIFICACION

Se deben preparar soluciones de HISA 5434 en lotes entre 0.1 y 0.5% en peso. Lentamente adicionar el producto seco en el vértice del tanque con agua en agitación mediante el empleo de un dosificador en polvo. Continúe mezclando por lo menos por 30 minutos. Agua caliente (hasta 54 °C) acelera la disolución. Agitadores sobre los 400 rpm o alta velocidad de cizallamiento deben ser evitados. Antes de preparar un nuevo lote volver a diluir al 0.01% - 0.05% con agua limpia. Emplear bomba de inyección resistente a la corrosión. Evitar la mezcla turbulenta en la corriente de proceso luego del punto de inyección. Pueden ser necesario múltiples puntos de inyección para una distribución más uniforme del polímero.

3) CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS

PARAMETROS	ESPECIFICACIONES
Estado	Sólido
Color	Blanco a Beige
pH (0.5%)	6.0– 8.0

4) MANIPULACIÓN Y ALMACENAMIENTO

Soluciones acuosas de HISA 5434 no son más corrosivas que el agua, almacenar las soluciones en recipientes de acero inoxidable, fibra de vidrio, plástico otro material resistente.

Véase el MSDS para mayor detalle.

5) PRESENTACIÓN

Bolsas x 25 Kg.

ANEXO. MATRIZ DE CONSISTENCIA

Diseño y puesta en marcha de un sistema de mezcla rápida para el tratamiento de aguas residuales de interior mina en la Minera Catalina Huanca

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES, DIMENSIONES E INDICADORES	METODOLOGÍA
General: ¿En qué medida el diseño y puesta en marcha de un sistema de mezcla rápida influye en la eficiencia y la estabilidad de la remoción de turbidez del agua residual de interior mina de la Unidad Minera Catalina Huanca?	General: Determinar la influencia de la implementación y puesta en marcha de un sistema de mezcla rápida en la eficiencia y la estabilidad de la remoción de turbidez, mediante la comparación del efluente tratado antes y después de la intervención, considerando la turbidez del agua de ingreso.	General: El diseño y puesta en marcha del sistema incrementa significativamente la eficiencia y mejora la estabilidad de la remoción de turbidez del efluente tratado en el periodo posterior, respecto del periodo anterior, considerando la turbidez del agua de ingreso.	VI: Implementación y puesta en marcha del sistema de mezcla rápida. Dimensiones: diseño hidráulico; implementación y puesta en marcha. Indicadores: Q (m^3/s), F (adimensional), t (s), G (s^{-1}) y condición antes/después. VD: Remoción de turbidez. Dimensiones: eficiencia de remoción y estabilidad del efluente. Indicadores: T_1 y T_s (NTU), eficiencia E (%), desviación estándar de T_s (NTU)	Enfoque/tipo/nivel: cuantitativo, aplicado y explicativo. Diseño: cuasiexperimental, un grupo con pretest-postest. Población: agua residual de interior mina tratada en la PTAM. Muestra: observaciones de los periodos anterior y posterior; muestreo no probabilístico por conveniencia. Técnicas: análisis fisicoquímico, observación y revisión de registros. Análisis: estadística descriptiva, normalidad y contraste inferencial, previa validación documental.
Específico 1: ¿Cuáles son las características fisicoquímicas del agua residual de interior mina, especialmente la turbidez de ingreso, que deben considerarse para diseñar el sistema?	Específico 1: Caracterizar fisicoquímicamente el agua residual de interior mina, con énfasis en la turbidez de ingreso, para establecer las condiciones de diseño.	Específica 1: Las características fisicoquímicas, especialmente la turbidez de ingreso y el caudal, permiten establecer las condiciones requeridas para el diseño.	Indicadores: turbidez de ingreso (NTU), caudal (m^3/s) y parámetros fisicoquímicos registrados.	Procedimiento: caracterización fisicoquímica y análisis descriptivo con equipos calibrados y registros de laboratorio.
Específico 2: ¿Qué valores de caudal, número de Froude, tiempo de mezcla y gradiente de velocidad se requieren para el diseño hidráulico del sistema?	Específico 2: Determinar el caudal de diseño, número de Froude, tiempo de mezcla y gradiente de velocidad requeridos para el diseño hidráulico.	Específica 2: La determinación de Q, F, t y G permite diseñar un sistema que cumpla las condiciones hidráulicas requeridas para dispersar el coagulante.	Dimensión: diseño hidráulico. Indicadores: Q (m^3/s), F (adimensional), t (s) y G (s^{-1}).	Procedimiento: medición de caudal, cálculos hidráulicos, planos y hojas de cálculo; verificación dimensional.

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES, DIMENSIONES E INDICADORES	METODOLOGÍA
Específico 3: ¿Cómo implementar y poner en marcha el sistema de mezcla rápida en la línea existente, según los parámetros hidráulicos del diseño?	Específico 3: Implementar y poner en marcha el sistema de mezcla rápida en la línea de tratamiento existente, conforme con los parámetros hidráulicos establecidos.	Específica 3: La implementación y puesta en marcha permite operar de acuerdo con los parámetros hidráulicos establecidos en el diseño.	Dimensión: implementación y puesta en marcha. Indicadores: condición antes/después, montaje, prueba hidráulica y registro de operación.	Procedimiento: observación directa, lista de verificación, registros fotográficos y documentos de puesta en marcha.
Específico 4: ¿Qué diferencias existen en la eficiencia y estabilidad de la remoción de turbidez del efluente antes y después de implementar el sistema, considerando la turbidez de ingreso?	Específico 4: Comparar la eficiencia y estabilidad de la remoción de turbidez del efluente tratado antes y después de implementar el sistema, considerando la turbidez de ingreso.	Específica 4: Después de implementar el sistema, la eficiencia es significativamente mayor y el CV de la turbidez del efluente es menor que antes, considerando la turbidez de ingreso.	Dimensiones: eficiencia y estabilidad. Indicadores: T_i y T_s (NTU), E (%), desviación estándar de T_s (NTU) y CV (%).	Procedimiento: comparación pretest-posttest, estadística descriptiva y contraste inferencial, luego de validar la intervención y los registros.

**UNSCH**FACULTAD DE INGENIERÍA
QUÍMICA Y
METALURGIA**ACTA DE SUSTENCIÓN DE LA TESIS:**

(Reglamento de grados y títulos, aprobado con RCU N° 3403-2024-UNSCH-CU)

Diseño y puesta en marcha de un sistema de mezcla rápida para el tratamiento de aguas residuales de interior mina en la minera Catalina Huanca**Expositor: Jorge Luis Flores Alvites****Bachiller en Ingeniería Química****Expediente N° 26139416****Resolución Decanal N° 149-2026-UNSCH-FIQM/D****Fecha: 28-09-2026**

En la Sala de Conferencia "Pedro Villena Hidalgo" de la Facultad de Ingeniería Química y Metalurgia, ubicada en la Ciudad Universitaria de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga (H-121), siendo las once de la mañana con cinco minutos del día jueves uno de octubre del año dos mil veintiséis, se reunieron el Bachiller en Ingeniería Química **Jorge Luis Flores Alvites**, los Docentes Miembros del Jurado de Sustentación Ingenieros: Mg. Edgar Gregorio ARONES MEDINA (ausente), Mg. Luis Alberto COSSIO HERRERA (Miembros) y Mg. Anibal Pablo GARCIA BENDEZU (Miembro-Asesor), bajo la Presidencia del Dr. Agustín Julián PORTUGUEZ MAURTUA (Decano de la FIQM), el Mg. Fredy Rober PARIONA ESCALANTE (Secretario-Docente).

Acto seguido, el Presidente del Jurado de Sustentación dispuso que el Secretario Docente dé lectura a los antecedentes tramitados para el presente Acto Público de Sustentación de la Tesis: **Diseño y puesta en marcha de un sistema de mezcla rápida para el tratamiento de aguas residuales de interior mina en la minera Catalina Huanca**, presentado por el Bachiller **Jorge Luis Flores Alvites**. A continuación, el Secretario-Docente procedió a dar lectura a la Resolución Decanal N° 149-2026-UNSCH-FIQM/D.

Luego, el Presidente del Jurado invitó al Bachiller **Jorge Luis Flores Alvites**, a pasar al estrado y exponer su trabajo de Tesis en un tiempo máximo de treinta y cinco minutos.

Finalizado la exposición del Bachiller, el presidente invitó a los Señores Miembros del Jurado de Sustentación a que formulen sus preguntas y señalen sus observaciones, en el siguiente orden: Mg. Anibal Pablo GARCIA BENDEZU (Miembro-Asesor), Mg. Luis Alberto COSSIO HERRERA y Mg. Edgar Gregorio ARONES MEDINA (ausente) (Miembros).

A continuación, el presidente del jurado invitó al sustentante y al público para que se sirva abandonar la sala de conferencia con la finalidad de permitir al jurado de sustentación deliberar sobre la evaluación a otorgar. Se alcanzó el siguiente resultado. **APROBADO POR UNANIMIDAD PROMEDIO DIECISIETE (17).**

FACULTAD DE INGENIERÍA
QUÍMICA Y METALURGIA
Av. Independencia s/n
Ciudad Universitaria

**UNSC**FACULTAD DE INGENIERÍA
QUÍMICA Y
METALURGIA**ACTA DE SUSTENCIÓN DE LA TESIS:**

(Reglamento de grados y títulos, aprobado con RCU N° 3403-2024-UNSCH-CU)

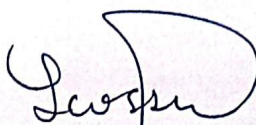
Diseño y puesta en marcha de un sistema de mezcla rápida para el tratamiento de aguas residuales de interior mina en la minera Catalina Huanca**Expositor: Jorge Luis Flores Alvites****Bachiller en Ingeniería Química****Expediente N° 26139416 Resolución Decanal N° 149-2026-UNSCH-FIQM/D****Fecha: 28-09-2026**

Finalmente, el Presidente del Jurado dispuso que se invite al Sustentante y al público asistente a que se sirvan ingresar a la sala de conferencias y anunció que, el Bachiller **Jorge Luis Flores Alvites**, ha resultado **APROBADO POR UNANIMIDAD**, y por lo tanto a partir de la fecha la Universidad y la Facultad cuenta con un flamante **INGENIERO QUIMICO** y le augura éxitos en su desempeño profesional.

Siendo las doce del medio día con cincuenta y cinco minutos se dió por finalizado este acto académico de Sustentación de Tesis. En fe de lo cual firmamos:

.....

Dr. Agustín Julián PORTUGUEZ MAURTUA
Presidente

.....

Mg. Luis Alberto COSSIO HERRERA
Miembro

.....

Mg. Anibal Pablo GARCIA BENDEZU
(Miembro-Asesor)

.....

Mg. Fredy Rober PARIONA ESCALANTE
(Secretario Docente)



FACULTAD DE
INGENIERÍA QUÍMICA Y
METALURGIA

ESCUELA PROFESIONAL DE
INGENIERÍA QUÍMICA

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD N° 004-2026-UNSCH-FIQM/EPIQ

El que suscribe, Director de la Escuela Profesional de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería Química y Metalurgia de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, emite la siguiente:

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD

Que, habiendo recibido la solicitud de Constancia de Originalidad por parte del Bachiller **Jorge Luis FLORES ALVITES**, se procedió a la evaluación de originalidad del archivo adjunto con el **TURNITIN - UNSCH**, de acuerdo a los criterios establecidos en el **Reglamento de Originalidad de Trabajos de Investigación de la UNSCH**, aprobado con Resolución del Consejo Universitario N° 039-2021-UNSCH-CU.

Como resultados del análisis, se obtuvo el siguiente reporte:

Tesis:

Diseño y puesta en marcha de un sistema de mezcla rápida para el tratamiento de aguas residuales de interior mina en la minera Catalina Huanca

Autor Bach. : Jorge Luis FLORES ALVITES
Identificador : 3060148970
Fecha : 19 de octubre de 2026

Se expide la presente constancia de originalidad, con reporte del **4% (cuatro por ciento)** de **ÍNDICE DE SIMILITUD** realizado con **Depósito de trabajos estándar**, a fin de proseguir con los trámites pertinentes; cabe señalar que, los documentos del procedimiento se archivan en el repositorio documental de la Escuela.

Ayacucho, 15 de octubre de 2026

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN
CRISTÓBAL DE HUAMANGA E.P.
INGENIERÍA QUÍMICA
Dr. Alfredo ARTAS JARA
Director de Escuela

Adjunto Recibo digital turnitin.
cc. archivo

ESCUELA PROFESIONAL DE
INGENIERÍA QUÍMICA
Av. Independencia S/N - Ayacucho
Telf. 066-312510 Anexo. 152
Correo: ep.quimica@unsch.edu.pe

Diseño y puesta en marcha de un sistema de mezcla rápida para el tratamiento de aguas residuales de interior mina en la minera Catalina Huanca

por Jorge Luis FLORES ALVITES

Fecha de entrega: 14-oct-2026 08:26p. m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 3060148970

Nombre del archivo: uas_residuales_de_interior_mina_en_la_minera_Catalina_Huanca.pdf (3.38M)

Total de palabras: 19637

Total de caracteres: 91546

Diseño y puesta en marcha de un sistema de mezcla rápida para el tratamiento de aguas residuales de interior mina en la minera Catalina Huanca

INFORME DE ORIGINALIDAD

4%

INDICE DE SIMILITUD

3%

FUENTES DE INTERNET

2%

PUBLICACIONES

2%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	Submitted to Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga	1%
	Trabajo del estudiante	
2	repositorio.upsc.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	
3	repositorio.unal.edu.co	<1%
	Fuente de Internet	
4	worldwidescience.org	<1%
	Fuente de Internet	
5	www.osinergmin.gob.pe	<1%
	Fuente de Internet	
6	repositorio.uancv.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	
7	repositorio.unsaac.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	
8	Submitted to Universidad Carlos III de Madrid	<1%
	Trabajo del estudiante	
9	WALSH PERU S.A. INGENIEROS Y CIENTIFICOS CONSULTORES. "PAMA de la UP Toquepala, la UP Cuajone, la UP Ilo y la Fundición de Ilo-IGA0000006", R.D. N° 042-97-EM/DGM, 2020	<1%
	Publicación	
10	repositorio.unsm.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	
11	repository.usta.edu.co	<1%
	Fuente de Internet	
12	1library.co	<1%
	Fuente de Internet	
13	Submitted to Organismo de Evaluación y Fiscalización	<1%
	Trabajo del estudiante	
14	repositorio.unheval.edu.pe	
	Fuente de Internet	

<1 %

15

hdl.handle.net

Fuente de Internet

<1 %

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias

< 30 words

Excluir bibliografía

Activo