

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL
DE HUAMANGA**

ESCUELA DE POSGRADO

**UNIDAD DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE
INGENIERÍA QUÍMICA Y METALURGIA**



TESIS:

**Reducción de la turbidez y la DQO mediante electrocoagulación
de las aguas del afluente de la PTAR Puca Puca de la provincia
de Huanta**

Para optar el grado académico de:
MAESTRA EN INGENIERÍA AMBIENTAL

PRESENTADO POR:
Bach. Dayma QUINTAS MENDEZ

ASESOR:
Mg. Aníbal Pablo GARCÍA BENDEZÚ

AYACUCHO - PERÚ

2026

Dedicatoria

A mis queridos padres y hermanas, quienes con su amor incondicional y su constante apoyo me han inspirado a ser cada día una mejor persona. Su ejemplo y valores han sido la luz que guía mi camino. Esta tesis es un reflejo de su confianza en mí y de todo lo que he aprendido de ustedes. Gracias por ser mi mayor motivación.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a mi casa de estudios, la Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga, por haberme formado con exigencia y dedicación, permitiéndome alcanzar uno de mis más grandes anhelos: culminar esta etapa académica.

Agradezco de manera especial a los docentes de la Facultad de Ingeniería Química y Metalurgia de esta universidad, por su valiosa contribución durante mi formación académica y profesional. Su generosidad al compartir sus conocimientos y experiencias me brindó las herramientas necesarias para desarrollar este proyecto de tesis. Su compromiso y vocación docente han sido clave en este logro. ¡Gracias!

Mi más sincero reconocimiento al Mtro. Aníbal García Bendejú, mi asesor, por su constante orientación, apoyo incondicional y dedicación a lo largo de este proceso. Su guía fue fundamental para dar forma y coherencia a este trabajo.

Asimismo, extiendo mi agradecimiento al Mtro. Juan Carlos Terres León, mi co- asesor, por su valiosa colaboración en la ejecución de esta investigación y por compartir su experiencia en el desarrollo del proyecto.

A todos ustedes, gracias por ser parte de este importante logro.

ÍNDICE

Dedicatoria.....	iv
AGRADECIMIENTOS.....	v
Índice de tablas.....	ix
Índice de figuras.....	x
Índice de anexos.....	xi
RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
INTRODUCCIÓN.....	1
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
1.1. DESCRIPCIÓN DE LA SITUACIÓN PROBLEMÁTICA.....	2
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	4
1.2.1. Problema principal.....	4
1.2.2. Problemas específicos.....	5
1.3. FORMULACIÓN DE OBJETIVOS.....	5
1.3.1. Objetivo general.....	5
1.3.2. Objetivos específicos.....	5
1.4. JUSTIFICACIÓN.....	5
1.5. IMPORTANCIA.....	6
1.6. DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA.....	7
II. MARCO TEÓRICO.....	8
2.1. ANTECEDENTES.....	8
2.2. BASES TEÓRICAS.....	12
2.2.1. Agua residual.....	12
2.2.2. Afluente.....	13
2.2.3. Propiedades fisicoquímicas del agua residual.....	13
2.2.3.1. Turbidez.....	13
2.2.3.2. Sólidos disueltos totales.....	13
2.2.3.3. Sólidos suspendidos totales.....	13
2.2.3.4. Demanda química de oxígeno.....	14
2.2.3.5. Conductividad eléctrica.....	14
2.2.3.6. pH.....	14
2.2.3.7. Temperatura.....	14
2.2.4. Tratamiento de agua residual.....	14
2.2.4.1. Tratamiento preliminar.....	14
2.2.4.2. Tratamiento primario.....	15
2.2.4.3. Tratamiento secundario.....	15
2.2.4.4. Tratamiento terciario.....	15
2.2.5. Electrocoagulación.....	15

2.2.6. Celda electroquímica	17
2.2.7. Electroodos	18
2.2.8. Ventajas	18
2.2.9. Desventajas	18
2.2.10. Factores que afectan la electrocoagulación.....	19
2.2.10.1. Densidad de corriente.....	19
2.2.10.2. Distancia entre electrodos	19
2.2.10.3. pH.....	19
2.2.10.4. Conductividad	20
2.2.10.5. Tiempo	20
2.3. MARCO LEGAL	20
2.3.1. Valores máximos admisibles.....	20
2.3.2. Límite máximo permisible	21
III. METODOLOGÍA	22
3.1. TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACIÓN	22
3.1.1. Tipo de investigación	22
3.1.2. Nivel de investigación	22
3.2. MÉTODOS	22
3.3. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN.....	23
3.4. POBLACIÓN Y MUESTRA.....	25
3.4.1. Población	25
3.4.2. Muestra	25
3.5. MUESTREO.....	25
3.5.1. Muestreo del afluente	25
3.5.2. Lugar de estudio	26
3.6. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS	27
3.6.1. Técnicas para la recolección de datos	27
3.6.2. Instrumentos para la recolección de datos	28
3.6.3. Transporte de la muestra hacia el laboratorio	28
3.6.4. Caracterización físico-química del agua residual	28
3.6.5. Tratamiento primario.....	29
3.6.6. Tratamiento de los electrodos	30
3.6.7. Aplicación del proceso de electrocoagulación	30
3.6.8. Caracterización físico-química del agua tratada.....	32
3.6.9. Esquema de proceso experimental.....	32
3.7. TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO DE DATOS.....	32
3.7.1. Procesamiento de datos	32

3.7.2. Análisis estadístico	34
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	35
V. CONCLUSIONES.....	54
RECOMENDACIONES.....	55
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	56

Índice de tablas

	Pág.
Tabla 1 Valores Máximos Admisibles para las descargas al sistema de alcantarillado	20
Tabla 2 Límites máximos permisibles para los efluentes de PTAR	21
Tabla 3 Rango y nivel de los factores.....	23
Tabla 4 Matriz de diseño experimental de Box-Behnken para el proceso de Electrocoagulación.....	24
Tabla 5 Métodos para la recolección de la información	27
Tabla 6 Instrumentos para la recolección de la información.....	28
Tabla 7 Propiedades físicas y químicas del afluente de la PTAR Huanta	35
Tabla 8 Propiedades físicas y químicas del efluente de la PTAR Huanta	36
Tabla 9 Estandarización de la solución de NaOH 0,5 M.....	36
Tabla 10 Estandarización de la solución de HCl 0,5 M.....	37
Tabla 11 Volumen de NaOH y HCl requerido para ajustar el pH del agua Residual	37
Tabla 12 Eficiencia de remoción de turbidez registrada en los ensayos experimentales.....	37
Tabla 13 Modelo secuencial de suma de cuadrados	38
Tabla 14 Prueba de falta de ajuste.....	39
Tabla 15 Resumen de los modelos estadísticos.....	40
Tabla 16 ANOVA para el modelo cuadrático	41
Tabla 17 Coeficientes estimados de regresión del modelo cuadrático.....	42
Tabla 18 Valores predichos de remoción de turbidez.....	43
Tabla 19 Condiciones óptimas de electrocoagulación.....	51
Tabla 20 Valor experimental y predicho de la remoción de turbidez y demanda química de oxígeno en condiciones óptimas de tratamiento.....	52
Tabla 21 Propiedades físicas y químicas del agua tratada en condiciones óptimas de electrocoagulación.....	53

Índice de figuras

	Pág.
Figura 1 Reactores tipo discontinuo con electrodos: (a) Monopolares en paralelo, (b) Monopolares en serie, (c) Bipolares en serie	17
Figura 2 Muestreo del afluente de la PTAR Huanta	26
Figura 3 Muestreo del efluente de la PTAR Huanta	26
Figura 4 Ubicación de la zona de estudio	27
Figura 5 Equipo para determinar el pH y la turbidez del agua residual	29
Figura 6 Agua residual filtrada	29
Figura 7 Configuración experimental para la electrocoagulación	31
Figura 8 Resultado de un tratamiento experimental mediante el proceso de electrocoagulación	31
Figura 9 Aspecto del agua residual después del tratamiento por electrocoagulación	32
Figura 10 Esquema secuencial del proceso experimental	33
Figura 11 Gráfico de los valores predichos y reales de remoción de turbidez.	44
Figura 12 Gráfico de la normalidad de los residuos para la remoción de turbidez	45
Figura 13 Superficie respuesta de remoción de turbidez en función al pH y densidad de corriente	46
Figura 14 Superficie respuesta de remoción de turbidez en función a la distancia entre electrodos y densidad de corriente	46
Figura 15 Superficie respuesta de remoción de turbidez en función al tiempo y densidad de corriente	47
Figura 16 Superficie respuesta de remoción de turbidez en función a la distancia entre electrodos y pH	48
Figura 17 Superficie respuesta de remoción de turbidez en función al tiempo y pH.	50
Figura 18 Superficie respuesta de remoción de turbidez en función al tiempo y distancia entre electrodos	51

Índice de anexos

	Pág.
Anexo 1 Matriz de consistencia	62
Anexo 2 Validación del instrumento	63
Anexo 3 Autorización de la institución donde se realizó la investigación	66
Anexo 4 Procesamiento estadístico	67
Resultados del análisis físico y químico del afluente a la PTAR Huanta (Laboratorio SGS)	68
Resultados del análisis físico y químico del efluente a la PTAR Huanta (Laboratorio SGS)	78
Resultados del análisis físico y químico del agua residual en condiciones óptimas de electrocoagulación (Laboratorio SGS)	83
Anexo 5 Artículo científico	98

ABREVIATURA

Sigla

ANOVA	Analysis of Variance (Análisis de Varianza)
CCD	Central Composite Design (Diseño Central Compuesto)
DBO	Demanda Bioquímica de Oxígeno
DOE	Design of Experiments (Diseño de Experimentos)
DQO	Demanda Química de Oxígeno
ISO	International Organization for Standardization (Organismo Internacional de Estandarización)
LMP	Límites Máximos Permisibles
NMP	Número Más Probable (para conteo bacteriológico)
NTU	Unidades Nefelométricas de Turbidez
PRESS	Predicted Residual Error Sum of Square (Suma de Cuadrados de Error Residual Predicho)
PTAR	Planta de Tratamiento de Aguas Residuales
RSM	Response Surface Methodology (Metodología de Superficie Respuesta)
SST	Sólidos Totales Suspendidos VMA Valores Máximos Admisibles

RESUMEN

La investigación tuvo como objetivo evaluar la reducción de la turbidez y DQO mediante el proceso de electrocoagulación de las aguas del afluente de la PTAR Puca Puca de la provincia de Huanta, región Ayacucho. La investigación fue de tipo aplicada, con enfoque cuantitativo, nivel explicativo y diseño experimental. Se utilizó un diseño experimental Box-Behnken con cuatro variables: pH, densidad de corriente, distancia entre electrodos y tiempo de operación. El trabajo se desarrolló en el laboratorio de Química Orgánica de la UNSCH, en 7 etapas: elaboración de la matriz de diseño experimental, recolección del agua residual del afluente, caracterización fisicoquímica inicial, tratamiento primario, instalación de la celda electroquímica, ejecución de los tratamientos y evaluación del agua residual tratada. Se empleó una celda electroquímica de acrílico de tipo discontinuo, con electrodos de aluminio en configuración monopolar en paralelo, procesándose 2500 mL de agua residual por tratamiento. Los factores evaluados fueron el pH inicial (6 y 9), la distancia entre electrodos (1 y 2 cm) y el tiempo de operación (10 a 20 min). Las condiciones óptimas de operación correspondieron a un pH de 7,5, densidad de corriente de 25,45 mA/cm², una distancia entre electrodos de 1 cm y un tiempo de operación de 15 minutos, con las cuales se alcanzaron eficiencias de remoción de 58,15 % de contaminantes. El análisis fisicoquímico del agua tratada evidenció reducciones significativas en turbidez, DQO, SST, aceites y grasas, cumpliendo con los Límites Máximos Permisibles y Valores Máximos Admisibles. Se concluye que la electrocoagulación con electrodos de aluminio reduce significativamente la turbidez y la DQO de las aguas del afluente de la PTAR Puca Puca, permitiendo que el agua tratada cumpla con los Límites Máximos Permisibles para efluentes de PTAR, por lo que constituye una alternativa técnicamente viable como pretratamiento o tratamiento complementario para dicha planta.

Palabras clave: Electrocoagulación, turbidez, demanda química de oxígeno, aguas residuales, electrodos de aluminio, PTAR Puca Puca.

ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the reduction of turbidity and Chemical Oxygen Demand (COD) through the electrocoagulation process applied to the influent wastewater of the Puca Puca Wastewater Treatment Plant (WWTP) located in the province of Huanta, Ayacucho Region. The research was applied in nature, with a quantitative approach, an explanatory level, and an experimental design. A Box–Behnken experimental design was employed using four variables: pH, current density, electrode spacing, and operating time. The study was conducted in the Organic Chemistry Laboratory of the National University of San Cristóbal de Huamanga (UNSCH) and consisted of seven stages: preparation of the experimental design matrix, collection of influent wastewater samples, initial physicochemical characterization, primary treatment, installation of the electrochemical cell, execution of the experimental treatments, and evaluation of the treated wastewater. A batch-type acrylic electrochemical cell equipped with parallel monopolar aluminum electrodes was used, processing 2,500 mL of wastewater per treatment. The evaluated factors included initial pH (6 and 9), electrode spacing (1 and 2 cm), and operating time (10 to 20 min). The optimal operating conditions were a pH of 7,5, a current density of 25,45 mA/cm², an electrode spacing of 1 cm, and an operating time of 15 minutes, achieving a contaminant removal efficiency of 58,15%. The physicochemical analysis of the treated wastewater showed significant reductions in turbidity, COD, total suspended solids (TSS), oils, and grease, complying with the Maximum Permissible Limits (MPLs) and Maximum Allowable Values (MAVs). It is concluded that electrocoagulation using aluminum electrodes significantly reduces turbidity and COD in the influent wastewater of the Puca Puca WWTP, enabling the treated effluent to comply with the Maximum Permissible Limits established for WWTP effluents. Therefore, this technology represents a technically viable alternative as a pretreatment or complementary treatment for this wastewater treatment plant.

Keywords: Electrocoagulation, turbidity, chemical oxygen demand, wastewater, aluminum electrodes, Puca Puca WWTP.

INTRODUCCIÓN

En la provincia de Huanta, las actividades domésticas, agrícolas, pecuarias e industriales generan aguas residuales con alta carga de contaminantes orgánicos e inorgánicos. Estas son tratadas en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) Puca Puca, la cual presenta deficiencias operativas debido al crecimiento poblacional que ha incrementado el caudal del afluente. Como resultado, el agua tratada no cumple adecuadamente los estándares de calidad, especialmente en cuanto a turbidez y demanda química de oxígeno (DQO), lo que representa un riesgo sanitario, ya que se utiliza principalmente para riego agrícola.

Ante esta problemática, es necesario implementar tecnologías más eficaces, económicas y sostenibles. Una alternativa prometedora es la electrocoagulación, un proceso que emplea corriente eléctrica y electrodos metálicos de sacrificio para eliminar sólidos en suspensión, metales pesados, aceites y compuestos orgánicos. Este método ha demostrado ser eficaz en la reducción de parámetros como la turbidez y la DQO.

Sin embargo, para lograr su máxima eficiencia, es fundamental optimizar las condiciones de operación. En este sentido, el uso del método de superficie de respuesta permite identificar combinaciones óptimas de variables como el tiempo, voltaje o distancia entre electrodos, lo que mejora el rendimiento del tratamiento, reduce los costos experimentales y aumenta la confiabilidad de los resultados.

Por tanto, esta investigación se enfoca en optimizar el proceso de electrocoagulación a nivel de laboratorio, con el fin de reducir la turbidez y la demanda química de oxígeno (DQO) del afluente de la PTAR Puca Puca. Los resultados obtenidos constituyen una referencia técnica que podría ser utilizada en el futuro para implementar mejoras en el tratamiento del agua residual, contribuyendo así a elevar su calidad y a proteger la salud pública y el medio ambiente.

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. DESCRIPCIÓN DE LA SITUACIÓN PROBLEMÁTICA

A nivel internacional, el acceso y la gestión adecuada del agua constituyen uno de los principales desafíos globales del siglo XXI. El aumento continuo de la población mundial, junto con la rápida industrialización, el crecimiento de la industria turística y los efectos del cambio climático, ha generado un incremento significativo en la demanda de agua y en la producción de aguas residuales. Se estima que para 2030 la crisis hídrica podría representar un déficit del 40 % del suministro global, exacerbando problemas económicos, sociales y ambientales a nivel mundial (Nordio, 2024).

Actualmente, alrededor de 2200 millones de personas carecen de acceso a agua potable, y aproximadamente 2400 millones habitan en países con estrés hídrico, definido como la situación en la que la demanda de agua supera su disponibilidad o su gestión sostenible. Este déficit surge no solo de la sobreexplotación de los recursos hídricos, sino también de la insuficiencia de tecnologías eficientes para la regeneración, tratamiento y reutilización del agua (Nordio, 2024).

En respuesta a esta problemática, la Unión Europea ha adoptado políticas y regulaciones orientadas a incrementar la reutilización de agua, como lo evidencia el Reglamento (UE), que establece estándares mínimos de calidad para el uso agrícola de aguas recicladas. A pesar de ello, actualmente solo se aprovecha el 2 % del potencial total de reutilización hídrica en la región, con países como Italia y España liderando el reciclaje de agua, mientras que otras naciones, como Francia, Alemania y Portugal, presentan un bajo nivel de reutilización a pesar de su elevado potencial. Entre los principales desafíos identificados para mejorar la reutilización del agua en Europa se encuentran la heterogeneidad legislativa entre los Estados miembros, la necesidad de garantizar estándares mínimos de calidad según el uso previsto y la implementación de tecnologías eficientes de tratamiento de aguas residuales (Nordio, 2024).

Este contexto global evidencia la urgencia de desarrollar y optimizar tecnologías innovadoras para el tratamiento de aguas residuales, capaces de reducir parámetros críticos como la turbidez y la demanda química de oxígeno (DQO), lo que permitirá no solo la protección ambiental, sino también la disponibilidad de agua segura para diversos usos. La electrocoagulación se presenta como una alternativa prometedora por su capacidad de remover sólidos suspendidos, materia orgánica y contaminantes, contribuyendo al objetivo global de una gestión sostenible y eficiente del agua (Nordio, 2024).

A nivel de Latinoamérica, en el foro “Tratamiento y reúso de las aguas residuales Perú: ¿Un reflejo de la región?” (2017), organizado por el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, se discutió la situación del tratamiento de aguas residuales en Perú y la recuperación de sus recursos en el marco de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Según el estudio del Banco Mundial “Repensando la Infraestructura en América Latina y el Caribe” (2017), la gestión de aguas residuales, junto con el transporte, representa uno de los principales desafíos de infraestructura en la región. El informe destaca que no basta con aumentar la inversión; esta debe ser más eficiente y enfocada en promover la recuperación de recursos para garantizar la sostenibilidad. Además, señala que solo el 20 % de los prestadores de servicios generan ingresos suficientes para financiarse en el mercado, y que el cambio climático, los desastres naturales y fenómenos meteorológicos extremos afectan la capacidad de la infraestructura existente. En Perú, especialmente en la cuenca del Amazonas y las zonas costeras, la tendencia a la sequía resalta la necesidad de tratar y reutilizar las aguas residuales como fuente adicional de suministro (Huanacuni, 2019).

En Perú, la cobertura del tratamiento de aguas residuales es limitada, alcanzando aproximadamente al 70 % de la población urbana a finales de 2015 (Banco Mundial, 2017). Incrementarla en el futuro resultará complejo y costoso, ya que requerirá la construcción de numerosas plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de menor escala para atender a ciudades medianas y pequeñas. Además, las PTAR existentes presentan problemas técnicos y operativos, con deficiencias en la selección de tecnologías, así como en el diseño, construcción, operación y mantenimiento. A esto se suma que las empresas prestadoras de servicios (EPS) carecen de financiamiento adecuado para garantizar un funcionamiento y mantenimiento eficientes (Huanacuni, 2019).

A nivel local, la provincia de Huanta, ubicada en la región Ayacucho del Perú, enfrenta serios desafíos asociados a la gestión eficiente de los recursos hídricos, considerando que estas fuentes son esenciales para el desarrollo de la actividad agrícola. En los últimos años, la zona ha registrado condiciones de sequía más severas en comparación con periodos

anteriores, lo que intensifica la problemática hídrica. Esta situación se agrava debido al uso de aguas residuales sin tratamiento, el cual constituye un riesgo significativo para la salud pública de la población. Frente a este contexto, resulta indispensable evaluar y determinar de manera rigurosa métodos eficientes para el tratamiento de aguas residuales de origen doméstico (Cárdenas, 2024).

Las actividades que dan origen a las aguas residuales en la localidad de Huanta tienen diversas fuentes (doméstico, industrial, urbano, pecuario, agrícola, recreativo, entre otras), los cuales determinan sus características fisicoquímicas y biológicas. El tratamiento de las aguas residuales representa una necesidad económica y de saneamiento público.

La planta de tratamiento de agua residual Puca Puca de la Provincia de Huanta es una tecnología conservadora que a la fecha tiene deficiencias operativas y de mantenimiento debido al incremento de la población el cual está incrementando el caudal del afluente. El agua tratada se usa principalmente como agua de riego promoviendo el riesgo de enfermedades debido a su alto valor en contenido de carga orgánica e inorgánica.

Para mejorar el tratamiento y prevenir la contaminación de las aguas residuales existen las tecnologías alternativas amigables con el medio ambiente, más eficaces y económicas para su tratamiento como la electrocoagulación. El proceso de electrocoagulación presenta diversas ventajas: versatilidad, reducido tamaño, capacidad de automatización, alta efectividad en la remoción de un amplio rango de contaminantes, fácil operación, bajo costo, eficiente, amigable con el ecosistema, útil para tratar distintas muestras de contaminantes como compuestos orgánicos, metales pesados, aceites y sólidos en suspensión.

La electrocoagulación constituye una tecnología eficaz para disminuir la turbidez y la Demanda Química de Oxígeno (DQO) en aguas residuales mediante la aplicación de corriente eléctrica a electrodos de sacrificio. La eficiencia de este proceso depende de la optimización de sus parámetros de operación, la cual puede lograrse mediante el empleo de diseños experimentales. En este contexto, la presente investigación tiene como propósito evaluar la reducción de la turbidez y la DQO mediante el proceso de electrocoagulación en las aguas del afluente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) Puca Puca, ubicada en la provincia de Huanta.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1. Problema principal

¿Cómo reducir la turbidez y la demanda química de oxígeno (DQO) mediante

electrocoagulación de las aguas del afluente de la PTAR Puca Puca de la provincia de Huanta?

1.2.2. Problemas específicos

- a) ¿Cuáles son las propiedades fisicoquímicas de las aguas del afluente (turbidez, DQO, conductividad, pH y temperatura) de la PTAR Puca Puca:?
- b) ¿Cuáles son los parámetros de operación óptimos de electrocoagulación: pH, densidad de corriente, distancia entre electrodos y tiempo de operación del proceso de electrocoagulación, que influyen significativamente y maximizan la reducción de la turbidez y la DQO?
- c) ¿Cuáles son las propiedades fisicoquímicas del agua tratada: turbidez, DQO, conductividad, pH y temperatura?

1.3. FORMULACIÓN DE OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo general

Reducir la turbidez y la demanda química de oxígeno (DQO) mediante electrocoagulación de las aguas del afluente de la PTAR Puca Puca de la provincia de Huanta.

1.3.2. Objetivos específicos

- a) Determinar las propiedades fisicoquímicas de las aguas del afluente (turbidez, DQO, conductividad, pH y temperatura) de la PTAR Puca Puca.
- b) Determinar los parámetros de operación óptimos de electrocoagulación: pH, densidad de corriente, distancia entre electrodos y tiempo de operación del proceso de electrocoagulación, que influyen significativamente en la reducción de la turbidez y la DQO.
- c) Determinar las propiedades fisicoquímicas del agua tratada: turbidez, DQO, conductividad, pH y temperatura.

1.4. JUSTIFICACIÓN

A nivel teórico, no existen estudios previos que establezcan los parámetros óptimos de operación de electrocoagulación para el afluente de la PTAR Puca Puca, lo que limita la capacidad de aplicar procesos de tratamiento sostenible a las condiciones locales. Esta investigación proporciona información detallada sobre la influencia de variables operativas como pH, densidad de corriente, distancia entre electrodos y tiempo de operación sobre la remoción de turbidez y DQO, generando conocimiento aplicable a la optimización de tecnologías de tratamiento de aguas residuales. Los resultados obtenidos validarán la

electrocoagulación como alternativa viable, sino que también sirven como referencia teórica para estudios futuros en contextos similares.

A nivel ambiental, el efluente que sale de la PTAR Puca Puca presenta niveles que indican que, aunque algunos parámetros cumplen con los estándares regulatorios, otros superan los límites permisibles, lo que evidencia deficiencias en el tratamiento actual. Esta situación representa un riesgo ambiental importante, ya que la liberación de materia orgánica y microorganismos puede afectar la calidad de cuerpos receptores, promover eutrofización y alterar los ecosistemas acuáticos. La implementación de la electrocoagulación en el pretratamiento del afluente permitirá reducir la turbidez y la DQO desde el ingreso al sistema, aumentando la eficiencia del tratamiento y asegurando que el efluente final cumpla con los límites regulatorios, contribuyendo a la preservación del medio ambiente y a la sostenibilidad de los recursos hídricos de la provincia de Huanta.

A nivel económico, el manejo ineficiente del afluente con alta carga contaminante y la disposición de residuos de aluminio provenientes de envases generan externalidades negativas que repercuten en costos asociados a contaminación ambiental, riesgo sanitario y remediación de suelos y cuerpos de agua. Asimismo, la falta de recuperación de materiales valorizables limita la posibilidad de implementar estrategias de economía circular. Optimizar el tratamiento mediante electrocoagulación no solo reduce la carga contaminante de manera más eficiente, sino que también abre la posibilidad de recuperar aluminio de los electrodos, disminuyendo los costos de operación y tratamiento adicional, generando beneficios económicos directos e indirectos para la PTAR y la comunidad de Huanta.

A nivel social, el ingreso de afluentes con alta turbidez y DQO limita la eficiencia del tratamiento en la PTAR, lo que puede derivar en la liberación de contaminantes en el efluente que se utiliza posteriormente para riego de cultivos, poniendo en riesgo la salud de la población y la seguridad alimentaria. La aplicación de la electrocoagulación al afluente permite reducir significativamente estos contaminantes, mejorando la eficacia del sistema de tratamiento, protegiendo la salud pública y fortaleciendo la confianza de la comunidad en la gestión de aguas residuales, consolidando así la responsabilidad social en el manejo ambiental de la provincia de Huanta.

1.5. IMPORTANCIA

En el ámbito ambiental, con el propósito de contribuir a la reducción de turbidez y DQO del afluente de la planta de tratamiento de agua residual Puca Puca de la Provincia de Huanta alcanzado los niveles permisibles según el Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM, que define los Límites Máximos Permisibles para los efluentes de Plantas de Tratamiento de

Aguas Residuales Domésticas o Municipales. En el ámbito económico, con la finalidad de darle un valor agregado a los desechos de los envases de cerveza de aluminio de la Provincia de Huanta, disminuir la externalidad negativa ocasionado por los remantes de contaminantes en el agua tratada, y generar puestos de trabajo para personas desocupadas reciclando envases de aluminio desechados. En el ámbito social, se fomentará el reciclaje de los envases de aluminio desechados en la Provincia de Huanta generando ingresos económicos para recicladores. En el ámbito teórico, con el propósito de establecer los parámetros óptimos de operación de electrocoagulación del afluente de la PTAR Puca Puca de la Provincia de Huanta

1.6. DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA

La delimitación temática del estudio se centra en la reducción de la turbidez y la demanda química de oxígeno (DQO) de las aguas residuales mediante el proceso de electrocoagulación, evaluando específicamente cómo los parámetros operativos: pH, densidad de corriente, distancia entre electrodos y tiempo de operación, afectan la eficiencia del tratamiento. La investigación se limita a las propiedades fisicoquímicas directamente relacionadas con la calidad del agua: turbidez, DQO, conductividad, pH y temperatura, sin incluir aspectos económicos ni impactos ambientales aguas abajo.

La delimitación espacial se limita al afluente de la PTAR Puca Puca, ubicada en la provincia de Huanta, región de Ayacucho, considerando la entrada de la planta para la toma de muestras y análisis, con coordenadas geográficas de referencia: 12°58'11,8"S y 74°16'22,3"W. PTAR INGRESO COORDENADAS UTM (WGS84, ZONA 18) ESTE:0578968 NORTE:8566151 COTA: 2453 ms.n.m

II. MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES

A nivel internacional

Como señala Muñoz et al. (2021) en su investigación “Electrocoagulación con electrodos de aluminio para tratamiento de aguas residuales de curtiembres en Villapinzón, Cundinamarca, Colombia”:

Evaluó un sistema de electrocoagulación a escala de laboratorio con el propósito de reducir la turbiedad y la DQO mediante ensayos realizados en modo discontinuo durante 45 minutos. Para ello, se trabajó con distintas configuraciones de electrodos planos y perforados (2, 4 y 6 unidades), aplicando una intensidad de corriente de 12 A y un voltaje de 10 V. Los mejores resultados se obtuvieron con 4 electrodos planos, alcanzándose porcentajes de remoción de 99,77 % para turbiedad y 74,18 % para DQO. Asimismo, el uso de electrodos perforados permitió lograr eficiencias cercanas al 98 % en la remoción de turbiedad utilizando únicamente 2 electrodos. Por otro lado, la técnica demostró ser efectiva en la eliminación de sulfuros, registrándose remociones de 45,86 % y 48,21 % con 4 y 6 electrodos, respectivamente. A partir de los resultados obtenidos, se determinó que la configuración más adecuada para el proceso corresponde al empleo de 4 electrodos, ya que un mayor número de estos disminuye la densidad de corriente, incrementa el área de contacto y favorece una disolución excesiva de aluminio.

Chaves (2021) en su tesis “Tratamiento de aguas residuales de la industria cosmética mediante electrocoagulación” analizó:

La influencia del tipo de electrodo, el pH y el tiempo de retención sobre la eficiencia del proceso de electrocoagulación (EC). Los resultados evidenciaron que el tratamiento logró porcentajes de remoción de demanda química de oxígeno (DQO)

de 45,6 %, 53,7 % y 65,0 % a valores de pH de 3, 6 y 8, respectivamente, utilizando electrodos de aluminio (EI-Al) como ánodo. Asimismo, se evaluó el desempeño de electrodos de hierro (EI-Fe), los cuales también presentaron capacidad de tratamiento; sin embargo, su eficiencia fue menor en comparación con los electrodos de aluminio, especialmente en la reducción de la turbiedad y de los compuestos orgánicos volátiles (COV). El tratamiento de EC resultó ser eficaz en la remoción de turbidez logrando la reducción del 77 al 98 % con EI-Al como ánodos y una reducción del 54 al 93 % al utilizar como ánodo EI-Fe. Las mayores eficiencias en la remoción de contaminantes se alcanzaron utilizando electrodos de aluminio como ánodos a un pH de 8, con tiempos de retención de 20 y 30 minutos y una densidad de corriente de 18,5 A/m². Además, mediante el análisis HS-SPME-GC-MS se comprobó que el proceso fue capaz de disminuir la concentración de diversos microcontaminantes tóxicos para la vida acuática presentes en las aguas residuales cosméticas, entre ellos D-limoneno, acetato de hexilo, 1-etil-2-metilbenceno y mesitileno.

Dobrosz et al. (2020) en su investigación “Tratamiento de aguas residuales de la industria del café soluble vía Electrocoagulación - Oxidación Anódica” evaluó de manera experimental:

La influencia del material de los electrodos y del electrolito de soporte sobre la eficiencia del proceso de degradación, considerando la reducción de color, la disminución de la demanda química de oxígeno (DQO) y la formación de sólidos suspendidos totales (SST). Para ello, se emplearon dos tipos de ánodos, grafito y diamante dopado con boro (DDB), así como seis materiales catódicos: acero inoxidable, titanio, hierro, aluminio, grafito y DDB. Asimismo, se utilizaron como electrolitos de soporte NaCl y Na₂SO₄. Los resultados obtenidos fueron contrastados con la normativa ambiental colombiana vigente. Además, en cada sistema evaluado se realizó un análisis integral de costos operacionales, lo que permitió identificar dos configuraciones de electrodos con mayor potencial para la etapa de oxidación avanzada (OA). El sistema DDB–acero inoxidable con Na₂SO₄ presentó la mayor eficiencia, alcanzando una reducción de DQO del 75 %; sin embargo, registró un costo operativo elevado de 12 USD/m. Por otro lado, el sistema grafito–acero inoxidable con NaCl mostró una eficiencia ligeramente menor, con una reducción de DQO del 67 %, aunque con un costo operativo más bajo de 7 USD/m, convirtiéndose en una alternativa más económica.

Mendes (2019) en su tesis “Tratamiento de aguas residuales mediante electrocoagulación acoplada a un MBR para minimizar el ensuciamiento de la membrana y

obtener efluentes de alta calidad” analizó:

El efecto de la densidad de corriente (DC) aplicada sobre la calidad del efluente, las características del lodo y el ensuciamiento de la membrana, comparando los resultados con los obtenidos en un sistema convencional de biorreactor de membrana (MBR). Para evaluar la calidad del efluente, se determinó la eficiencia de remoción de materia orgánica mediante la demanda química de oxígeno (DQO), así como de nutrientes, incluyendo nitrógeno total, amonio y fósforo total. Además, se examinó la reducción de 22 microcontaminantes, entre ellos nueve fármacos, cuatro parabenos, tres hormonas, dos surfactantes, un plastificante, un producto de higiene personal y dos pesticidas. En relación con las propiedades del lodo, se estudiaron parámetros biocinéticos, bioindicadores, sólidos suspendidos (MLSS), viscosidad, índice volumétrico de fangos (IVF), morfología de los flóculos y sustancias poliméricas extracelulares (EPS). Por otro lado, el ensuciamiento de la membrana se evaluó mediante el seguimiento de la evolución de la presión transmembrana (PTM). Finalmente, todos los resultados obtenidos en las diferentes fases experimentales fueron sometidos a análisis estadísticos para establecer comparaciones significativas entre los tratamientos evaluados.

Perozo & Abreu (2017) en su investigación “Evaluación de la electrocoagulación en el tratamiento de agua potable” evaluaron:

Las variables del proceso de electrocoagulación en el tratamiento de aguas crudas usando una celda electrolítica con diferentes configuraciones de ánodo y cátodo. Se realizaron estudios de laboratorio con una celda de 1 L y electrodos de hierro, aluminio y acero inoxidable, generando hidróxidos que actúan como coagulantes. Midieron los porcentajes de remoción de color, turbidez y sólidos totales. Los resultados mostraron que el ánodo de aluminio removió entre 40 % y 80 % de turbidez y color, mientras que el ánodo de hierro removió entre 10 % y 50 %. El análisis de varianza indicó diferencias significativas al cambiar el metal anódico, mostrando una buena correlación entre los hidróxidos formados y la reducción de contaminantes.

A nivel nacional

Tupia & Valerio (2023) en su tesis “Remoción de los contaminantes en efluentes líquidos de una planta textil mediante el método de electrocoagulación”:

Eliminó el color, la DQO y los SST en los efluentes líquidos de una planta textil mediante electrocoagulación. Caracterizó el efluente de TEA, obteniendo los siguientes valores: Color, 547,6; Pt-Co; DQO, 402 mg/L; SST, 156 mg/L; SDT, 1 981,6

mg/L; Turbidez, 83,3 NTU; Conductividad, 3920 μ S/cm y pH, 7,06. Usó un diseño factorial con 2 factores: voltaje (5, 10 y 15 V) y tiempo de tratamiento (15, 30 y 45 min), utilizando 3 electrodos de hierro como ánodo y 3 electrodos de aluminio como cátodo, colocados de forma intercalada con una separación de 10 mm entre las placas, con conexión monopolar en paralelo y a un pH neutro. Logró una remoción de 86,46 % de DQO y 95,74 % de color a 15 voltios y 45 minutos, y una remoción de SST del 82,48 % a 15 V y 30 minutos.

Blas & Conislla (2021) en su tesis “Remoción de solidos totales disueltos y turbidez mediante electrocoagulación y ozonificación de aguas residuales de destilería” investigó:

Cómo los parámetros de operación, como el potencial eléctrico y el tiempo de electrocoagulación, afectan la eliminación de la Demanda Química de Oxígeno (DQO), los Sólidos Totales y la Turbidez en las aguas residuales de destilería. Los resultados mostraron una eliminación de turbidez entre el 58 % y el 88%, una eliminación de Sólidos Totales Suspendidos (SST) entre el 53 % y el 91 %, y una eliminación de DQO entre el 49 % y el 83,7 %, utilizando un potencial eléctrico de 12 V durante 100 minutos.

Arce & Cruz (2019) en su tesis “Tratamiento del efluente industrial de una planta de beneficio de reses, mediante el método de electrocoagulación de flujo a escala piloto” evaluó:

El tratamiento de las aguas residuales de una planta de beneficios de reses mediante el método de electrocoagulación a flujo continuo. Alcanzaron eficiencias del 94 % en la eliminación de turbidez, 21 % en la eliminación de sólidos totales disueltos, 22 % en la reducción de conductividad eléctrica, 51% en la eliminación de demanda bioquímica de oxígeno, 94 % en la eliminación de aceites y grasas, y 63 % en la eliminación de demanda química de oxígeno, bajo condiciones óptimas de operación de 40 amperios y un caudal de 26 L/h usando electrodos de aluminio.

Aguilar (2015) en su tesis “Evaluación de la eficiencia de una celda de electrocoagulación a escala laboratorio para el tratamiento de agua”:

Construyó un reactor de electrocoagulación para evaluar la eficiencia en la remoción de la DQO de aguas residuales provenientes de la industria de pintura. A partir de los resultados obtenidos, estableció que la eficiencia promedio en la eliminación de la DQO fue del 87 %. Estos valores óptimos de operación se lograron con una intensidad de corriente de 5 A, un pH del efluente de 7,12 y un tiempo de tratamiento de 15 minutos.

Calderón & Aramburú (2017) en su investigación “Estudio de la electrocoagulación para controlar la turbidez y el pH en el tratamiento de efluentes minero metalúrgicos polimetálicos” estudió:

La electrocoagulación para controlar la turbidez y el pH. Los resultados antes del tratamiento fueron: absorbancia de 2,223 y 2 769,175 mg/L de sólidos totales suspendidos, con un pH de 10 y una eficiencia del pHmetro del 95 %. Después del tratamiento, la absorbancia fue de 0,045 y 46,68 mg/L de sólidos suspendidos totales, con un pH de 8 y una eficiencia del pHmetro del 98 %. El área fue de 0,0925 m², con un lado del ánodo y cátodo de 0,3041 m², una intensidad de corriente de 86,47 A/m², 2 V y 5 A.

Riccio (2015) en su tesis “Remoción de contaminantes de aguas residuales urbanas del colector agua de las vírgenes por electrocoagulación, a nivel de laboratorio, utilizando como fuente energética un panel fotovoltaico”:

Removió los contaminantes de las aguas residuales urbanas, específicamente del colector “Agua de las Vírgenes” de El Tambo, Huancayo, variando la densidad de corriente y el tiempo de residencia mediante el método de electrocoagulación usando paneles fotovoltaicos. Trató 1,8 litros de agua residual, usando electrodos de aluminio y fierro con una separación de 1 cm y un área superficial de contacto entre los electrodos y la muestra de 0,08253 m². A una densidad de corriente de 32,72 A/m² y un tiempo de 20 minutos, obtuvo los mayores porcentajes de remoción: DBO₅, 86,33 %; DQO, 78,89 %; turbiedad, 92,94 %; aceites y grasas, 96,32 %; conductividad eléctrica, 50,44 %; sólidos totales, 52,91 %; sólidos suspendidos, 88,62 %, dureza total, 86,65 %; dureza cálcica, 83,04 %; coliformes totales, 99,92 % y 99,98 % de *escherichia coli*.

A nivel local no se cuenta con trabajos relacionados al tema de investigación.

2.2. BASES TEÓRICAS

2.2.1. Agua residual

Las aguas residuales son aquellas cuyas propiedades físicas, químicas o biológicas han sido alteradas como consecuencia de las actividades humanas. Debido a la presencia de contaminantes, requieren un tratamiento previo antes de su reutilización, su descarga en cuerpos de agua naturales o su incorporación al sistema de alcantarillado. De acuerdo con su origen, estas aguas se clasifican en industriales, domésticas y municipales. (Arce & Cruz, 2019).

Las aguas residuales domésticas provienen de actividades residenciales y comerciales, y contienen desechos fisiológicos, entre otros, generados por la actividad humana, por lo que deben ser gestionadas de manera adecuada (Chacon & Huampotupa, 2021).

Por otro lado, las aguas residuales industriales son aquellas generadas durante procesos productivos, que incluyen las provenientes de sectores como la minería, la agricultura, la energía y la agroindustria, entre otros (Chacon & Huampotupa, 2021).

Finalmente, las aguas residuales municipales son aquellas domésticas que pueden estar combinadas con aguas de drenaje pluvial o con aguas residuales industriales previamente tratadas, y que son dirigidas a sistemas de alcantarillado de tipo combinado (Chacon & Huampotupa, 2021).

2.2.2. Afluente

Se refiere al agua residual u otro tipo de líquido que es descargado o conducido hacia un cuerpo receptor, un reservorio, una planta de tratamiento o cualquier proceso destinado a su depuración (Cuenca, 2018).

2.2.3. Propiedades fisicoquímicas del agua residual

2.2.3.1. Turbidez

Es una propiedad óptica que provoca la dispersión y absorción de la luz en lugar de su transmisión directa a través de una muestra. Esta turbidez en el agua es causada por partículas suspendidas como arcilla, lodo, sílice, óxido, bacterias y otras. Se utiliza la unidad nefelométrica de turbidez como estándar para medir esta propiedad (Arce & Cruz, 2019).

La turbidez mide la pérdida de transparencia del agua debido a partículas en suspensión y es un indicador de su calidad para el consumo humano. A mayor turbidez, aumenta la presencia de contaminantes microbiológicos y compuestos tóxicos, ya que las partículas pueden alojar bacterias, virus y protozoos patógenos, reduciendo la efectividad de los desinfectantes por la falta de contacto directo con los organismos (Nieto & Huaman, 2019).

2.2.3.2. Sólidos disueltos totales

Estos incluyen sales inorgánicas como calcio, magnesio, sodio y potasio, así como bicarbonatos, sulfatos y cloruros, además de mínimas cantidades de materia orgánica disuelta en el agua. Los sólidos totales disueltos en el agua potable provienen de diversas fuentes naturales (Arce & Cruz, 2019).

2.2.3.3. Sólidos suspendidos totales

Los Sólidos Suspendidos Totales (SST) son las partículas sólidas (orgánicas e

inorgánicas) que flotan o están dispersas en el agua y no están disueltas. Son aquellos que quedan atrapados en un filtro de fibra de vidrio y luego se secan a una temperatura específica (Arce & Cruz, 2019).

2.2.3.4. Demanda química de oxígeno

La demanda química de oxígeno se refiere a la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar la parte orgánica de una muestra que puede ser oxidada por dicromato o permanganato en un ambiente ácido (Arce & Cruz, 2019).

La demanda química de oxígeno representa el oxígeno necesario para oxidar completamente la materia orgánica, tanto biodegradable como no biodegradable. Es un parámetro importante para evaluar la contaminación del agua y la eficiencia de plantas de tratamiento de aguas residuales (Nieto & Huaman, 2019).

2.2.3.5. Conductividad eléctrica

Conductividad eléctrica. Es una medida de la capacidad del agua para conducir la corriente eléctrica. Esta capacidad depende de la cantidad total de sustancias ionizadas disueltas en el agua y de la temperatura en la que se realiza la medición (Arce & Cruz, 2019).

2.2.3.6. pH

El potencial de hidrógeno (pH) es una escala logarítmica que se emplea para determinar la acidez o alcalinidad de soluciones acuosas. En esta escala, que va de 0 a 14, las soluciones ácidas tienen un pH menor a 7, las soluciones básicas tienen un pH mayor a 7, y las soluciones neutras tienen un pH alrededor de 7 (Arce & Cruz, 2019).

2.2.3.7. Temperatura

La temperatura es una característica distintiva de las aguas residuales, ya que suelen ser más cálidas que las aguas no contaminadas. Esto se debe a la mayor actividad bioquímica de los microorganismos presentes, lo que incrementa la temperatura. Además, los vertidos de aguas calientes provenientes de hogares e industrias contribuyen a este aumento. La temperatura del agua es un parámetro crucial porque afecta el desarrollo de la vida acuática, dado que el oxígeno se disuelve menos en agua caliente (Osorio et al., 2021).

2.2.4. Tratamiento de agua residual

2.2.4.1. Tratamiento preliminar

El tratamiento preliminar corresponde a la etapa inicial del proceso de tratamiento de aguas residuales, en la cual se lleva a cabo la remoción de sólidos de gran tamaño, tales

como trapos, palos, materiales flotantes, además de aceites y grasas presentes en el agua. Para esta fase se emplean diferentes dispositivos y operaciones unitarias, entre las que destacan los sistemas de desbaste, cribado, tamizado, desarenadores, trampas de grasas y aceites, así como procesos de preaireación. (Hernández, 2016).

2.2.4.2. Tratamiento primario

El tratamiento primario logra eliminar alrededor del 40 % al 50 % de los constituyentes y es aquí donde se emplean: tanques de sedimentación primario, fosa séptica y flotación por aire disuelto (Hernández, 2016).

2.2.4.3. Tratamiento secundario

El tratamiento secundario tiene como finalidad disminuir los sólidos en suspensión mediante la acción de microorganismos aerobios o anaerobios, alcanzando eficiencias de remoción de entre 85 y 95 % de los contaminantes presentes. Entre los principales procesos que conforman esta etapa se encuentran los sistemas de lodos activados, filtros percoladores, biodiscos, lagunas de estabilización, zanjas de oxidación, reactores anaerobios de flujo ascendente (UASB) y clarificadores secundarios (Hernández, 2016).

2.2.4.4. Tratamiento terciario

El tratamiento terciario o avanzado constituye una etapa complementaria en el tratamiento de aguas residuales, orientada a mejorar la calidad final del efluente mediante la eliminación de aproximadamente el 99,9 % de los patógenos y sólidos suspendidos. Dentro de los procesos más empleados en este nivel de tratamiento destacan la filtración, coagulación-floculación, intercambio iónico, microfiltración, membranas de presión, ultrafiltración, ósmosis inversa, desinfección, oxidación avanzada y adsorción (Hernández, 2016).

2.2.5. Electrocoagulación

La electrocoagulación (EC) es una tecnología electroquímica de tratamiento de aguas residuales que aplica los fundamentos de la coagulación y la floculación mediante un reactor eléctrico, sin requerir agentes químicos. El proceso consiste en hacer pasar corriente continua a través de electrodos metálicos (generalmente de hierro o aluminio) sumergidos en el agua residual; estos electrodos generan cationes que actúan como agentes coagulantes en forma de hidróxidos poliméricos, lo que desestabiliza y permite eliminar material coloidal, sólidos suspendidos, sólidos disueltos y metales presentes en los efluentes. Además, durante el proceso se producen reacciones complementarias, como la

generación de burbujas de hidrógeno y reacciones de oxidación-reducción en los cátodos, que favorecen la flotación y separación de los contaminantes. (Rodríguez-Díaz et al., 2021).

En la literatura científica se describen diversas configuraciones de reactores empleados en los procesos de electrocoagulación. Entre ellas, la más utilizada corresponde al reactor discontinuo, en el cual el ánodo y el cátodo se colocan de manera vertical, sumergidos en el agua residual y conectados a una fuente de energía externa. Asimismo, los electrodos pueden disponerse en configuraciones monopolares o bipolares, dependiendo de las condiciones y requerimientos del proceso (Mendes, 2019).

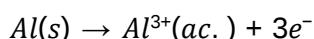
Según Magaña et al (2019) la electrocoagulación se lleva a cabo en varias etapas:

1. Reacciones electrolíticas que ocurren en la superficie de los electrodos (oxidación en el ánodo).
2. Generación de coagulantes en la fase acuosa.
3. Desestabilización y/o adsorción de los contaminantes en los coagulantes (proceso de coagulación).
4. Agregación de las partículas desestabilizadas y formación de flóculos (floculación).
5. Eliminación del material contaminante mediante flotación o sedimentación.

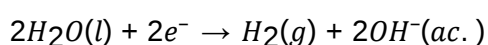
El proceso de desestabilización de los contaminantes, ya sean coloides o material suspendido, se describe en los siguientes pasos: la compresión de la capa difusa debido a las interacciones con los iones generados por la oxidación en el ánodo, y la neutralización de las cargas de las especies presentes en la solución, gracias a los iones de carga opuesta generados en el ánodo. Esto reduce las fuerzas repulsivas entre las partículas, permitiendo que las fuerzas de atracción de Van der Waals predominen, lo que provoca la coagulación. Finalmente, el flóculo se forma a partir de este proceso de coagulación, lo que lleva a la generación de lodo. (Magaña et al, 2019)

De acuerdo con Hasnaoui et al. (2024), las reacciones que ocurren en el ánodo, el cátodo y en la solución con un electrodo de aluminio son las siguientes:

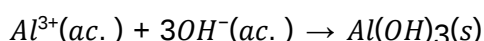
Ánodo:



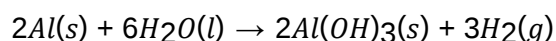
Cátodo:



Hidrólisis posterior:



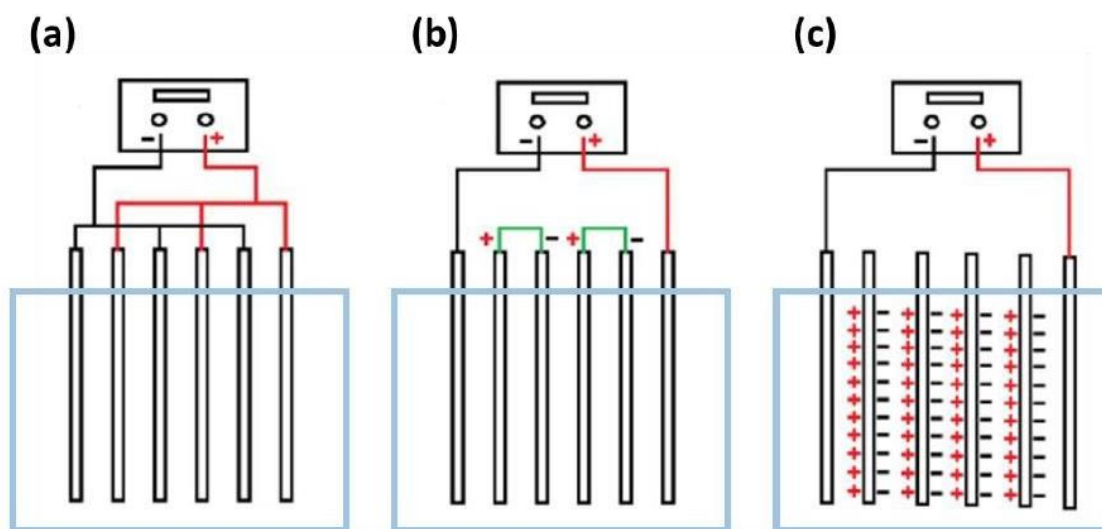
Reacción química global:



Los iones de aluminio reaccionan con los iones oxhidrilo para generar especies monoméricas y poliméricas que, mediante procesos de precipitación, dan lugar a la formación de hidróxido de aluminio. Este compuesto presenta una estructura amorfa y de consistencia gelatinosa, caracterizada por una elevada área superficial y una alta capacidad de adsorción. Estas propiedades favorecen la retención y remoción de partículas contaminantes, lo que hace del hidróxido de aluminio un material altamente eficiente en los procesos de adsorción durante el tratamiento de aguas (Magaña et al, 2019).

Figura 1

Reactores tipo discontinuo con electrodos: (a) Monopolares en paralelo, (b) Monopolares en serie, (c) Bipolares en serie



Nota. Adaptado Hasnaoui et al. (2024)

2.2.6. Celda electroquímica

Una celda electroquímica es un dispositivo experimental que permite interconvertir energía química y energía eléctrica mediante reacciones de oxidación-reducción (redox). Está constituida por dos electrodos —el ánodo, donde ocurre la oxidación (pérdida de electrones), y el cátodo, donde ocurre la reducción (ganancia de electrones)— que se encuentran en contacto con un electrolito, es decir, un medio conductor iónico que permite el transporte de carga entre ambos. Los electrodos se conectan entre sí mediante un circuito externo por el cual fluyen los electrones. Se distinguen dos tipos principales: la celda

galvánica (o voltaica), en la que una reacción redox espontánea genera energía eléctrica, y la celda electrolítica, en la que se aplica energía eléctrica desde una fuente externa para forzar una reacción redox no espontánea (proceso conocido como electrólisis, que es el fundamento de tecnologías como la electrocoagulación). (Chang & Overby, 2020)

2.2.7. Electroodos

Un electrodo es un conductor que permite el flujo de corriente eléctrica hacia o desde un medio no metálico, como una solución electrolítica o un gas. Existen dos tipos de electrodos: el ánodo, donde ocurre la oxidación, es decir, la pérdida de electrones, impulsando la oxidación de impurezas en su superficie; y el cátodo, donde se produce la reducción, es decir, la ganancia de electrones, permitiendo que las impurezas en la celda acepten electrones y se reduzcan. (Alcocer & Cabrera, 2022)

2.2.8. Ventajas

De acuerdo con Mendes (2019), la electrocoagulación (EC) ofrece diversas ventajas frente a los métodos convencionales de tratamiento fisicoquímico. Entre ellas destacan sus menores costos operativos, debido a que no requiere el uso de sales ni polímeros como agentes coagulantes, así como la utilización de equipos de diseño sencillo y fácil operación. Asimismo, este proceso elimina la necesidad de almacenar y dosificar productos químicos, lo que simplifica su implementación. Otra ventaja importante es la generación de menores volúmenes de lodo, con una estructura más compacta, lo que facilita su manejo y reduce las dificultades asociadas a su disposición final. En condiciones normales de operación, el ajuste del pH no resulta indispensable, salvo cuando se presentan valores extremadamente ácidos o alcalinos. Además, los flóculos obtenidos mediante electrocoagulación suelen ser de mayor tamaño y contienen menor cantidad de agua retenida que los producidos por la coagulación química convencional, mejorando así las características del lodo generado. Por otra parte, la electrocoagulación presenta una elevada eficiencia en la eliminación de una amplia variedad de contaminantes. El paso de la corriente eléctrica favorece el desplazamiento y la aglomeración de partículas de pequeño tamaño, incrementando la formación de flóculos y optimizando su remoción. Finalmente, el proceso permite obtener efluentes de alta calidad, ya que las burbujas generadas durante la electrólisis transportan los contaminantes hacia la superficie del agua, facilitando su separación y eliminación.

2.2.9. Desventajas

Según Mendes (2019), los principales inconvenientes en la utilización de la electrocoagulación (EC) son varios, incluyendo la necesidad de reponer los electrodos de

sacrificio, la ineffectividad en la remoción de DBO soluble, la generación de lodos con altas concentraciones de hierro y aluminio, el alto costo en regiones con tarifas eléctricas elevadas y la formación de una capa de óxido en el cátodo que puede disminuir la eficiencia del proceso.

2.2.10. Factores que afectan la electrocoagulación

Son muchos los factores que intervienen en el proceso de electrocoagulación y algunos de estos factores tienen mayor influencia sobre el proceso.

2.2.10.1. Densidad de corriente

La densidad de corriente es la intensidad de corriente eléctrica aplicada por unidad de área de electrodo, expresada comúnmente en A/m^2 o mA/cm^2 . En el proceso de electrocoagulación constituye un parámetro clave, ya que controla la velocidad de las reacciones electroquímicas y la formación de coagulantes e hidróxidos metálicos; además, influye en la producción de burbujas de gas, lo que afecta directamente el crecimiento de los flóculos durante el tratamiento. Es importante señalar que un valor mayor no garantiza mejor desempeño: estudios recientes indican que densidades inferiores a $10 mA/cm^2$ tienden a proporcionar altos niveles de eficiencia de remoción, mientras que valores superiores pueden provocar una disminución en el rendimiento del proceso, debido a fenómenos como la pasivación de los electrodos y el consumo energético excesivo. (Castillo et al., 2025)

2.2.10.2. Distancia entre electrodos

Este parámetro es crucial, ya que la caída de potencial entre ellos influye en los parámetros cinéticos del sistema electroquímico. A medida que se reduce la distancia entre los electrodos, disminuyen tanto el consumo de energía como la resistencia de la solución. Por el contrario, al aumentar la distancia entre los electrodos, se incrementa el consumo de energía debido a la mayor resistencia eléctrica de la solución (Titchou et al., 2020).

2.2.10.3. pH

El pH afecta el rendimiento de la corriente en la solubilidad del metal para producir hidróxido. El pH varía durante la electrocoagulación, dependiendo del material de los electrodos y del pH inicial del agua. En aguas residuales ácidas, el pH puede aumentar debido a la generación de hidrógeno molecular en el cátodo, mientras que, en aguas alcalinas, el pH puede disminuir. El rendimiento del proceso también depende del pH y del tipo de contaminante. Además, ajustar el pH mejora la remoción de turbidez. El pH influye en la disolución del metal, la naturaleza de los coagulantes y la formación de hidróxidos metálicos,

contribuyendo a la adsorción, precipitación o desestabilización y agregación de partículas (Titchou et al., 2020).

2.2.10.4. Conductividad

Para que la electrocoagulación sea efectiva, la solución debe tener una conductividad mínima que permita el flujo eléctrico. Aumentar la conductividad eléctrica también incrementa la densidad de corriente. En el caso de aguas residuales con baja conductividad, se puede añadir una cantidad adecuada de sales, como cloruro y sulfato, para mejorar la conductividad de la solución (Arce & Cruz, 2019).

2.2.10.5. Tiempo

El rendimiento en la remoción de contaminantes está relacionado con el tiempo. A medida que se incrementa el tiempo, también lo hace el rendimiento en la remoción de contaminantes. El hidróxido se forma debido a la disolución del ánodo. A densidad de corriente constante, la cantidad de hidróxido producido aumenta con el tiempo. Un tiempo prolongado de electrólisis resulta en una mayor eficiencia en la eliminación de contaminantes. Sin embargo, si el tiempo de electrólisis supera el tiempo óptimo, el rendimiento no mejora (Arce & Cruz, 2019).

2.3. MARCO LEGAL

2.3.1. Valores máximos admisibles

Es la concentración límite de elementos, sustancias o parámetros físicos y químicos en efluentes no domésticos que se descargan en la red de alcantarillado sanitario, cuyo exceso puede causar daños a la salud, el ambiente y las instalaciones de tratamiento de aguas residuales (MVCS, 2019).

Tabla 1

Valores Máximos Admisibles para las descargas al sistema de alcantarillado

Parámetro	Unidad	Simbología	VMA para descargas al sistema de alcantarillado
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	DBO ₅	500
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	DQO	1 000
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	SST	500
Aceites y Grasas	mg/L	A y G	100

Nota. Adoptado de “Decreto Supremo N.º 010-2019-VIVIENDA: Decreto Supremo que aprueba el Reglamento de Valores Máximos Admisibles (VMA) para las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario” por MVCS, 2019, p. 24. (<https://busquedas.elperuano.pe/dispositivo/NL/1748339-3>)

2.3.2. Límite máximo permisible

Es la concentración o el nivel de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos que caracterizan una emisión, y cuyo excedente puede causar o ser potencialmente perjudicial para la salud, el bienestar humano y el medio ambiente (MINAM, 2010).

Tabla 2

Límites máximos permisibles para los efluentes de PTAR

Parámetro	Unidad	LMP de efluentes para vertidos a cuerpos de aguas
Aceites y Grasas	mg/L	20
Coliformes Termotolerantes	NMP/100 mL	10 000
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	100
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	200
pH	unidad	6,5-8,5
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	150
Temperatura	°C	< 35

Nota. Adoptado de “Decreto supremo N° 003-2010-MINAM: Aprueba Límites Máximos Permisibles para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales” por MINAM, 2010, p. 2. (<https://www.minam.gob.pe/disposiciones/decreto-supremo-n-003-2010-minam/>)

III. METODOLOGÍA

3.1. TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACIÓN

3.1.1. Tipo de investigación

El presente estudio corresponde a una investigación aplicada, ya que tiene como finalidad proponer y evaluar una alternativa práctica y sostenible para la reducción de la turbidez y la Demanda Química de Oxígeno (DQO) de las aguas residuales del afluente de la PTAR Puca Puca.

Según su enfoque, la investigación es cuantitativa, dado que la recolección de datos se fundamenta en la medición numérica de las variables de estudio (turbidez, DQO, densidad de corriente, tiempo de tratamiento y pH) y en el análisis estadístico de los resultados para la contrastación de las hipótesis.

3.1.2. Nivel de investigación

El nivel de investigación es explicativa, ya que se controlaron y manipularon las variables independientes (pH, densidad de corriente, distancia entre electrodos y tiempo de operación) en distintos niveles para estudiar su efecto sobre la reducción de turbidez y demanda química de oxígeno del agua residual.

3.2. MÉTODOS

El trabajo experimental se llevó a cabo en el laboratorio de Química Orgánica de la Facultad de Ingeniería Química y Metalurgia de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga y se desarrolló en siete etapas: elaboración de la matriz de diseño experimental, recolección del agua residual del afluente de la PTAR Puca Puca, caracterización inicial del agua residual, tratamiento primario, instalación de la celda electroquímica, ejecución de los tratamientos según el diseño experimental y evaluación de las características del agua residual tratada. La investigación se condujo bajo el método hipotético-deductivo, con

aplicación del método experimental, dado que se manipularon deliberadamente las variables de operación del proceso de electrocoagulación (densidad de corriente, pH, distancia entre electrodos y tiempo de operación) para observar y cuantificar su efecto sobre la turbidez y la DQO del agua residual. A continuación, se describe cada etapa.

3.3. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

El diseño es experimental, con manipulación deliberada de las variables independientes, medición pre y post tratamiento (preprueba–posprueba) y réplicas de los tratamientos para el control del error experimental.

Se aplicó el diseño de Box-Behnken, con cuatro factores a tres niveles y cuatro réplicas en el centro para obtener la matriz de diseño experimental. Los factores se establecieron en función de la literatura disponible, las cuales fueron: densidad de corriente, pH, distancia entre electrodos y tiempo. Las variables de respuesta seleccionadas fueron la de turbidez y la demanda química de oxígeno.

Tabla 3

Rango y nivel de los factores

Factor	Unidad	Símbolo	Nivel		
			-1	0	1
Densidad de corriente	mA/cm ²	A	20	25	30
pH	-.-	B	6	8	9
Distancia entre electrodos	cm	C	1	1,5	2
Tiempo	min	D	10	15	20

Nota: La relación entre los factores codificados (x_1, x_2, x_3 y x_4) y los factores no codificados (A, B, C y D) se describen mediante la siguiente ecuación:

$$x_1 = \frac{A-25}{10}; \quad x_2 = \frac{B-8}{3}; \quad x_3 = \frac{C-1,5}{1}; \quad x_4 = \frac{D-15}{10} \quad (01)$$

Los factores codificados (x_1, x_2, x_3 y x_4) son adimensionales.

En la tabla 4 se presenta la Matriz de diseño experimental de Box-Behnken para el proceso de electrocoagulación.

Tabla 4*Matriz de diseño experimental de Box-Behnken para el proceso de electrocoagulación*

Corrida	A	B	C	D
1	30	8	1,0	15
2	25	8	2,0	10
3	25	9	1,5	20
4	25	8	1,0	20
5	20	8	2,0	15
6	25	8	1,5	15
7	30	8	1,5	10

Tabla 4*Matriz de diseño experimental de Box-Behnken para el proceso de electrocoagulación
(continuación)*

Corrida	A	B	C	D
8	30	8	2,0	15
9	25	9	2,0	15
10	20	9	1,5	15
11	20	6	1,5	15
12	25	8	1,5	15
13	25	8	1,0	10
14	20	8	1,5	20
15	30	6	1,5	15
16	25	8	1,5	15
17	25	8	1,5	15
18	25	6	1,5	20
19	20	8	1,5	10
20	30	9	1,5	15
21	30	8	1,5	20
22	25	8	2,0	20
23	20	8	1,0	15
24	25	9	1,0	15
25	25	8	1,5	15
26	25	9	1,5	10
27	25	6	1,0	15
28	25	6	1,5	10
29	25	6	2,0	20

3.4. POBLACIÓN Y MUESTRA

3.4.1. Población

La población está constituida por las aguas residuales del afluente (ingreso) de la PTAR Puca Puca del distrito y provincia de Huanta, región de Ayacucho, durante el periodo de ejecución de la investigación.

La población de estudio está ubicada por el afluente de la PTAR Puca Puca de la ciudad de Huanta ($12^{\circ}58'11,8''S$; $74^{\circ}16'22,3''W$), región de Ayacucho.

3.4.2. Muestra

La muestra está compuesta por 2,5 litros de agua residual para cada tratamiento haciendo un total de 72,5 litros para los 29 tratamientos. La recolección de la muestra se llevó a cabo siguiendo los lineamientos establecidos en el "Protocolo de monitoreo de la calidad de los efluentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales", elaborado por la Oficina de Medio Ambiente del Ministerio de Construcción, Vivienda y Saneamiento.

3.5. MUESTREO

3.5.1. Muestreo del afluente

Se aplicó un muestreo no probabilístico por conveniencia, de tipo compuesto. El muestreo del afluente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) Puca Puca se realizó conforme al Protocolo de Monitoreo de la Calidad de los Efluentes de las PTAR Domésticas o Municipales (R.M. N.° 273-2013-VIVIENDA), con el objetivo de garantizar la representatividad de las muestras.

La estación de muestreo fue a la entrada de la PTAR Puca Puca de la ciudad de Huanta, coordenadas UTM (WGS 84, ZONA 18), este: 0578968, norte: 8566151, cota: 2453 ms.n.m, de la región de Ayacucho. Se empleó un muestreo compuesto, recolectando muestras en diferentes momentos del día (mañana y tarde) para captar adecuadamente las variaciones en la carga contaminante del agua residual doméstica. Las muestras fueron tomadas directamente desde el canal de ingreso del afluente a la PTAR, utilizando recipientes limpios y esterilizados, a fin de preservar las condiciones fisicoquímicas del agua en el momento de la recolección.

Figura 2

Muestreo del afluente de la PTAR Huanta



Figura 3

Muestreo del efluente de la PTAR Huanta



3.5.2. Lugar de estudio

La entrada de la planta PTAR Huanta se ubica en las coordenadas UTM (WGS 84, ZONA 18), este: 0578968, norte: 8566151, cota: 2453 ms.n.m. Asimismo, la salida de la planta se encuentra en las coordenadas UTM (WGS 84, ZONA 18), este: 0578904, norte: 8565845, cota: 2415 ms.n.m.

Figura 4

Ubicación de la zona de estudio



Nota. Imagen de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) Puca Puca, ciudad de Huanta, región de Ayacucho, obtenida de Google Maps.

3.6. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS

3.6.1. Técnicas para la recolección de datos

Se emplearon la observación experimental directa y el análisis fisicoquímico de laboratorio. Los parámetros de campo (pH, temperatura y conductividad) se midieron in situ con equipo multiparámetro calibrado; la turbidez y la DQO se determinaron en laboratorio siguiendo los métodos normalizados del SGS. Las técnicas que se utilizaron para la recolección de la información se detallan en la tabla 5.

Tabla 5

Métodos para la recolección de la información

Parámetro	Método
Demanda Química de Oxígeno	Método colorimétrico de reflujo SM 5220 D-1997; EPA 410,4
Turbidez	Método nefelómetro
Intensidad de corriente	Amperometría
pH	Método electrométrico EPA 150,2
Distancia	Medición por método directo entre puntos
Tiempo	Cronometría

3.6.2. Instrumentos para la recolección de datos

Los datos se registraron en fichas de recolección de datos por tratamiento, que consignaron: muestreo, condiciones de operación (voltaje, corriente, densidad de corriente, tiempo), parámetros de campo y resultados analíticos pre y post tratamiento.

Los instrumentos que se utilizaron para la recolección de la información se detallan en la tabla 6:

Tabla 6

Instrumentos para la recolección de la información

Parámetro	Instrumento
Demanda química de oxígeno	Fotómetro multiparamétrico con DQO, HI83399, HANNA
Intensidad de corriente	Fuente de alimentación de corriente continua (0-30 V 0-10 A) HM310T, HANMATEK
pH	Multiparámetro portátil de Hanna, HI98195
Turbidez	Turbidímetro portátil HACH 2100Q
Temperatura	Termómetro digital
Distancia	Micrómetro
Tiempo	Cronómetro digital, PC3860, LEAP

3.6.3. Transporte de la muestra hacia el laboratorio

Una vez recolectadas, las muestras fueron almacenadas en recipientes herméticos de polietileno y conservadas a una temperatura de 4 °C para evitar reacciones biológicas o químicas que pudieran alterar los parámetros analíticos. El transporte hacia el laboratorio se realizó en un tiempo no mayor a 8 horas, cumpliendo con los protocolos de conservación y bioseguridad establecidos por las normas ambientales y de calidad del agua. Este procedimiento garantizó la fiabilidad de los análisis posteriores, tanto en el estado original del afluente como tras su tratamiento por electrocoagulación.

3.6.4. Caracterización físico-química del agua residual

La muestra de agua residual recolectado se guarda de inmediato en un refrigerador a 4 °C para prevenir su deterioro. Posteriormente, se analizan las características del agua residual, como el pH, turbidez y la demanda química de oxígeno.

Figura 5

Equipos para medir (a) pH y (b) turbidez del agua residual

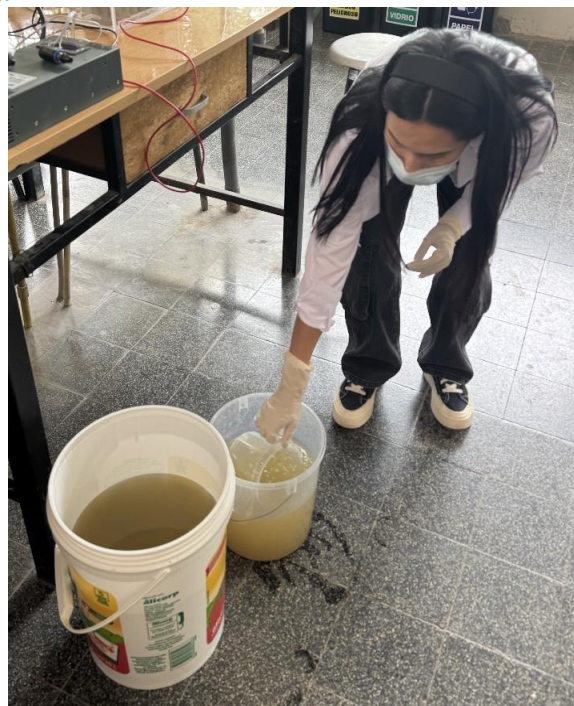


3.6.5. Tratamiento primario

El agua residual se sometió a un proceso de filtración en dos etapas. Primero, se utilizó un colador y un tamiz de 0,075 mm de diámetro para eliminar los sólidos suspendidos más gruesos. Posteriormente, se aplicó un filtro de malla para retener las partículas más finas, asegurando así una mayor claridad y pureza en el agua residual antes de proceder con los tratamientos posteriores.

Figura 6

Agua residual filtrada



3.6.6. Tratamiento de los electrodos

Los materiales del ánodo y del cátodo fueron preparados a partir de láminas de aluminio reciclado de $10 \times 10 \text{ cm}^2$. Para su limpieza, se utilizó papel de lija de grano 60, seguido de un lijado con papel de lija extrafino de grano 400, con el fin de remover la capa de óxido pasivo en la superficie. Posteriormente, los electrodos se limpiaron con un pañuelo de papel para eliminar cualquier partícula residual. A continuación, se sumergieron en ácido sulfúrico concentrado durante 5 minutos, se enjuagaron con abundante agua destilada y se dejaron secar antes de su uso.

3.6.7. Aplicación del proceso de electrocoagulación

El montaje experimental se realizó en una celda electroquímica de acrílico transparente de tipo discontinuo (batch), de 11 cm de ancho $\times$ 22 cm de largo $\times$ 13 cm de altura, con una capacidad total de 3,146 L. El material acrílico se seleccionó por su carácter dieléctrico y su transparencia, que permitió observar en tiempo real la formación de flóculos, la generación de burbujas y la evolución general del proceso durante cada tratamiento; asimismo, el volumen de la celda proporcionó un borde libre suficiente para contener las espumas y los lodos flotados sin riesgo de derrame.

Para cada tratamiento se midieron 2500 mL de agua residual pretratada del afluente de la PTAR Puca Puca empleando una probeta graduada. Antes de verter la muestra en la celda, el pH inicial se ajustó a los niveles establecidos en la matriz de diseño experimental (pH 6 y pH 9), mediante la adición controlada, gota a gota, de soluciones de hidróxido de sodio (NaOH) 0,1 M para elevarlo o de ácido clorhídrico (HCl) 0,1 M para disminuirlo, verificando el valor con un medidor de pH. Los electrodos de aluminio (ánodo y cátodo) se fijaron en el soporte de la base, ubicándolos en el lateral izquierdo y derecho de la celda. Estos electrodos se sumergieron verticalmente en el agua residual, a una profundidad de 1 cm por debajo del nivel del líquido. Estos electrodos fueron conectados en paralelo a una fuente de alimentación de corriente continua mediante cables con pinzas de cocodrilo. La distancia entre los electrodos se ajustó entre 1 y 2 cm en cada tratamiento. Los electrodos fueron conectados a una fuente de alimentación de corriente continua, donde se reguló la intensidad de la corriente para alcanzar la densidad de corriente deseada. Posteriormente, se inició el proceso de electrocoagulación durante intervalos de 10 a 20 minutos. Al finalizar el proceso, se apagó la fuente de alimentación. Después de cada tratamiento, los electrodos fueron limpiados cuidadosamente con agua para eliminar cualquier residuo sólido y luego se secaron.

Figura 7

Configuración experimental para la electrocoagulación

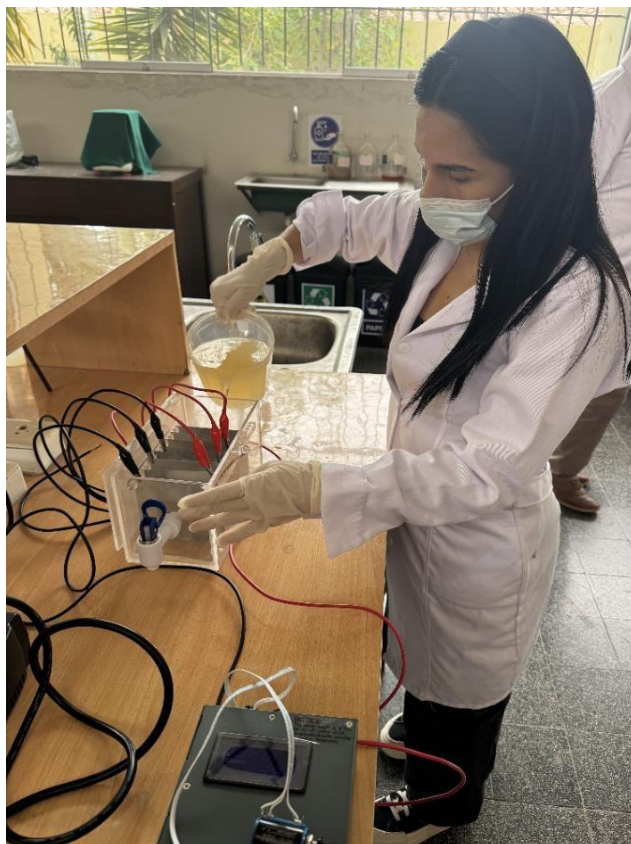


Figura 8

Resultado de un tratamiento experimental mediante el proceso de electrocoagulación



Figura 9

Aspecto del agua residual después del tratamiento por electrocoagulación



3.6.8. Caracterización físico-química del agua tratada

Finalmente, se midieron 100 mL de agua residual tratada, los cuales se dejaron reposar durante 20 minutos para permitir la sedimentación. Después, se filtraron usando un tamiz y se analizaron sus características, como el pH, la turbidez y la demanda química de oxígeno.

3.6.9. Esquema de proceso experimental

El proceso metodológico para reducción de la turbidez y la DQO mediante electrocoagulación de las aguas del afluente de la PTAR PUCA PUCA de la provincia de Huanta, se presenta en la figura 10, en 7 etapas secuenciales.

3.7. TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO DE DATOS

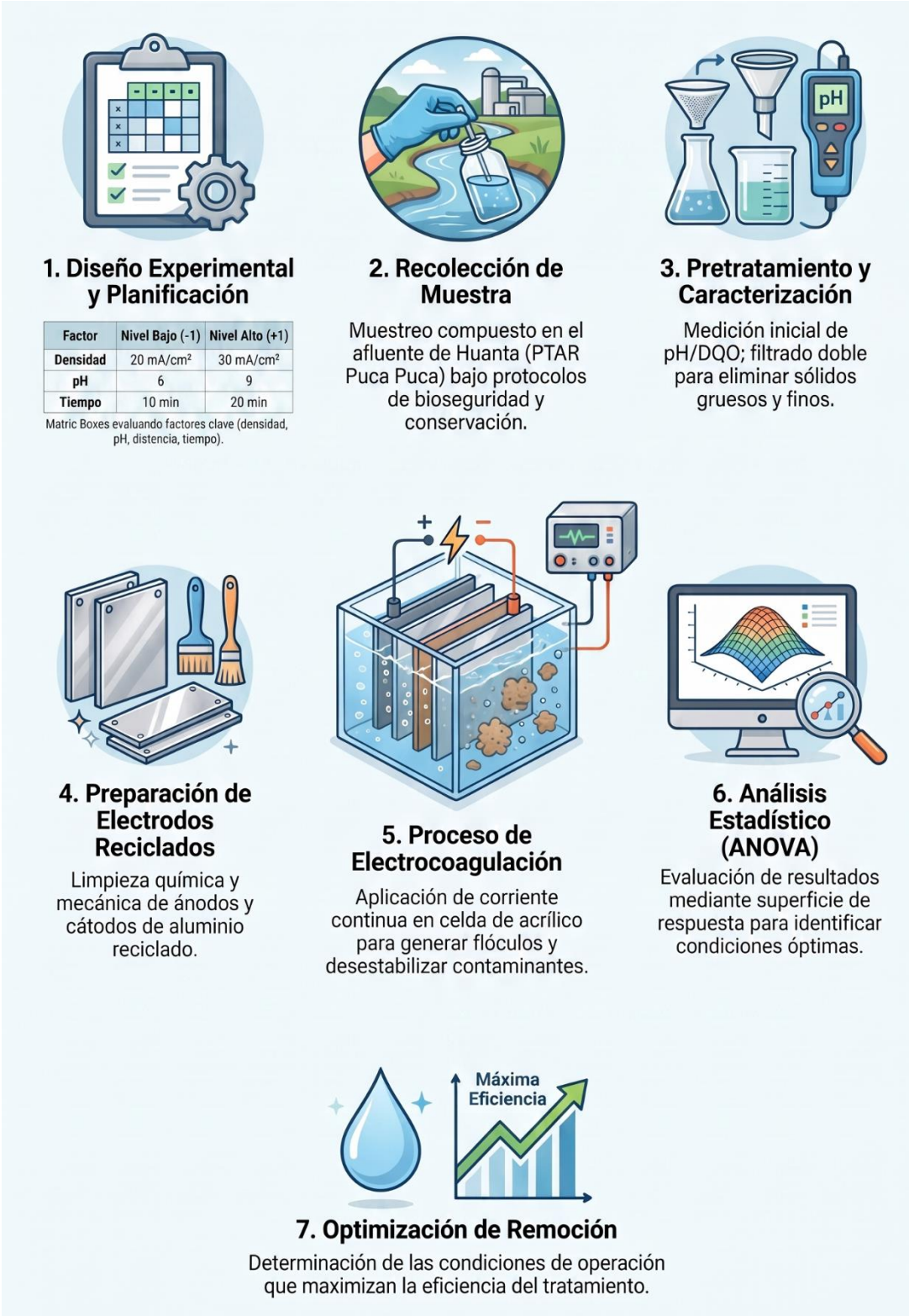
3.7.1. Procesamiento de datos

Una vez recolectadas las muestras del afluente de la PTAR Puca Puca y luego de aplicar el tratamiento mediante electrocoagulación bajo diversas condiciones experimentales, se registraron los valores de los parámetros fisicoquímicos tanto antes como después del proceso. Estos parámetros incluyeron: pH, turbidez, Demanda Química de Oxígeno (DQO), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5), sólidos suspendidos totales (SST), aceites y grasas, conductividad y temperatura. Los datos obtenidos fueron sistematizados en tablas y matrices utilizando herramientas de hoja de cálculo, con el fin de

facilitar su posterior análisis estadístico. Además, se calcularon los porcentajes de remoción de turbidez y DQO para cada tratamiento experimental, lo cual resultó fundamental para identificar las condiciones más efectivas del proceso de electrocoagulación.

Figura 10

Esquema secuencial del proceso experimental



3.7.2. Análisis estadístico

Para evaluar y optimizar el proceso de electrocoagulación, se empleó la metodología de superficie de respuesta (RSM), basada en un diseño experimental Box-Behnken de tres niveles y cuatro factores: pH, densidad de corriente, distancia entre electrodos y tiempo de operación. Este enfoque permitió analizar tanto los efectos individuales como las interacciones entre los factores sobre la eficiencia del tratamiento, orientado específicamente a maximizar la reducción de turbidez y demanda química de oxígeno (DQO). El análisis estadístico se realizó mediante el software Design-Expert versión 12, el cual generó un modelo matemático predictivo cuya validez fue verificada posteriormente mediante tres ensayos experimentales adicionales. Utilizando este mismo software, se profundizó en el análisis de los datos a través de cuatro etapas consecutivas: evaluación de la significancia global del modelo de regresión mediante ANOVA, análisis de la significancia de los coeficientes individuales, verificación de la adecuación del modelo propuesto por medio del estudio de residuos y cálculo del coeficiente de determinación (R^2), y finalmente, la optimización de las variables del proceso para alcanzar la máxima eficiencia en la remoción de contaminantes.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 7

Propiedades físicas y químicas del afluente de la PTAR Huanta

Descripción	Unidad	Valor
Turbidez	NTU	119
Demanda química de oxígeno	mg/L	417,7
Demanda bioquímica de oxígeno	mg/L	166,2
Coliformes termotolerantes	NMP/100mL	920 000
Aceites y grasas	mg/L	6,1
Sólidos totales suspendidos	mg/L	166
pH	-.-	7,08

Nota. El análisis se realizó en la empresa SGS.

Según la Tabla 7, el afluente de la PTAR Huanta presenta valores que superan los límites permisibles en varios parámetros. La Demanda Química de Oxígeno (417,7 mg/L) cumple con el VMA para descargas al sistema de alcantarillado, pero no cumple con el LMP de efluentes para vertidos a cuerpos de aguas. La Demanda Bioquímica de Oxígeno (166,2 mg/L) cumple con el VMA para descargas al sistema de alcantarillado, pero no cumple con el LMP de efluentes para vertidos a cuerpos de aguas. Los Coliformes Termotolerantes (920 000 NMP/100mL) no cumplen con el LMP de efluentes para vertidos a cuerpos de aguas. Los Aceites y Grasas (6,1 mg/L) cumplen con ambos, VMA para descargas al sistema de alcantarillado y LMP de efluentes para vertidos a cuerpos de aguas. Los Sólidos Totales Suspendidos (166 mg/L) cumplen con el VMA para descargas al sistema de alcantarillado, pero no cumplen con el LMP de efluentes para vertidos a cuerpos de aguas. El pH (7,08) cumple con el LMP de efluentes para vertidos a cuerpos de aguas.

Según la Tabla 8, el efluente de la PTAR Huanta presenta resultados que indican cumplimiento con algunos parámetros y no con otros. La Demanda Química de Oxígeno (275,7 mg/L) y la Demanda Bioquímica de Oxígeno (100,9 mg/L) cumplen con el VMA para descargas al sistema de alcantarillado, pero solo la Demanda Química de Oxígeno y no la Demanda Bioquímica de Oxígeno cumplen con el límite permisible cercano en este caso para vertidos a cuerpos de aguas. Los Coliformes Termotolerantes (35 000 NMP/100mL) no cumplen con el LMP de efluentes para vertidos a cuerpos de aguas. Los Aceites y Grasas (< 0,4 mg/L) cumplen con ambos límites. Los Sólidos Totales Suspendidos (76 mg/L) cumplen con ambos límites, y el pH (7,10) cumple con el LMP de efluentes para vertidos a cuerpos de aguas.

Tabla 8

Propiedades físicas y químicas del efluente de la PTAR Huanta

Descripción	Unidad	Valor
Turbidez	NTU	98,2
Demanda química de oxígeno	mg/L	275,7
Demanda bioquímica de oxígeno	mg/L	100,9
Coliformes termotolerantes	NMP/100mL	35000
Aceites y grasas	mg/L	< 0,4
Sólidos totales suspendidos	mg/L	76
pH	-.-	7,10

Nota. El análisis se realizó en la empresa SGS.

Tabla 9

Estandarización de la solución de NaOH 0,5 M

Descripción	Unidad	Valor
Masa de $C_8H_5O_4K$	g	4,30
Volumen gastado de NaOH	mL	45,200
Concentración de NaOH	mol/L	0,466

Nota. El análisis se realizó por duplicado.

Según la Tabla 9, la concentración promedio de la solución de NaOH fue de 0,466 M.

Tabla 10*Estandarización de la solución de HCl 0,5 M*

Descripción	Unidad	Valor
Masa de Na_2CO_3	g	1,100
Volumen gastado de HCl	mL	37,800
Concentración de HCl	mol/L	0,549

Nota. El análisis se realizó por duplicado.

Según la Tabla 10, la concentración promedio de la solución de HCl fue de 0,549 M.

Tabla 11*Volumen de NaOH y HCl requerido para ajustar el pH del agua residual*

Descripción	Unidad	Valor
Volumen de HCl	mL	0,02
Volumen de NaOH	mL	0,02
Volumen de NaOH	mL	0,20

Según la Tabla 11, para modificar el pH de 10 L de agua residual de 7,08 a 6 se usaron 0,020 mL de HCl, y para elevarlo a 8 y 9 se necesitaron 0,02 mL y 0,20 mL de NaOH, respectivamente. El volumen de 0,02 mL se midió aproximadamente con una micropipeta.

Tabla 12*Eficiencia de remoción de turbidez registrada en los ensayos experimentales*

Corrida	A	B	C	D	y
1	30	8	1,0	15	30,1
2	25	8	2,0	10	45,2
3	25	9	1,5	20	49,0
4	25	8	1,0	20	47,9
5	20	8	2,0	15	34,4
6	25	8	1,5	15	57,7
7	30	8	1,5	10	40,7
8	30	8	2,0	15	34,4
9	25	9	2,0	15	48,2
10	20	9	1,5	15	33,3
11	20	6	1,5	15	36,3

Tabla 12

Eficiencia de remoción de turbidez registrada en los ensayos experimentales (continuación)

Corrida	A	B	C	D	y
12	25	8	1,5	15	59,0
13	25	8	1,0	10	48,0
14	20	8	1,5	20	33,0
15	30	6	1,5	15	33,6
16	25	8	1,5	15	58,3
17	25	8	1,5	15	58,3
18	25	6	1,5	20	45,8
19	20	8	1,5	10	34,6
20	30	9	1,5	15	30,0
21	30	8	1,5	20	30,4
22	25	8	2,0	20	53,0
23	20	8	1,0	15	34,4
24	25	9	1,0	15	36,3
25	25	8	1,5	15	57,7
26	25	9	1,5	10	42,8
27	25	6	1,0	15	43,3
28	25	6	1,5	10	47,4
29	25	6	2,0	20	44,5

Nota. "y", es la remoción de turbidez en porcentaje.

Tabla 13

Modelo secuencial de suma de cuadrados

Fuente	Suma de cuadrados	df	Cuadrado medio	valor-F	valor-P
Media vs Total	53 672,61	1	53 672,61		
Lineal vs Media	36,77	4	9,19	0,0872	0,9856
2FI vs Lineal	68,21	6	11,37	0,0831	0,9973
Cuadrático vs 2FI *	2 332,05	4	583,01	62,83	< 0,0001
Cúbico vs Cuadrático **	125,63	9	13,96	16,28	0,0034
Residual	4,29	5	0,8573		
Total	56 239,56	29	1 939,3		

Nota. * Sugerido por el programa Design Expert. ** Presencia de alias. Residual, muestra la variación en la respuesta no explicada por el modelo cúbico. El nivel de significancia se fijó en 5 %, un valor conservador considerando la naturaleza experimental de la evaluación de la electrocoagulación para la reducción de turbidez y DQO del afluente de la PTAR Puca Puca.

Según la Tabla 13, el modelo cuadrático presenta un valor-F de 62,83 y un valor-P menor a 0,0001, lo que indica que es estadísticamente significativo al nivel del 95 % de confianza. Esto sugiere que el modelo cuadrático explica una parte considerable de la variación en la respuesta y es adecuado para describir el comportamiento del sistema. Además, este modelo no presenta alias, lo que significa que todos sus términos han sido estimados de forma independiente.

Por otro lado, el modelo cúbico presenta alias, lo cual indica que no existen suficientes puntos de diseño únicos para estimar de manera independiente todos los coeficientes del modelo. A pesar de que su valor-F (16,28) y valor-P (0,0034) también indican significancia estadística, la presencia de alias limita su confiabilidad.

Tabla 14

Prueba de falta de ajuste

Fuente	Suma de cuadrados	df	Cuadrado medio	valor-F	valor-P
Lineal	2 529,02	20	126,45	436,04	< 0,0001
2FI	2 460,8	14	175,77	606,11	< 0,0001
Cuadrático *	128,75	10	12,88	44,4	0,0012
Cúbico **	3,13	1	3,13	10,78	0,0304
Error puro	1,16	4	0,29		

Nota. * Sugerido por el programa Design Expert. ** Presencia de alias.

Según la Tabla 14, el modelo cuadrático presenta un valor-F de 44,4 y un valor-P de 0,0012 en la prueba de falta de ajuste, lo que indica que la falta de ajuste es estadísticamente significativa al 95 % de confianza. Esto sugiere que, aunque el modelo cuadrático es mejor que los modelos lineal y 2FI (como se observó en la Tabla 13), aún presenta una diferencia significativa entre los valores predichos y los datos experimentales no explicada por el error puro.

Por lo tanto, su ajuste a los datos no es completamente adecuado. Cabe destacar que el modelo cúbico, a pesar de tener un valor-F de 10,78 y un valor-P de 0,0304, presenta alias, lo que compromete la interpretación de sus resultados.

Tabla 15*Resumen de los modelos estadísticos*

Fuente	Desviación estándar	R^2	R^2 ajustado	R^2 predicho	PRESS
Lineal	10,27	0,0143	-0,15	-0,3124	3 368,81
2FI	11,7	0,0409	-0,4919	-1,1961	5 637,16
Cuadrático *	3,05	0,9494	0,8988	0,6907	793,91
Cúbico **	0,9259	0,9983	0,9906		

Nota. * Sugerido por el programa Design Expert. ** Presencia de alias. Se concentra en el modelo que maximiza el R^2 ajustado y el R^2 predicho.

Según la Tabla 15, la precisión del modelo ajustado se evaluó utilizando el coeficiente de determinación (R^2). Para el modelo cuadrático, el valor de R^2 fue de 0,9494, lo que indica que el 94,94 % de la variación en la eficiencia de remoción de turbidez alrededor de la media es explicada por las variables independientes: densidad de corriente, pH, distancia entre electrodos y tiempo. El 5,06 % restante se atribuye a otras fuentes, como errores experimentales o factores no considerados en el modelo.

El R^2 ajustado del modelo cuadrático fue de 0,8988, valor superior al umbral aceptable de 0,7, lo que confirma que el modelo se ajusta adecuadamente a los datos, considerando el número de variables y el tamaño de la muestra.

El R^2 predicho fue de 0,6907, lo que indica que el modelo cuadrático puede explicar aproximadamente el 69,07 % de la variación en la eficiencia de remoción de turbidez al predecir nuevas observaciones. Este valor está razonablemente cercano al R^2 ajustado (diferencia menor a 0,2), lo cual, según el criterio del software Design Expert, sugiere que el modelo posee buena capacidad predictiva.

La desviación estándar del modelo cuadrático fue de 3,05, considerablemente menor que en los modelos lineal y 2FI, lo que refuerza su precisión. Además, el valor de PRESS (793,91) fue mucho menor que en los modelos alternativos, indicando un mejor ajuste general. Aunque el modelo cúbico mostró valores aún mejores de R^2 (0,9983) y R^2 ajustado (0,9906), no se considera confiable debido a la presencia de alias, lo que implica que no se pudieron estimar de forma independiente todos los coeficientes. Por tanto, el modelo cuadrático es el más adecuado para describir y predecir el comportamiento del estudio.

Según la Tabla 16, El valor-F del modelo cuadrático es 18,76, lo que indica que el modelo es significativo. Esto significa que al menos uno de los términos incluidos en el modelo contribuye de manera significativa a explicar la variación en el rendimiento de la

remoción de la turbidez. El valor-P asociado al modelo es menor a 0,0001, lo que indica que hay una probabilidad muy baja (menor al 0,01 %) de que este valor-F se deba al azar, con un nivel de confianza del 95 %. Debe notarse que el valor-P representa la probabilidad de error y se utiliza para evaluar la significancia de cada coeficiente de regresión individualmente. De acuerdo con los valores-F y valores-P de la tabla, solo los términos cuadráticos A^2 , B^2 , C^2 y D^2 son significativos al nivel de confianza del 95 % (valores-P < 0,05), es decir, estos contribuyen de manera significativa a explicar la variación en el rendimiento de la remoción de turbidez. Los términos lineales (A, B, C, D) y las interacciones (AB, AC, AD, BC, BD, CD) no resultaron significativos, ya que sus valores-P son mayores a 0,05.

Tabla 16

ANOVA para el modelo cuadrático

Fuente	Suma de cuadrados	df	Cuadrado medio	valor-F	valor-P
Modelo	2437,04	14	174,07	18,76	< 0,0001
A	3,8	1	3,8	0,4091	0,5327
B	16,21	1	16,21	1,75	0,2074
C	24,7	1	24,7	2,66	0,125
D	0,1145	1	0,1145	0,0123	0,9131
AB	0,0967	1	0,0967	0,0104	0,9202
AC	4,62	1	4,62	0,4981	0,4919
AD	18,92	1	18,92	2,04	0,1752
BC	4,29	1	4,29	0,4625	0,5076
BD	5,69	1	5,69	0,6136	0,4465
CD	22,74	1	22,74	2,45	0,1398
A^2	2 154,05	1	2 154,05	232,13	< 0,0001
B^2	369,23	1	369,23	39,79	< 0,0001
C^2	248,42	1	248,42	26,77	0,0001
D^2	108,5	1	108,5	11,69	0,0041
Residual	129,91	14	9,28		
Falta de ajuste	128,75	10	12,88	44,4	0,0012
Error puro	1,16	4	0,29		
Total	2 566,95	28			

Nota. Residual, muestra la variación en la respuesta no explicada por el modelo cuadrático. Falta de ajuste, es la cantidad que las predicciones del modelo pierden las observaciones. Error puro, es la cantidad de diferencia entre las repeticiones ejecutadas. Cor Total, es la cantidad de variación alrededor de la media de las observaciones, el modelo explica parte de él, el residual explica el resto.

El modelo cuadrático, expresado en términos de factores codificados (ecuación 12) y no codificados (ecuación 13), permite predecir la remoción de turbidez para diferentes niveles de cada factor.

$$y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_3x_3 + \beta_4x_4 + \beta_{12}x_1x_2 + \beta_{13}x_1x_3 + \beta_{14}x_1x_4 + \beta_{23}x_2x_3 + \beta_{24}x_2x_4 + \beta_{34}x_3x_4 + \beta_{11}x_1^2 + \beta_{22}x_2^2 + \beta_{33}x_3^2 + \beta_{44}x_4^2 \quad (12)$$

$$y = \beta_0 + \beta_1A + \beta_2B + \beta_3C + \beta_4D + \beta_{12}AB + \beta_{13}AC + \beta_{14}AD + \beta_{23}BC + \beta_{24}BD + \beta_{34}CD + \beta_{11}A^2 + \beta_{22}B^2 + \beta_{33}C^2 + \beta_{44}D^2 \quad (13)$$

Tabla 17

Coefficientes estimados de regresión del modelo cuadrático

Coefficiente estimado	Valor en términos de factores codificados	Valor en términos de factores no codificados
β_0	59,44	-666,29076
β_1	-0,6	37,18457
β_2	-1,2	52,41944
β_3	1,65	42,0163
β_4	-0,101	4,66724
β_{12}	0,15	0,02
β_{13}	1,07	0,43
β_{14}	-2,18	-0,087
β_{23}	1,12	1,48695
β_{24}	1,1	0,146132
β_{34}	2,3	0,921106
β_{11}	-18,4	-0,735891
β_{22}	-8,72	-3,87595
β_{33}	-6,2	-24,81284
β_{44}	-4,16	-0,166336

Según la Tabla 17, los coeficientes de la ecuación con factores codificados indican la influencia relativa de cada término en la respuesta, facilitando la identificación de los factores con mayor impacto. En esta escala codificada, los factores A, B, C y D con valores cercanos a cero corresponden al centro del diseño experimental, donde generalmente se busca optimizar la respuesta. Sin embargo, debido a los coeficientes cuadráticos negativos para A², B², C² y D², la respuesta presenta un máximo cerca del centro, indicando que ajustar los factores hacia esos valores centrales puede maximizar la respuesta.

Por otro lado, los coeficientes en la ecuación con factores no codificados muestran el efecto real y la dirección (positivo o negativo) de cada factor y sus interacciones sobre la respuesta en unidades originales. Coeficientes positivos indican que un aumento en ese factor tiende a incrementar la respuesta, mientras que coeficientes negativos sugieren un efecto disminuyente sobre la respuesta.

Tabla 18

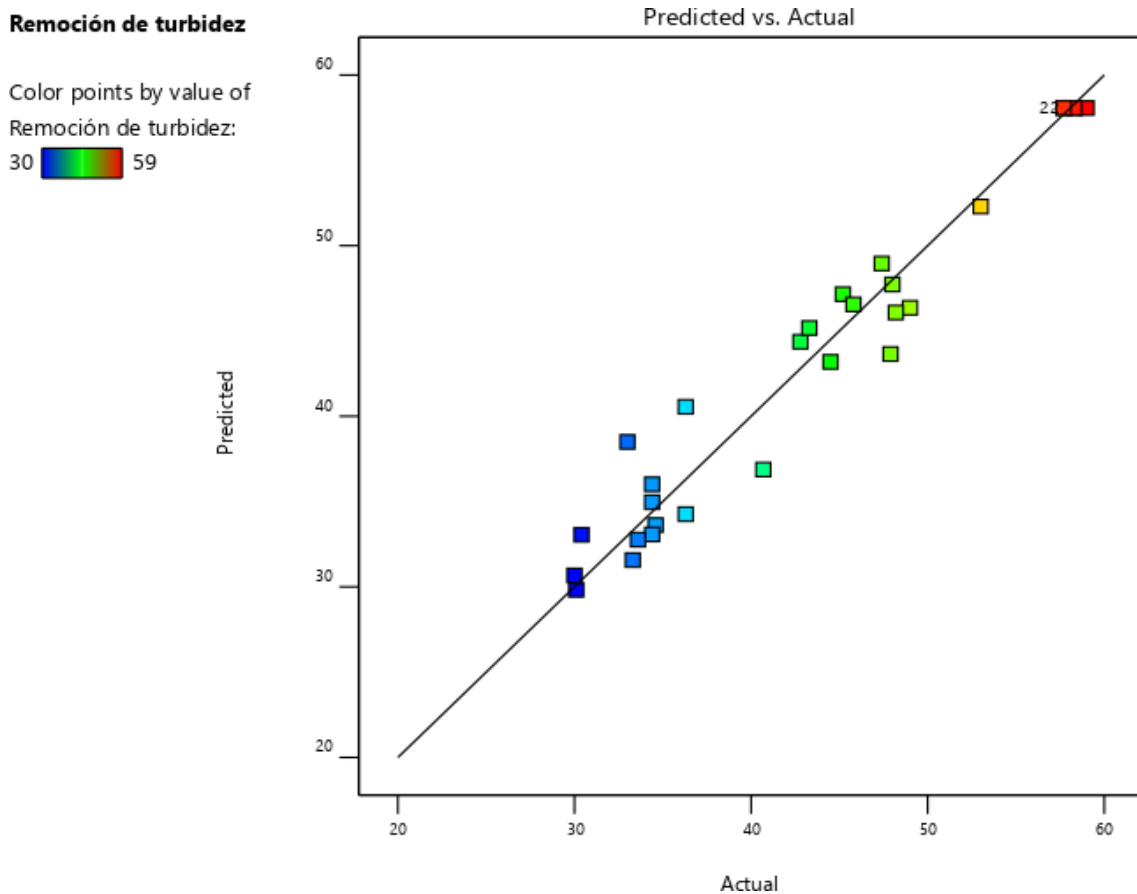
Valores predichos de remoción de turbidez

Corrida	A	B	C	D	y	y_p
1	30	8	1,0	15	30,1	29,82
2	25	8	2,0	10	45,2	47,16
3	25	9	1,5	20	49,0	46,36
4	25	8	1,0	20	47,9	43,65
5	20	8	2,0	15	34,4	34,96
6	25	8	1,5	15	57,7	58,07
7	30	8	1,5	10	40,7	36,87
8	30	8	2,0	15	34,4	36,01
9	25	9	2,0	15	48,2	46,08
10	20	9	1,5	15	33,3	31,57
11	20	6	1,5	15	36,3	34,26
12	25	8	1,5	15	59,0	58,07
13	25	8	1,0	10	48,0	47,73
14	20	8	1,5	20	33,0	38,50
15	30	6	1,5	15	33,6	32,76
16	25	8	1,5	15	58,3	58,07
17	25	8	1,5	15	58,3	58,07
18	25	6	1,5	20	45,8	46,56
19	20	8	1,5	10	34,6	33,62
20	30	9	1,5	15	30,0	30,67
21	30	8	1,5	20	30,4	33,05
22	25	8	2,0	20	53,0	52,29
23	20	8	1,0	15	34,4	33,07
24	25	9	1,0	15	36,3	40,55
25	25	8	1,5	15	57,7	58,07
26	25	9	1,5	10	42,8	44,37
27	25	6	1,0	15	43,3	45,18
28	25	6	1,5	10	47,4	48,95
29	25	6	2,0	20	44,5	43,19

Nota. **y_p**, es la remoción de turbidez predicha en porcentaje.

Figura 11

Gráfico de los valores predichos y reales de remoción de turbidez



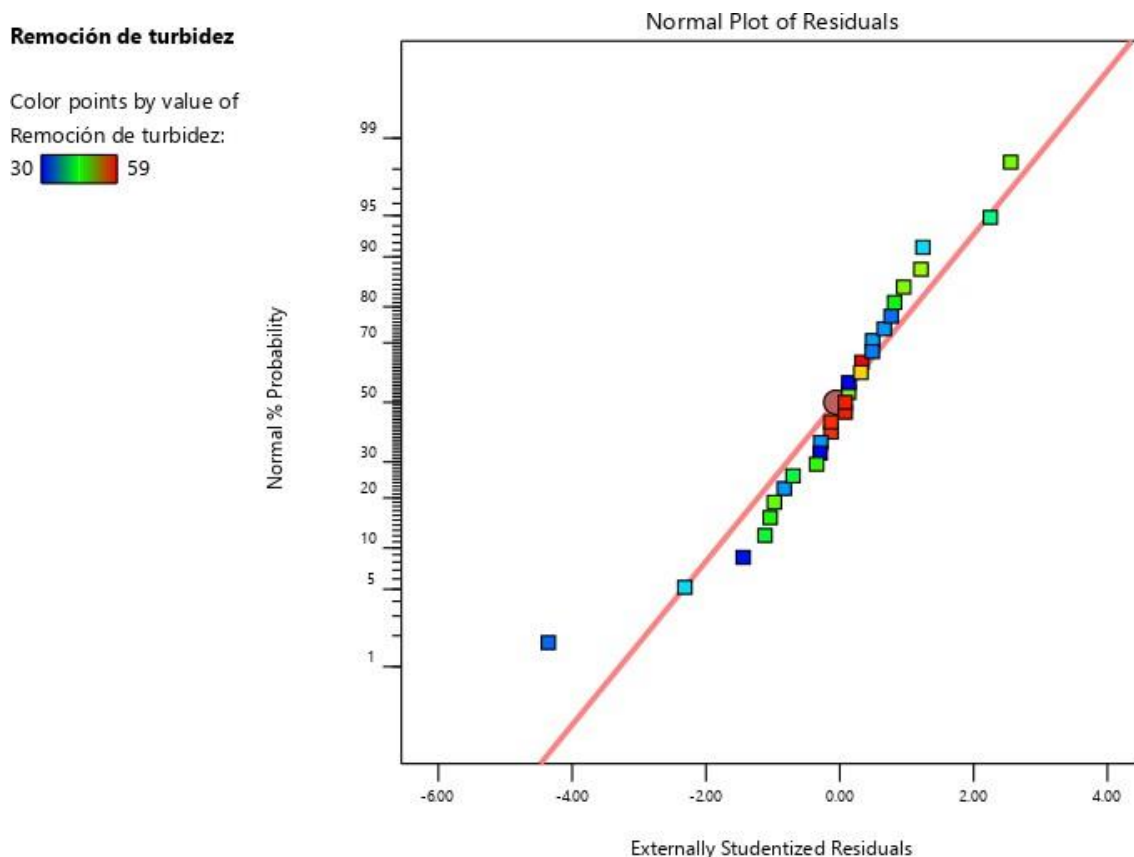
Nota. Valores predichos y experimentales de remoción de turbidez.

La precisión del modelo se evaluó mediante la comparación entre los valores de remoción de turbidez predichos y los valores experimentales obtenidos. La Figura 11 muestra una relación lineal entre la eficiencia de remoción de turbidez predicha y la experimental, lo que indica que el ajuste del modelo cuadrático es adecuado.

Según la Figura 12, la línea recta indica que los residuos se distribuyen normalmente. Además, la desviación máxima y mínima de estos residuos es de sólo ± 5 , lo que evidencia que el modelo presenta una discrepancia mínima entre los valores ajustados y los observados.

Figura 12

Gráfico de la normalidad de los residuos para la remoción de turbidez



Nota. Distribución de los valores residuales, definidos como la diferencia entre los valores ajustados (modelo) y los valores observados (experimentales).

Según la Figura 13, se observa que un bajo pH da como resultado baja remoción de turbidez, debido a la formación predominante de especies monoméricas como Al^{3+} y $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$, las cuales no favorecen la formación de flóculos estables. A un pH alto, también se obtiene una baja remoción de turbidez, ya que se generan especies solubles como $\text{Al}(\text{OH})_4^-$, que inhiben la formación de flóculos, reduciendo así la eficiencia del proceso. El rendimiento óptimo se alcanza cerca de la neutralidad, donde se forma $\text{Al}(\text{OH})_3$, un flóculo insoluble que mejora significativamente la remoción de contaminantes.

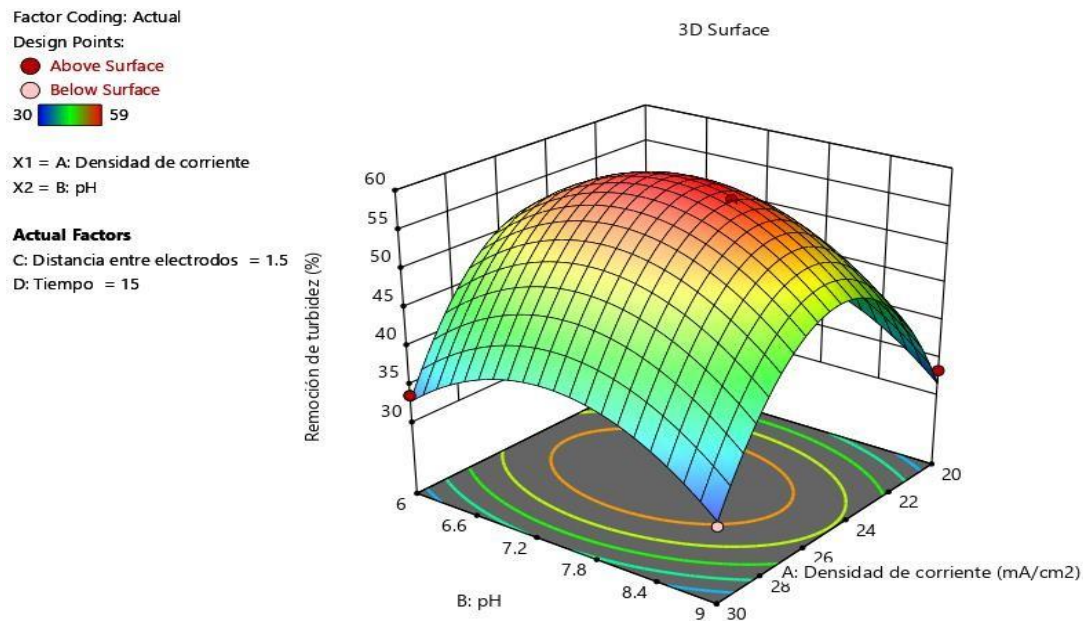
De manera similar, según la Figura 13, se observa que una baja densidad de corriente da como resultado baja remoción de turbidez, debido a la limitada disolución del ánodo y, por lo tanto, a la baja producción de especies coagulantes necesarias para la formación de flóculos. A una alta densidad de corriente, también se presenta baja remoción de turbidez, ya que el exceso de corriente puede inducir reacciones secundarias, como la redispersión de coloides o la degradación de flóculos ya formados, además de aumentar el consumo energético y acelerar el desgaste de los electrodos. Por ello, existe un valor óptimo de

densidad de corriente que maximiza la eficiencia del proceso de electrocoagulación.

El pico de la gráfica representa la mayor remoción de turbidez, la cual se alcanza a un pH de 8 y una densidad de corriente de 25,45 mA/cm².

Figura 13

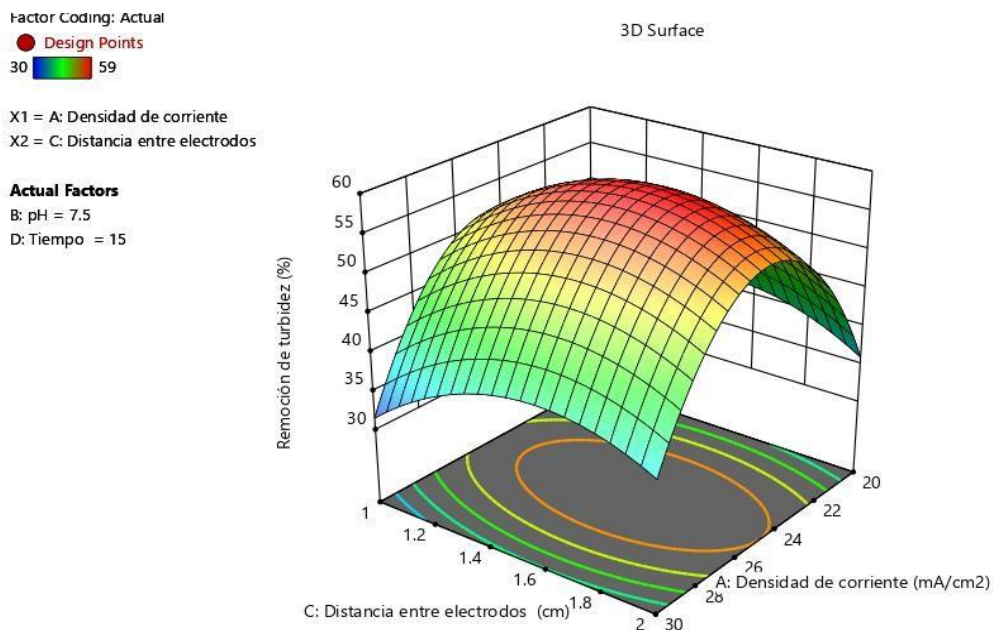
Superficie respuesta de remoción de turbidez en función al pH y densidad de corriente



Nota. Efecto de la interacción entre el pH y la densidad de corriente en la remoción de turbidez.

Figura 14

Superficie respuesta de remoción de turbidez en función a la distancia entre electrodos y densidad de corriente



Nota. Efecto de la interacción entre la distancia entre electrodos y densidad de corriente en la remoción de turbidez.

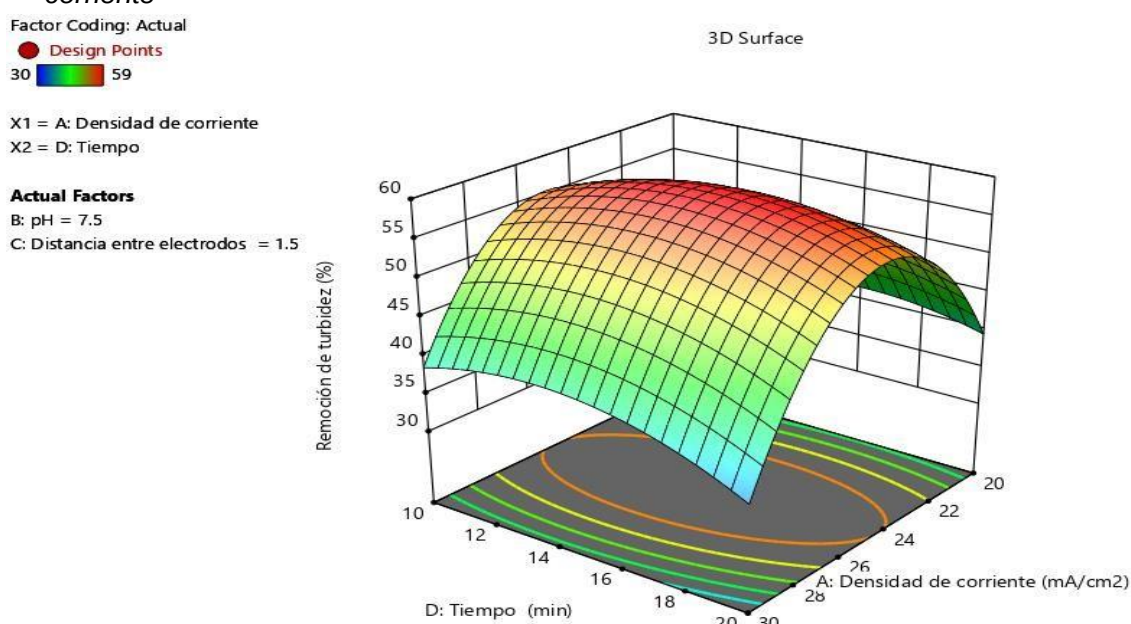
Según la Figura 14, se observa que una baja distancia entre electrodos da como resultado baja remoción de turbidez, ya que la intensa atracción electrostática y la turbulencia generada por las burbujas de gas provocan la desintegración de los flóculos formados, disminuyendo la eficiencia del proceso. A una alta distancia entre electrodos, también se obtiene baja remoción de turbidez, debido a que la menor interacción entre oxidantes y coagulantes, junto con el aumento en el tiempo de viaje de los iones y la disminución de la atracción electrostática, limita la formación efectiva de flóculos. Por lo tanto, la eficiencia óptima se alcanza a una distancia intermedia, donde se logra un equilibrio entre la formación de flóculos y la estabilidad del campo eléctrico.

De manera similar, según la Figura 14, se observa que una baja densidad de corriente da como resultado baja remoción de turbidez, debido a la limitada disolución del ánodo y, por lo tanto, a la baja producción de especies coagulantes necesarias para la formación de flóculos. A una alta densidad de corriente, también se presenta baja remoción de turbidez, ya que el exceso de corriente puede inducir reacciones secundarias, como la redispersión de coloides o la degradación de flóculos ya formados, además de aumentar el consumo energético y acelerar el desgaste de los electrodos. Por ello, existe un valor óptimo de densidad de corriente que maximiza la eficiencia del proceso de electrocoagulación.

El pico de la gráfica representa la mayor remoción de turbidez, la cual se alcanza a una distancia entre electrodos de 1,59 cm y una densidad de corriente de 25,45 mA/cm².

Figura 15

Superficie respuesta de remoción de turbidez en función al tiempo y densidad de corriente



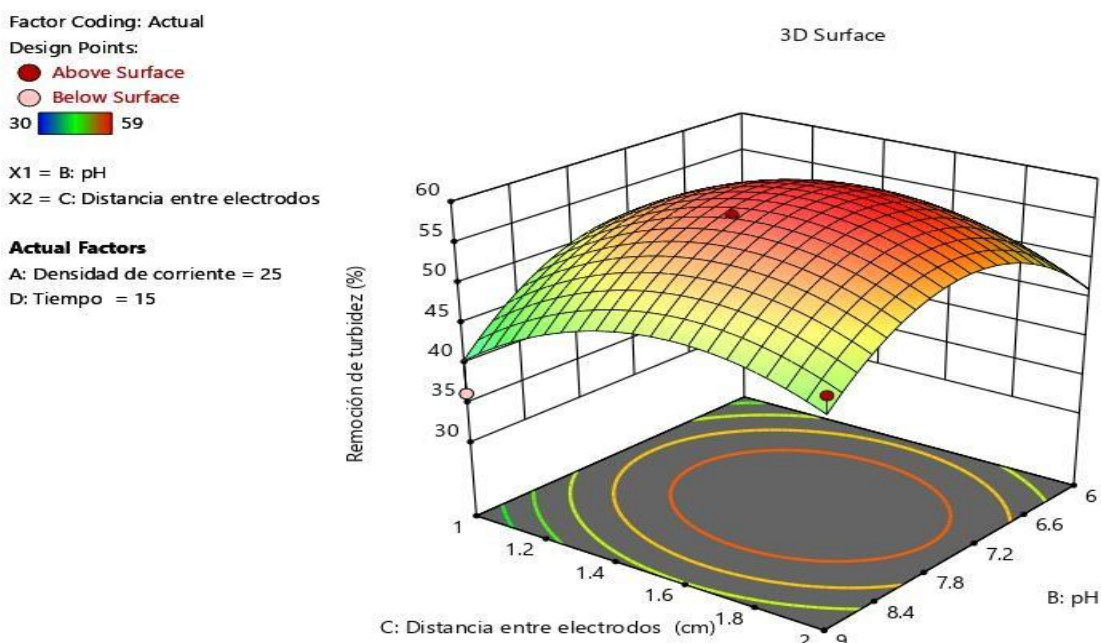
Nota. Efecto de la interacción entre el tiempo y la densidad de corriente en la remoción de turbidez.

Según la Figura 15, se observa que un bajo tiempo de electrólisis da como resultado baja remoción de turbidez, ya que no se generan suficientes especies coagulantes ni se logra un contacto efectivo entre los flóculos y los contaminantes. A un alto tiempo de electrólisis, también se presenta baja remoción de turbidez, debido a que, una vez superado el tiempo óptimo, el exceso de coagulantes no mejora la eficiencia del proceso e incluso puede provocar la desorción de contaminantes previamente adsorbidos, reduciendo así la eficacia del tratamiento. Por lo tanto, existe un tiempo óptimo que maximiza la remoción de turbidez sin incurrir en un uso innecesario de energía o pérdida de eficiencia.

De manera similar, según la Figura 15, se observa que una baja densidad de corriente da como resultado baja remoción de turbidez, debido a la limitada disolución del ánodo y, por lo tanto, a la baja producción de especies coagulantes necesarias para la formación de flóculos. A una alta densidad de corriente, también se presenta baja remoción de turbidez, ya que el exceso de corriente puede inducir reacciones secundarias, como la redispersión de coloides o la degradación de flóculos ya formados, además de aumentar el consumo energético y acelerar el desgaste de los electrodos. Por ello, existe un valor óptimo de densidad de corriente que maximiza la eficiencia del proceso de electrocoagulación. El pico de la gráfica representa la mayor remoción de turbidez, la cual se alcanza a un tiempo de 16 minutos y una densidad de corriente de 25 mA/cm².

Figura 16

Superficie respuesta de remoción de turbidez en función a la distancia entre electrodos y pH



Nota. Efecto de la interacción entre la distancia entre electrodos y el pH en la remoción de turbidez.

Según la Figura 16, se observa que una baja distancia entre electrodos da como resultado baja remoción de turbidez, ya que la intensa atracción electrostática y la turbulencia generada por las burbujas de gas provocan la desintegración de los flóculos formados, disminuyendo la eficiencia del proceso. A una alta distancia entre electrodos, también se obtiene baja remoción de turbidez, debido a que la menor interacción entre oxidantes y coagulantes, junto con el aumento en el tiempo de viaje de los iones y la disminución de la atracción electrostática, limita la formación efectiva de flóculos. Por lo tanto, la eficiencia óptima se alcanza a una distancia intermedia, donde se logra un equilibrio entre la formación de flóculos y la estabilidad del campo eléctrico.

Según la Figura 16, se observa que un bajo pH da como resultado baja remoción de turbidez, debido a la formación predominante de especies monoméricas como Al^{3+} y $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$, las cuales no favorecen la formación de flóculos estables. A un pH alto, también se obtiene una baja remoción de turbidez, ya que se generan especies solubles como $\text{Al}(\text{OH})_4^-$, que inhiben la formación de flóculos, reduciendo así la eficiencia del proceso. El rendimiento óptimo se alcanza cerca de la neutralidad, donde se forma $\text{Al}(\text{OH})_3$, un flóculo insoluble que mejora significativamente la remoción de contaminantes.

El pico de la gráfica representa la mayor remoción de turbidez, la cual se alcanza a una distancia entre electrodos de 1,59 cm y un pH de 7,66.

Según la Figura 17, se observa que un bajo tiempo de electrólisis da como resultado baja remoción de turbidez, ya que no se generan suficientes especies coagulantes ni se logra un contacto efectivo entre los flóculos y los contaminantes. A un alto tiempo de electrólisis, también se presenta baja remoción de turbidez, debido a que, una vez superado el tiempo óptimo, el exceso de coagulantes no mejora la eficiencia del proceso e incluso puede provocar la desorción de contaminantes previamente adsorbidos, reduciendo así la eficacia del tratamiento. Por lo tanto, existe un tiempo óptimo que maximiza la remoción de turbidez sin incurrir en un uso innecesario de energía o pérdida de eficiencia.

Según la Figura 17, se observa que un bajo pH da como resultado baja remoción de turbidez, debido a la formación predominante de especies monoméricas como Al^{3+} y $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$, las cuales no favorecen la formación de flóculos estables. A un pH alto, también se obtiene una baja remoción de turbidez, ya que se generan especies solubles como $\text{Al}(\text{OH})_4^-$, que inhiben la formación de flóculos, reduciendo así la eficiencia del proceso. El rendimiento óptimo se alcanza cerca de la neutralidad, donde se forma $\text{Al}(\text{OH})_3$, un flóculo insoluble que mejora significativamente la remoción de contaminantes.

Figura 17

Superficie respuesta de remoción de turbidez en función al tiempo y pH

Factor Coding: Actual

Design Points:

● Above Surface

○ Below Surface

30 59

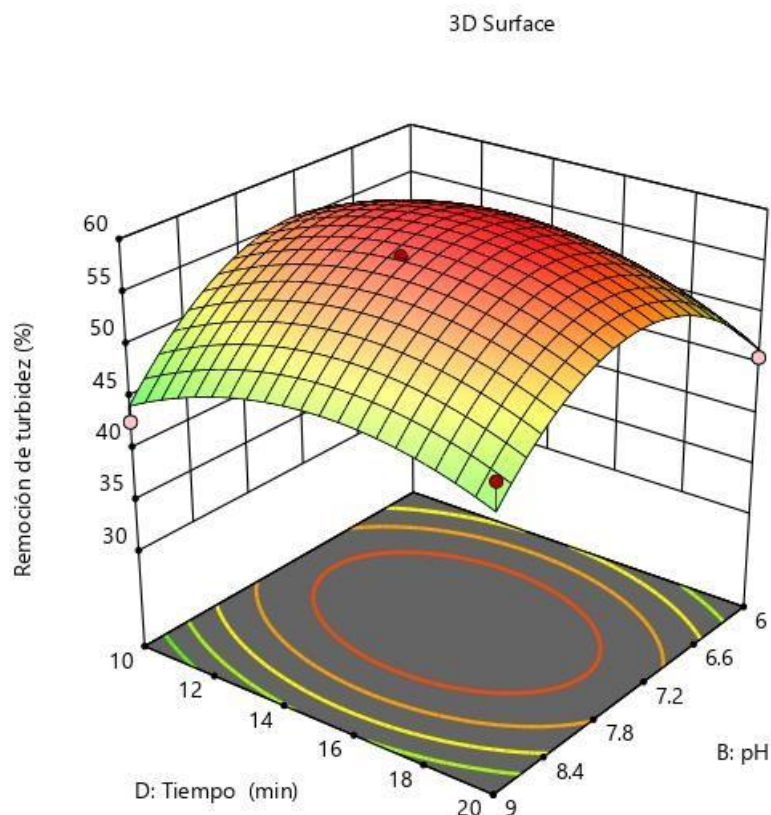
X1 = B: pH

X2 = D: Tiempo

Actual Factors

A: Densidad de corriente = 25

C: Distancia entre electrodos = 1.5



Nota. Efecto de la interacción entre el tiempo y el pH en la remoción de turbidez.

El pico de la gráfica representa la mayor remoción de turbidez, la cual se alcanza a un tiempo de 15,7 minutos y un pH de 7,66.

Según la Figura 18, se observa que un bajo tiempo de electrólisis da como resultado baja remoción de turbidez, ya que no se generan suficientes especies coagulantes ni se logra un contacto efectivo entre los flóculos y los contaminantes. A un alto tiempo de electrólisis, también se presenta baja remoción de turbidez, debido a que, una vez superado el tiempo óptimo, el exceso de coagulantes no mejora la eficiencia del proceso e incluso puede provocar la desorción de contaminantes previamente adsorbidos, reduciendo así la eficacia del tratamiento. Por lo tanto, existe un tiempo óptimo que maximiza la remoción de turbidez sin incurrir en un uso innecesario de energía o pérdida de eficiencia.

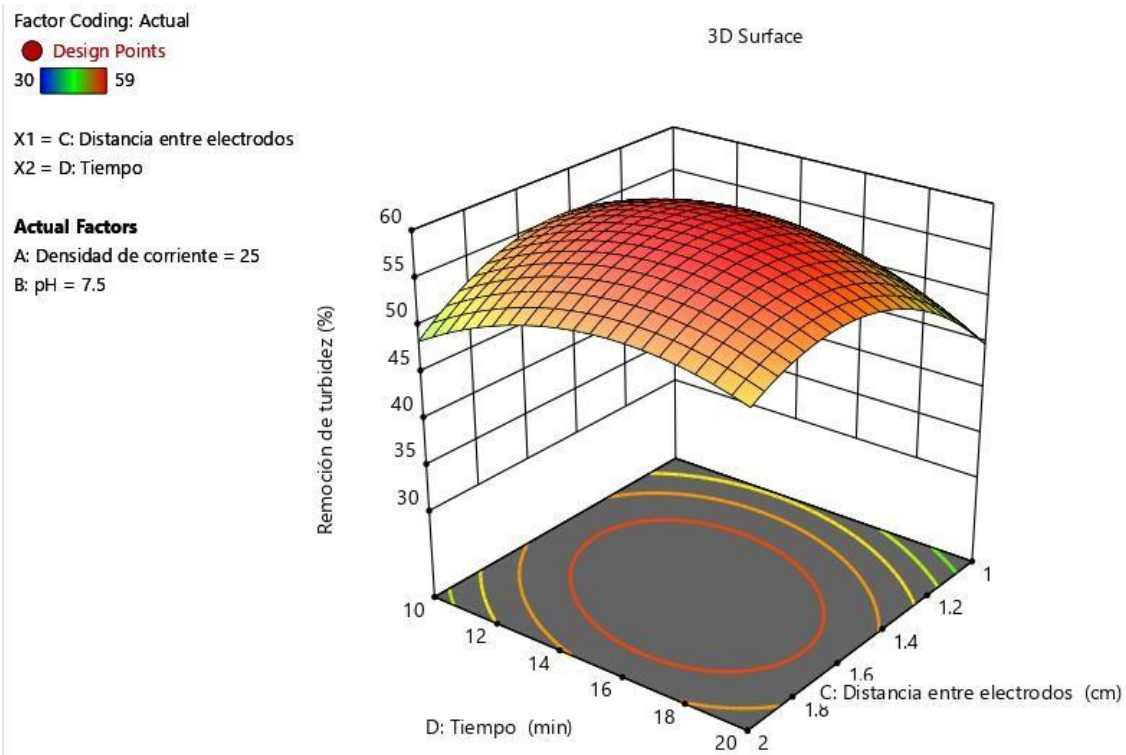
Según la Figura 18, se observa que una baja distancia entre electrodos da como resultado baja remoción de turbidez, ya que la intensa atracción electrostática y la turbulencia generada por las burbujas de gas provocan la desintegración de los flóculos formados, disminuyendo la eficiencia del proceso. A una alta distancia entre electrodos, también se obtiene baja remoción de turbidez, debido a que la menor interacción entre oxidantes y coagulantes, junto con el aumento en el tiempo de viaje de los iones y la

disminución de la atracción electrostática, limita la formación efectiva de flóculos. Por lo tanto, la eficiencia óptima se alcanza a una distancia intermedia, donde se logra un equilibrio entre la formación de flóculos y la estabilidad del campo eléctrico.

El pico de la gráfica representa la mayor remoción de turbidez, la cual se alcanza a un tiempo de 16 minutos y una distancia entre electrodos de 1,6 cm.

Figura 18

Superficie respuesta de remoción de turbidez en función al tiempo y distancia entre electrodos



Nota. Efecto de la interacción entre el tiempo y la distancia entre electrodos en la remoción de turbidez.

Tabla 19

Condiciones óptimas de electrocoagulación

Nombre	Unidad	Valor
Densidad de corriente	mA/cm ²	25,4472
pH	-.-	7,6623
Distancia entre electrodos	cm	1,58615
Tiempo	min	15,6799
Remoción de turbidez	%	59,0958

Nota. El rendimiento óptimo predicho de remoción de turbidez es 59,0958 %.

Según la Tabla 19, la densidad de corriente óptima fue 25,45 mA/cm², lo que indica que el proceso de electrocoagulación debe operar con esta intensidad para maximizar la eficiencia de remoción. El pH óptimo fue 7,66, señalando que el tratamiento es más efectivo en condiciones ligeramente alcalinas, cercanas a la neutralidad. La distancia entre electrodos óptima fue 1,59 cm, sugiriendo que esta separación favorece el contacto y la generación de coagulantes durante el proceso. El tiempo óptimo de electrocoagulación fue aproximadamente 15,7 minutos, indicando que el tratamiento debe mantenerse por este periodo para alcanzar un rendimiento eficiente.

El rendimiento máximo predicho de remoción de turbidez fue 59,10 %, lo que significa que bajo estas condiciones el proceso elimina cerca de 59 unidades de turbidez por cada 100 iniciales en el agua residual. Este valor representa el máximo rendimiento esperado bajo las condiciones óptimas del proceso.

Tabla 20

Valor experimental y predicho de la remoción de turbidez en condiciones óptimas de tratamiento

Ensayo	A	B	C	D	yp	ye	% error
1	25,44	7,66	1,59	15,68	59,1	58,8	0,508
2	25,44	7,66	1,59	15,68	59,1	57,5	2,707

Nota. “yp” representa el rendimiento óptimo predicho de la eficiencia de remoción de turbidez, expresado en porcentaje en peso, y “ye” corresponde al rendimiento óptimo experimental de la eficiencia de remoción de turbidez, también expresado en porcentaje en peso.

El rendimiento promedio óptimo experimental de la eficiencia de remoción de turbidez fue de 58,15 %, valor cercano al rendimiento óptimo predicho de 59,1 %, con un error menor al 2 %. Esto confirma la validez y precisión del modelo para predecir la eficiencia de remoción de turbidez bajo las condiciones óptimas de tratamiento.

Según la Tabla 21, el agua tratada en condiciones óptimas de electrocoagulación presenta resultados que indican cumplimiento con algunos parámetros y no con otros. La Demanda Química de Oxígeno (147,5 mg/L) y la Demanda Bioquímica de Oxígeno (43,6 mg/L) cumplen con el VMA para descargas al sistema de alcantarillado y también con el LMP de efluentes para vertidos a cuerpos de aguas. Los Coliformes Termotolerantes (5400 NMP/100mL) cumplen con el LMP de efluentes para vertidos a cuerpos de aguas. Los Aceites y Grasas (< 0,4 mg/L) cumplen con ambos límites. Los Sólidos Totales Suspendedos (162 mg/L) cumplen con el VMA para descargas al sistema de alcantarillado, pero no cumplen con el LMP de efluentes para vertidos a cuerpos de aguas. El pH (9,75) no cumple con el

LMP de efluentes para vertidos a cuerpos de aguas.

Tabla 21

Propiedades físicas y químicas del agua tratada en condiciones óptimas de electrocoagulación

Descripción	Unidad	Valor
Turbidez	NTU	58,3
Demanda química de oxígeno	mg/L	147,5
Demanda bioquímica de oxígeno	mg/L	43,6
Coliformes termotolerantes	NMP/100mL	5 400
Aceites y grasas	mg/L	< 0,4
Sólidos totales suspendidos	mg/L	162
pH	-.-	9,75

Nota. El análisis se realizó en la empresa SGS.

V. CONCLUSIONES

1. Se evaluó la reducción de la turbidez y la DQO mediante el proceso de electrocoagulación con electrodos de aluminio de las aguas del afluente de la PTAR Puca Puca de la provincia de Huanta, demostrándose que esta tecnología es una alternativa para la reducción de la turbidez y la DQO en el afluente de la PTAR Puca Puca, alcanzando una remoción de contaminantes del 58,15% bajo condiciones óptimas de operación (pH 7,5; densidad de corriente 25,45 mA/cm²; distancia entre electrodos 1 cm; tiempo de operación 15 min). El tratamiento mejoró significativamente la calidad del agua residual doméstica, cumpliendo con varios estándares regulatorios.
2. Se caracterizaron las propiedades fisicoquímicas iniciales de las aguas del afluente de la PTAR Puca Puca, evidenciando niveles elevados de contaminantes que superan los límites permisibles en varios parámetros. La DQO era de 417,7 mg/L, cumpliendo con el VMA para descargas al sistema de alcantarillado pero no con el LMP para vertidos a cuerpos de agua; la DBO₅ alcanzaba 166,2 mg/L, cumpliendo con el VMA pero no con el LMP; los coliformes termotolerantes registraron 920000 NMP/100 mL, excediendo el LMP; los aceites y grasas eran 6,1 mg/L, cumpliendo con ambos límites; los sólidos totales suspendidos eran 166 mg/L, cumpliendo con el VMA pero no con el LMP; y el pH era 7,08, dentro del LMP.
3. Se determinaron las condiciones óptimas de operación del proceso de electrocoagulación mediante el diseño experimental Box-Behnken y el método de superficie de respuesta permitió determinar las condiciones operativas que maximizan la remoción de turbidez y DQO. densidad de corriente de 25,45 mA/cm², pH de 7,66, distancia entre electrodos de 1,59 cm y tiempo de operación de 15,7 minutos. Bajo estas condiciones, se predijo una remoción de turbidez del 59,10 % y se obtuvo una reducción significativa de la DQO.
4. La caracterización del agua tratada bajo las condiciones óptimas mostró mejoras sustanciales en las propiedades fisicoquímicas y microbiológicas: DQO de 147,5 mg/L, DBO₅ de 43,6 mg/L, coliformes termotolerantes de 5400 NMP/100 mL y aceites y grasas por debajo de 0,4 mg/L, cumpliendo en la mayoría de los casos con los límites máximos permitidos (LMP) y valores máximos admisibles (VMA). Sin embargo, el pH final (9,75) y los sólidos totales suspendidos (162 mg/L) permanecieron por encima de los límites para vertido a cuerpos de agua, indicando la necesidad de ajustes complementarios.

RECOMENDACIONES

1. Realizar estudios complementarios para optimizar la reducción de sólidos totales suspendidos y el pH en el efluente tratado, con el fin de cumplir completamente con los límites máximos permisibles para vertidos a cuerpos de agua.
2. Investigar la implementación de tratamientos combinados o etapas adicionales posteriores a la electrocoagulación, como filtración, adsorción o tratamiento biológico, para mejorar la calidad del agua tratada y cumplir con todos los estándares ambientales.
3. Evaluar el impacto económico y ambiental del proceso de electrocoagulación aplicado a mayor escala en la PTAR Puca Puca, considerando costos operativos, consumo energético y generación de residuos.
4. Analizar el efecto de variables adicionales, como la composición del agua residual y la temperatura de operación, en la eficiencia del proceso para adaptar el tratamiento a diferentes condiciones y mejorar su desempeño.
5. Estudiar la reutilización y el manejo adecuado de los lodos generados durante el proceso de electrocoagulación, con el fin de minimizar impactos ambientales y promover su valorización.
6. Implementación de aplicación práctica de la electrocoagulación como una etapa de pretratamiento o tratamiento complementario que trabaje en conjunto con los sistemas biológicos existentes en la PTAR Puca Puca. Asimismo, es crucial realizar un análisis de costos operativos y consumo energético a mayor escala para garantizar la sostenibilidad económica del proyecto en la provincia de Huanta.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agudelo, R. N., V., Garcés, S. I., Marca, Y. M., & Peña, M. V. (2021). Evaluación de la electrocoagulación con electrodos de grafito como alternativa para el tratamiento de aguas residuales en curtiembres. *Revista Inventum*, 16(31), 61-70. <https://doi.org/10.26620/uniminuto.inventum.16.31.2021.61-70>
- Aguilar, E. (2015). Evaluación de la eficiencia de una celda de electrocoagulación a escala laboratorio para el tratamiento de agua. *Revista Del Instituto De investigación De La Facultad De Minas, Metalurgia Y Ciencias geográficas*, 18(35). <https://doi.org/10.15381/iigeo.v18i35.11843>
- Alcocer, P., & Cabrera, Á. (2022). Remoción de la turbiedad mediante el proceso acoplado de electrocoagulación y oxidación avanzada en aguas residuales procedentes de una curtiembre [Tesis de maestría, Universidad Nacional del Callao]. Universidad Nacional del Callao. <https://hdl.handle.net/20.500.12952/9174>
- Anass, L., Brahim, L., Anouar, A. & Mallil, E. (2020). Optimization of the operating parameters of electrocoagulation using aluminum electrode and application to the Dam waters of Sidi Said Ben Mâachou. *Mediterranean Journal of Chemistry*, 10(4), 363-370. <http://dx.doi.org/10.13171/mjc10402004241251a1>
- Arango, A., (2005). La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales. *Revista Lasallista de Investigación*, 2(1), 49-56. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=69520109>
- Arce, F. & Cruz, I. A. (2019). Tratamiento del efluente industrial de una planta de beneficio de reses, mediante el Método de Electrocoagulación de flujo a escala piloto [Tesis de grado, Universidad Nacional del Callao]. Repositorio de tesis de la Universidad Nacional del Callao. <https://hdl.handle.net/20.500.12952/4493>
- Ayuque, J., Esteban, J., Huere, J., Ayuque, C., Dueñas, C., & Yaulilahua, R. (2022). Tratamiento de aguas residuales con cámaras de electrocoagulación a escala de laboratorio. *Instituto Universitario de Innovación Ciencia y Tecnología Inudi Perú S.A.C.* <https://doi.org/10.35622/inudi.b.060>
- Barboza, G. I. (2011). Reducción de la carga de contaminantes de las aguas residuales de la planta de tratamiento de Totorá - Ayacucho empleando la técnica de electrocoagulación [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio de tesis de la Universidad Nacional de Ingeniería.

<https://repositorio.uni.edu.pe/handle/20.500.14076/338>

- Blas, F. & Conislla, R. F. (2021). Remoción de sólidos totales disueltos y turbidez mediante electrocoagulación y ozonificación de aguas residuales de destilería [Tesis de maestría, Universidad Nacional del Callao]. Repositorio de tesis de la Universidad Nacional del Callao. <https://hdl.handle.net/20.500.12952/6372>
- Calderón, M., & Aramburú, V. (2017). Estudio de la electrocoagulación para controlar la turbidez y el pH en el tratamiento de efluentes minero metalurgicos polimetálicos. *Revista del Instituto de investigación de la Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas*, 20(39), 119-122.
<https://doi.org/10.15381/iigeo.v20i39.14174>
- Cárdenas, W. J. (2024). Proceso foto-Fenton para la remoción de materia orgánica de las aguas residuales de la planta de tratamiento Huanta - Ayacucho [Tesis doctoral, Universidad Nacional del Centro del Perú]. Universidad Nacional del Centro del Perú. <http://hdl.handle.net/20.500.12894/13019>
- Carrera, K. J. & Falcon, M. C. (2022). Aplicación del método de electrocoagulación para tratamiento de efluentes de industrias pesqueras-Bahía del Callao [Tesis de grado, Universidad Científica del Sur]. Repositorio de tesis de la Universidad Científica del Sur. <https://hdl.handle.net/20.500.12805/2722>
- Castillo, J., Moreira, Y., & Banchón, C. (2025). Electrocoagulación de aguas residuales domésticas: Revisión sistemática de efectos operacionales. *Research, Society and Development*, 14(5), e2814548700. <https://doi.org/10.33448/rsd-v14i5.48700>
- Chacon, F. M. & Huampotupa, C. K. (2021). Electrocoagulación de aguas residuales en la industria láctea Ramirez-ANTA-COMPONE [Tesis de grado, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco]. Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. <http://hdl.handle.net/20.500.12918/5962>
- Chang, R., & Overby, J. (2020). *Química* (13.^a ed.). McGraw-Hill Interamericana.
- Chaves, J. E. (2021). Tratamiento de aguas residuales de la industria cosmética mediante electrocoagulación [Tesis de grado, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio de tesis de la Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/81130>
- Cuenca, A, L. E. (2018). Diseño de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la parroquia Tingo la Esperanza, ubicada en el cantón Pujilí, provincia de Cotopaxi

- [Trabajo de grado, Universidad Central del Ecuador]. Universidad Central del Ecuador. <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/15372>
- Dobrosz, I., García, M. A. G., & Taquez, H. N. I. (2020). Tratamiento de aguas residuales de la industria del café soluble vía Electrocoagulación - Oxidación Anódica. Selección de los electrodos. *Revista EIA*, 17(34), 1-17. <https://doi.org/10.24050/reia.v17i34.1328>
- Gamero, A., García, P., & La Rosa, A. (2020). Remoción de bacterias patógenas del agua mediante electrocoagulación con ánodos de aluminio. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 11(4), 136-178. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2020-04-05>
- Gutiérrez, C. (2020). Depuración fotoquímica-electroquímica de compuestos orgánicos persistentes en agua residual sintética de la industria textil Puente Piedra-Lima [Tesis doctoral, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. <https://hdl.handle.net/20.500.12672/15483>
- Hasnaoui, A., Chikhi, M., Balaska, F., Seraghni, W., Boussemghoune, M., & Dizge, N. (2024). Electrocoagulation employing recycled aluminum electrodes for methylene blue remediation. *Desalination and Water Treatment*, 319, 100453. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100453>
- Hernández, D. (2016). Tratamiento Acoplado Fisicoquímico-Electrocoagulación para Incrementar la Remoción de la Materia Orgánica de un Agua Residual de Rastro Municipal [Tesis de maestro, Universidad Autónoma del Estado de México]. Universidad Autónoma del Estado de México. <http://hdl.handle.net/20.500.11799/65337>
- Huamán, W. S., Pastrana, P. a. P., Victoria, H. M. D., & Córdova, L. a. T. (2022). Aguas residuales en la calidad de agua del río. *GnosisWisdom*, 2(3), 30–36. <https://doi.org/10.54556/gnosiswisdom.v2i3.43>
- Huanacuni, C. (2019). Capacidad de depuración de aguas residuales domésticas con aplicación de diferentes tecnologías de tratamiento sostenibles con costos de operación y mantenimiento económicos para pequeñas comunidades descentralizadas en Tacna (Cono Sur) - Perú [Tesis doctoral, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann]. Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann. <https://repositorio.unjbg.edu.pe/handle/20.500.12510/2540>
- León, E. & Aramburú, V. (2021). Aplicación de la electrocoagulación en la eliminación de los metales pesados en los efluentes galvánicos. *Revista de investigación*

- científica, 24 (48), 109-116. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v24i48.19828>
- Magaña-Irons, L., Rojas-Vargas, A., González-Díaz, Y., & Ojeda-Arnaignac, E. (2019). Remoción de contaminantes del residual lácteo por electrocoagulación con electrodos de aluminio. <https://www.redalyc.org/journal/4455/445562743002/html/>
- Maytaa, R. & Maytab, J. (2017). Remoción de cromo y demanda química de oxígeno de aguas residuales de curtiembre por electrocoagulación. Sociedad Química del Perú, 83(3), 331-340. <https://www.redalyc.org/pdf/3719/371953709008.pdf>
- Mendes, L. (2019). Tratamiento de aguas residuales mediante electrocoagulación acoplada a un MBR para minimizar el ensuciamiento de la membrana y obtener efluentes de alta calidad [Tesis doctoral, Universidad de Alicante]. Repositorio de tesis de la Universidad de Alicante. <http://hdl.handle.net/10045/90307>
- Mendes, L. (2019). Tratamiento de aguas residuales mediante electrocoagulación acoplada a un MBR para minimizar el ensuciamiento de la membrana y obtener efluentes de alta calidad [Tesis de doctor, Universidad de Alicante]. Universidad de Alicante. <http://hdl.handle.net/10045/90307>
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (MVCS). (2019). Decreto Supremo N.º 010-2019-VIVIENDA: Decreto Supremo que aprueba el Reglamento de Valores Máximos Admisibles (VMA) para las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario. <https://busquedas.elperuano.pe/dispositivo/NL/1748339-3>
- Ministerio del Ambiente (MINAM). (2010). Decreto supremo N° 003-2010-MINAM: Aprueba Límites Máximos Permisibles para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales. <https://www.minam.gob.pe/disposiciones/decreto-supremo-n-003-2010-minam/>
- Morales, N. B. & Acosta, G. E. (2010). Sistema de electrocoagulación como tratamiento de aguas residuales galvánicas. Ciencia e Ingeniería Neogranadina, 20 (1), 33-44. ISSN 0124-8170
- Mouedhen, G., Feki, M., De Petris Wery, M., & Ayedi, H. (2007). Behavior of aluminum electrodes in electrocoagulation process. Journal of Hazardous Materials, 150(1), 124-135. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.04.090>
- Muñoz, M. A., Cortés, J. D., y Agudelo, R. N. (2022). Electrocoagulación con electrodos de aluminio para tratamiento de aguas residuales de curtiembres en Villapinzón,

Cundinamarca, Colombia. Revista Mutis, 12(1).
<https://doi.org/10.21789/22561498.1783>

- Nieto U., R. & Huamán L., J. J. (2019). Optimización de los parámetros operacionales del proceso de oxidación avanzada en el tratamiento de las aguas residuales provenientes de un matadero de porcinos [Tesis de grado, Universidad Nacional del Callao]. Universidad Nacional del Callao.
<https://hdl.handle.net/20.500.12952/4495>
- Nordio, R. (2024). Modelado y control del tratamiento de aguas residuales basado en microalgas [Tesis doctoral, Universidad de Almería]. Universidad de Almería.
<http://hdl.handle.net/10835/17169>
- Osorio, M. A., Carrillo, W. E., Negrete, J. H., Loor, X. A., & Riera, E. J. (2021). La calidad de las aguas residuales domésticas. Polo Del Conocimiento: Revista Científico - Profesional, 6(3), 228–245. <https://doi.org/10.23857/pc.v6i3.2360>
- Osorio-Rivera, M. A., Carrillo-Barahona, W. E., Negrete-Costales, J. H., Loor-Lalvay, X. A., & Riera-Guachichulca, E. J. (2021). La calidad de las aguas residuales domésticas. Polo Del Conocimiento: Revista Científico - Profesional, 6(3), 228–245. <https://doi.org/10.23857/pc.v6i3.2360>
- Palahouane, B., Keffous, A., Naceur, M., Hecini, M., Bouchelaghem, O., Lami, A., Laib, K., Manseri, A., & Drouiche, N. (2020). Electrocoagulation performance of industrial wastewater with high fluoride concentrations and characteristics of the sludge generated. Desalination And Water Treatment, 183, 240-247.
<https://doi.org/10.5004/dwt.2020.25235>
- Perozo, J. R., & Abreu, R. L. (2017). Evaluación de la electrocoagulación en el tratamiento de agua potable. Química Viva, 16(1), 56-69.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=86351157005>
- Quispe, Y. (2021). Actividades antrópicas y calidad del agua en el rio Chumbao, provincia de Andahuaylas, departamento de Apurímac, 2019 [Tesis para optar el título de Ingeniero Ambiental, Universidad César Vallejo]. Universidad César Vallejo. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/60930>.
- Riccio Yauri, L. F. (2015). Remoción de contaminantes de aguas residuales urbanas del colector Agua de las Vírgenes por electrocoagulación, a nivel de laboratorio, utilizando como fuente energética un panel fotovoltaico [Tesis doctoral, Universidad Nacional del Centro del Perú]. Universidad Nacional del Centro del

Perú. <http://hdl.handle.net/20.500.12894/4171>

- Riccio, L. F. (2015). Remoción de contaminantes de aguas residuales urbanas del colector Agua de las Vírgenes por electrocoagulación, a nivel de laboratorio, utilizando como fuente energética un panel fotovoltaico [Tesis doctoral, Universidad Nacional del Centro del Perú]. Repositorio de tesis de la Universidad Nacional del Centro del Perú. <http://hdl.handle.net/20.500.12894/4171>
- Rodríguez-Díaz, Y. J., Fuentes-Guevara, M. D., Beleño-Díaz, O. D., & Montoya-Armenta, L. H. (2021). Electrocoagulación como alternativa de tratamiento de aguas residuales mixtas originadas en la industria del procesamiento de lácteos y cárnicos. *Tecnura*, 25(67), 26–39. <https://doi.org/10.14483/22487638.15769>
- Rodríguez, Y. J., Fuentes, M. D., Beleño, O. D. & Montoya, L. H. (2021). Electrocoagulación como proceso de tratabilidad de aguas residuales de una planta de lácteos y cárnicos. *Tecnura*, 25(67), 26–39. <https://doi.org/10.14483/22487638.15769>
- Titchou, F. E., Afanga, H., Zazou, H., Akbour, R. A., & Hamdani, M. (2020). Batch elimination of cationic dye from aqueous solution by electrocoagulation process. *Mediterranean Journal of Chemistry*, 10(1), 1–12. <https://doi.org/10.13171/mjc10102001201163mh>
- Tupia, M. L. & Valerio, S. S. (2023). Remoción de los contaminantes en efluentes líquidos de una planta textil mediante el método de electrocoagulación [Tesis de grado, Universidad Nacional del Callao]. Repositorio de tesis de la Universidad Nacional del Callao. <https://hdl.handle.net/20.500.12952/7944>
- Vilela, E. L., & Rojas, V. A. (2021). Aplicación de la electrocoagulación en la eliminación de los metales pesados en los efluentes galvánicos. *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Minas Metalurgia y Ciencias Geográficas*, 24(48), 109-115. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v24i48.19828>.

Anexo 1

Matriz de consistencia

Problema	Objetivos	Hipótesis	Variables	Metodología
Principal ¿Cómo reducir la turbidez y la demanda química de oxígeno (DQO) mediante electrocoagulación de las aguas del afluente de la PTAR Puca Puca de la provincia de Huanta? Específicos a) ¿Cuáles son las propiedades fisicoquímicas de las aguas del afluente (turbidez, DQO, conductividad, pH y temperatura) de la PTAR Puca Puca? b) ¿Cuáles son los parámetros de operación óptimos de electrocoagulación: pH, densidad de corriente, distancia entre electrodos y tiempo de operación del proceso de electrocoagulación, que influyen significativamente y maximizan la reducción de la turbidez y la DQO? c) ¿Cuáles son propiedades fisicoquímicas del agua tratada: turbidez, DQO, conductividad, pH y temperatura?	Principal Reducir la turbidez y la demanda química de oxígeno (DQO) mediante electrocoagulación de las aguas del afluente de la PTAR Puca Puca de la provincia de Huanta. Específicos a) Determinar las propiedades fisicoquímicas de las aguas del afluente (turbidez, DQO, conductividad, pH y temperatura) de la PTAR Puca Puca. b) Determinar los parámetros de operación óptimos de electrocoagulación: pH, densidad de corriente, distancia entre electrodos y tiempo de operación del proceso de electrocoagulación, que influyen significativamente en la reducción de la turbidez y la DQO. c) Determinar las propiedades fisicoquímicas del agua tratada: turbidez, DQO, conductividad, pH y temperatura.	Principal El proceso de electrocoagulación reduce significativamente la turbidez y la demanda química de oxígeno (DQO) en las aguas del afluente de la PTAR Puca Puca de la Provincia de Huanta. Específicos a) Las propiedades fisicoquímicas del afluente de la PTAR Puca Puca: turbidez, DQO, conductividad, pH y temperatura presentan valores que superan los Límites Máximos Permisibles para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales establecidos en el Decreto Supremo N° 003- 2010-MINAM. b) Los parámetros de operación del proceso de electrocoagulación —pH, densidad de corriente, distancia entre electrodos y tiempo de operación— influyen significativamente en la reducción de la turbidez y la DQO, existiendo una combinación óptima de dichos parámetros que maximiza la eficiencia de remoción de ambos contaminantes. c) Las propiedades fisicoquímicas del agua tratada después de la electrocoagulación: turbidez, DQO, conductividad, pH y temperatura cumplen con los Límites Máximos Permisibles para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales establecidos en el Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM.	Independiente Parámetros de operación de electrocoagulación - Densidad de corriente - Tiempo de operación - Distancia entre electrodos - pH Dependiente Porcentaje de reducción - Turbidez - DQO - DBO - Coliformes termotolerantes - Aceites y grasas - Sólidos totales suspendidos	Tipo de investigación Aplicada Enfoque de investigación Cuantitativo Nivel de investigación Explicativo Diseño de investigación Experimental Método de investigación Electrocoagulación

Anexo 2

Validación del instrumento

Para garantizar la confiabilidad y precisión de los datos obtenidos en esta investigación, se llevó a cabo la validación de los instrumentos y métodos utilizados para la medición de los parámetros fisicoquímicos del agua residual, tanto antes como después del tratamiento por electrocoagulación.

En el proceso de electrocoagulación, se empleó un equipo regulador de voltaje para controlar la corriente eléctrica en cada tratamiento, asegurando que los valores fijados fueran mantenidos con precisión durante el experimento. Al finalizar cada tratamiento, se midió la turbidez del agua tratada para evaluar la eficacia del proceso. Aunque el equipo es propiedad de la universidad y, como es común en instituciones estatales, no cuenta con un certificado formal de calibración según normas internacionales, se validó su desempeño mediante el control riguroso de las condiciones operativas (pH, densidad de corriente, distancia entre electrodos y tiempo) y la repetibilidad de los resultados.

Además, los parámetros fisicoquímicos obtenidos bajo condiciones óptimas, definidas a través del análisis estadístico con el software Design Expert 12 y el diseño experimental Box-Behnken, fueron verificados mediante dos ensayos experimentales adicionales. Estos ensayos se enviaron al laboratorio acreditado SGS, cuyos informes certifican que las mediciones cumplen con los estándares de acreditación del INACAL-DA, y están reconocidos en el ámbito multilateral por IAAC e ILAC.

Los métodos utilizados para la medición de cada parámetro fueron los siguientes:

- ✓ Sólidos Totales en Suspensión: SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540-D (23rd Ed. 2017).
- ✓ Demanda Química de Oxígeno (DQO): SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5220-D (23rd Ed. 2017).
- ✓ Aceites y Grasas: ASTM D3921-96 (Reapproved 2011).
- ✓ Potencial de Hidrógeno (pH): SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-H⁺-B (23rd Ed. 2017).
- ✓ Turbidez: SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2130-B (24th Ed. 2023).
- ✓ Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO): SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5210-B (24th Ed. 2023).
- ✓ Coliformes Fecales o Termotolerantes: SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 9221E.1 (24th Ed. 2023).

Esta validación integral confirma que los instrumentos y procedimientos utilizados fueron adecuados y confiables para cumplir con los objetivos de la investigación, asegurando

la calidad y validez de los resultados obtenidos. A continuación, se adjuntan los informes de resultados proporcionados por el laboratorio SGS.

Anexo 3

Autorización de la institución donde se realizó la investigación

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA
Facultad de Ingeniería Química y Metalurgia
Laboratorio de Química Orgánica

AUTORIZACIÓN DE INVESTIGACIÓN

Ayacucho, 01 de febrero de 2025

A quien corresponda:

Por la presente, yo Mtro. Ing. Aníbal Pablo GARCÍA BENDEZÚ en calidad de jefe del Laboratorio de Química Orgánica de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, autorizo a la alumna, Dayma QUINTAS MENDEZ, con DNI N° 47914926, a realizar actividades de investigación en nuestras instalaciones.

La alumna Dayma QUINTAS MENDEZ, llevará a cabo su investigación titulada **"REDUCCIÓN DE LA TURBIDEZ Y LA DQO MEDIANTE ELECTROCOAGULACIÓN DE LAS AGUAS DEL AFLUENTE DE LA PTAR PUCA PUCA DE LA PROVINCIA DE HUANTA"** desde el **01/02/2025** hasta el **31/07/2025**. Durante este período, se le permitirá acceder a los recursos del laboratorio y utilizar los equipos necesarios para el desarrollo de su proyecto.

Esta autorización se otorga bajo la condición de que la alumna cumpla con todas las normativas y procedimientos establecidos por la universidad y el laboratorio, asegurando la seguridad y el buen uso de los recursos.

Atentamente,



Mtro. Ing. Aníbal García Bendeزú

Jefe de laboratorio de Química Orgánica

Celular: 990708054

anibal.garcia@unsch.edu.pe

Anexo 4

Procesamiento estadístico

Para el análisis estadístico y la optimización del proceso de electrocoagulación, se empleó el software Design Expert 12 mediante la metodología de superficie de respuesta (RSM), utilizando un diseño experimental tipo Box-Behnken. El procedimiento seguido fue el siguiente:

1. Se creó un nuevo diseño experimental seleccionando la opción “New Design”, luego “Response Surface” y finalmente “Box-Behnken”.
2. Se definieron cuatro factores numéricos (pH, densidad de corriente, distancia entre electrodos y tiempo de operación), estableciendo sus respectivos valores mínimo y máximo, así como las unidades correspondientes.
3. Se asignaron cinco puntos centrales por bloque con el objetivo de mejorar la estimación del error experimental.
4. Se definió una variable de respuesta (porcentaje de remoción de turbidez), especificando su nombre y unidad de medida.
5. Una vez configurado el diseño, se ingresaron los valores experimentales obtenidos en la sección “Responses”.
6. Posteriormente, se realizó el análisis estadístico seleccionando las opciones: “Analysis”, “Fit Summary” y luego “f(x) model”, optando por un modelo cuadrático (“quadratic”) en el orden del proceso.
7. Se ejecutó el análisis de varianza (ANOVA) para evaluar la significancia estadística del modelo y de los factores involucrados.
8. Se revisaron los diagnósticos del modelo a fin de validar los supuestos estadísticos y verificar la adecuación del ajuste.
9. Finalmente, se llevó a cabo la optimización numérica seleccionando como criterio el rendimiento de remoción de turbidez, estableciendo como objetivo “Maximizar”. Se identificaron las soluciones óptimas y se visualizaron los resultados mediante gráficos generados por el software.



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002



**INFORME DE ENSAYO
MA2514425-AC-0**

QUINTAS MENDEZ DAYMA

JR. 2 DE MAYO 845 - AYACUCHO - HUANTA - HUANTA

ENV / LB-356409-002

Fecha de Recepción SGS : 27-04-2025

Fecha de Ejecución : Del 27-04-2025 al 06-05-2025

Muestreo Realizado Por : CLIENTE

Estación de Muestreo
HUANTA - MO

Emitido por SGS del Perú S.A.C.

Impreso el 06/05/2025

Frank M. Julcamoro Quispe

C.Q.P. 1033

Supervisor de Laboratorio

"Este informe de ensayo, al estar en el marco de la acreditación del INACAL-DA, se encuentra dentro del ámbito de reconocimiento multilateral/mutuo de los miembros firmantes de IAAC e ILAC"

Este documento es válido solo en entorno electrónico, de imprimirse pierde validez.

Página 1 de 5



SGS del Perú S.A.C.

Av. Elmer Faucett 3348
Ernesto Gunther 275
Jr. Arnaldo Márquez

Callao 1
Parque Industrial
Ba. San Antonio

Callao t (511) 517 1900
Arequipa t (054) 213 506
Cajamarca t (076) 366 092

www.sgs.pe
e Pe.servicios@sgs.com

Miembro del Grupo SGS



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002



INFORME DE ENSAYO
MA2514425-AC-0

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					HUANTA - MO
FECHA DE MUESTREO HORA DE MUESTREO CATEGORIA SUB CATEGORIA					24/04/2025 08:00:00 AGUA RESIDUAL AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado ± Incertidumbre
Análisis Generales					
Sólidos Totales en Suspensión	EW_APHA2540D	mg Sólidos Totales en Suspensión/L	1	3	162 ± 37
Demanda Química de Oxígeno	EW_APHA5220D	mgO ₂ /L	1.8	4.5	147.5 ± 14.80
Aceites y Grasas	EW_ASTMD3921	mg/L	0.2	0.4	<0.4

Este documento es válido solo en entorno electrónico, de imprimirse pierde validez.

Página 2 de 5



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002



INFORME DE ENSAYO
MA2514425-AC-0

CONTROL DE CALIDAD

LC: Límite de cuantificación
MB: Blanco del proceso.
LCS %Recovery: Porcentaje de recuperación del patrón de proceso.
MS %Recovery: Porcentaje de recuperación de la muestra adicionada.
MSD %RPD: Diferencia Porcentual Relativa entre los duplicados de la muestra adicionada.
Dup %RPD: Diferencia Porcentual Relativa entre los duplicados del proceso.

Parámetro	Unidad	LC	MB	DUP %RPD	LCS %Recovery	MS %Recovery	MSD %RPD
Aceites y Grasas	mg/L	0.4	<0.4	0%	98%	103%	
Demanda Química de Oxígeno	mgO ₂ /L	4.5	<4.5		97 - 100%	106%	3 - 11%
Sólidos Totales en Suspensión	mg Sólidos Totales en Suspensión/L	3	<3	1 - 2%	98 - 100%		



**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002**



**INFORME DE ENSAYO
MA2514425-AC-0**

REFERENCIAS DE MÉTODOS DE ENSAYO

Referencia	Sede	Parámetro	Método de Ensayo
EW_APHA2540D	Callao	Sólidos Totales en Suspensión	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540-D: 23rd: 2017. Solids: Total Suspended Solids dried at 103-105 °C. (VALIDADO - Aplicado fuera del alcance) 2017
EW_APHA5220D	Callao	Demanda Química de Oxígeno	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5220 D. 23rd Ed: 2017. Chemical Oxygen Demand, Closed Reflux, Colorimetric Method (VALIDADO - Aplicado fuera del alcance) 2017.
EW_ASTMD3921	Callao	Aceites y Grasas	ASTM D3921 - 96 (Reapproved 2011). Standard Test Method for Oil and Grease and Petroleum Hydrocarbons in Water. (VALIDADO - Aplicado fuera del alcance) 2015.

Este documento es válido solo en entorno electrónico, de imprimirse pierde validez.

Página 4 de 5

SGS del Perú S.A.C.

Av. Elmer Faucett 3348
Ernesto Gunther 275
Jr. Arnaldo Márquez

Callao 1
Parque Industrial
Ba. San Antonio

Callao t (511) 517 1900 www.sgs.pe
Arequipa t (054) 213 506 e Pe.servicios@sgs.com
Cajamarca t (076) 366 092

Miembro del Grupo SGS



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002



INFORME DE ENSAYO
MA2514425-AC-0

NOTAS

- El reporte de tiempo se realiza en el sistema horario de 24 horas.
- Las muestras recibidas cumplen con las condiciones necesarias para la realización de los análisis solicitados.
- La incertidumbre expandida de medición reportada se ha obtenido multiplicando la incertidumbre estándar combinada por el factor de cobertura $k=2$, de modo que la probabilidad de cobertura corresponde aproximadamente a un nivel de confianza del 95%.

"Este informe de ensayo, al estar en el marco de la acreditación del INACAL-DA, se encuentra dentro del ámbito de reconocimiento multilateral/mutuo de los miembros firmantes de IAAC e ILAC"

Este documento es emitido bajo las Condiciones Generales de Servicio de SGS del Perú S.A.C., las cuales se encuentran descritas en la página <http://www.sgs.pe/es-ES/Terms-and-Conditions.aspx>. Son especialmente importantes las disposiciones sobre limitación de responsabilidad, pago de indemnizaciones y jurisdicción definidas en dichas Condiciones Generales de Servicio, su alteración o su uso indebido constituye un delito contra la fe pública y se regula por las disposiciones civiles y penales de la materia; queda prohibida la reproducción total o parcial, salvo autorización escrita de SGS del Perú S.A.C.

Los resultados del informe de ensayo sólo son válidos para la(s) muestra(s) ensayadas; no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. La compañía no es responsable del origen o fuente de la cual las muestras han sido tomadas y de la información proporcionada por el cliente.

Última Revisión Enero 2022

Este documento es válido solo en entorno electrónico, de imprimirse pierde validez.

Página 5 de 5

QUINTAS MENDEZ DAYMA

JR. 2 DE MAYO 845 - AYACUCHO - HUANTA - HUANTA

ENV / LB-356409-002

Fecha de Recepción SGS : 27-04-2025

Fecha de Ejecución : Del 27-04-2025 al 06-05-2025

Muestreo Realizado Por : CLIENTE

Estación de Muestreo
HUANTA - MO

Emitido por SGS del Perú S.A.C.

Impreso el 06/05/2025



Frank M. Julcamoro Quispe
C.Q.P. 1033
Supervisor de Laboratorio



Elizabeth V. Capuñay España
C.B.P 8508
Coordinador de Laboratorio Microbiología





INFORME DE ENSAYO MA2514425-NA-0

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					HUANTA - MO
FECHA DE MUESTREO HORA DE MUESTREO CATEGORIA SUB CATEGORIA					24/04/2025 08:00:00 AGUA RESIDUAL AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado ± Incertidumbre
Análisis Generales					
Potencial de Hidrógeno	EW APHA4500HB	pH	--	--	9.75 *
Turbidez	EW APHA2130B	NTU	0.100	0.200	58.300 (**) ± 4.66
Demanda Bioquímica de Oxígeno	EW APHA5210B	mg/L	1.0	2.6	43.6 (**) ± 9.20
Análisis Microbiológicos					
Numeración de Coliformes Fecales o Termotolerantes	EW_APHA9221E_NMP_CX	NMP/100 mL	--	--	5,400.0 (**)

Este documento es válido solo en entorno electrónico, de imprimirse pierde validez.

Página 2 de 5

SGS del Perú S.A.C.

Av. Elmer Faucett 3348
Ernesto Gunther 275
Jr. Arnaldo Márquez

Callao 1
Parque Industrial
Ba. San Antonio

Callao
Arequipa
Cajamarca

t (511) 517 1900
t (054) 213 506
t (076) 366 092

www.sgs.pe
e Pe.servicios@sgs.com

Miembro del Grupo SGS

INFORME DE ENSAYO MA2514425-NA-0

CONTROL DE CALIDAD

LC: Límite de cuantificación
MB: Blanco del proceso.
LCS %Recovery: Porcentaje de recuperación del patrón de proceso.
MS %Recovery: Porcentaje de recuperación de la muestra adicionada.
MSD %RPD: Diferencia Porcentual Relativa entre los duplicados de la muestra adicionada.
Dup %RPD: Diferencia Porcentual Relativa entre los duplicados del proceso.

Parámetro	Unidad	LC	MB	DUP %RPD	LCS %Recovery
Turbidez	NTU	0.200		4 - 13%	99 - 100%
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	2.6	<2.6		98 - 100%
Potencial de Hidrógeno	pH	--		0%	100%



INFORME DE ENSAYO MA2514425-NA-0

REFERENCIAS DE MÉTODOS DE ENSAYO

Referencia	Sede	Parámetro	Método de Ensayo
EW_APHA4500HB	Callao	Potencial de Hidrógeno	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-H+-B; 23rd Ed: 2017. pH Value: Electrometric Method.
EW_APHA2130B	Callao	Turbidez	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2130 B, 24th Ed.: 2023. Turbidity. Nephelometric Method
EW_APHA5210B	Callao	Demanda Bioquímica de Oxígeno	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5210 B ;24th Ed: 2023. Biochemical Oxygen Demand (BOD): 5-Day BOD test
EW_APHA9221E_NMP_CX	Cajamarca	Numeración de Coliformes Fecales o Termotolerantes	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 9221E.1, 24th Ed; 2023. Multiple-tube Fermentation Technique for Members of the Coliform Group. Thermotolerant (Fecal) Coliform Procedure. Thermotolerant Coliform Test (EC Medium).

INFORME DE ENSAYO MA2514425-NA-0

NOTAS

- El reporte de tiempo se realiza en el sistema horario de 24 horas.
- Las muestras recibidas cumplen con las condiciones necesarias para la realización de los análisis solicitados.
- La incertidumbre expandida de medición reportada se ha obtenido multiplicando la incertidumbre estándar combinada por el factor de cobertura $k=2$, de modo que la probabilidad de cobertura corresponde aproximadamente a un nivel de confianza del 95%.
- (*) Los resultados obtenidos corresponden a métodos que no han sido acreditados por el INACAL-DA.
- (**) Los resultados del ensayo no se encuentran dentro del marco de la acreditación otorgada por INACAL - DA debido a que la muestra no es idónea para el ensayo solicitado. Los resultados se emiten a solicitud del cliente.

Este documento es emitido bajo las Condiciones Generales de Servicio de SGS del Perú S.A.C, las cuales se encuentran descritas en la página <http://www.sgs.pe/es-ES/Terms-and-Conditions.aspx>. Son especialmente importantes las disposiciones sobre limitación de responsabilidad, pago de indemnizaciones y jurisdicción definidas en dichas Condiciones Generales de Servicio, su alteración o su uso indebido constituye un delito contra la fe pública y se regula por las disposiciones civiles y penales de la materia; queda prohibida la reproducción total o parcial, salvo autorización escrita de SGS del Perú S.A.C.

Los resultados del informe de ensayo sólo son válidos para la(s) muestra(s) ensayadas; no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. La compañía no es responsable del origen o fuente de la cual las muestras han sido tomadas y de la información proporcionada por el cliente.

Última Revisión Enero 2022

Este documento es válido solo en entorno electrónico, de imprimirse pierde validez.

Página 5 de 5



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002



**INFORME DE ENSAYO
MA2514426-AC-0**

QUINTAS MENDEZ DAYMA

JR. 2 DE MAYO 845 - AYACUCHO - HUANTA - HUANTA

ENV / LB-356423-003

Fecha de Recepción SGS : 27-04-2025

Fecha de Ejecución : Del 27-04-2025 al 06-05-2025

Muestreo Realizado Por : CLIENTE

Estación de Muestreo
HUANTA - ME

Emitido por SGS del Perú S.A.C.

Impreso el 06/05/2025

Frank M. Julcamoro Quispe

C.Q.P. 1033

Supervisor de Laboratorio

"Este informe de ensayo, al estar en el marco de la acreditación del INACAL-DA, se encuentra dentro del ámbito de reconocimiento multilateral/mutuo de los miembros firmantes de IAAC e ILAC"

Este documento es válido solo en entorno electrónico, de imprimirse pierde validez.

Página 1 de 5



SGS del Perú S.A.C.

Av. Elmer Faucett 3348
Ernesto Gunther 275
Jr. Arnaldo Márquez

Callao 1
Parque Industrial
Ba. San Antonio

Callao t (511) 517 1900
Arequipa t (054) 213 506
Cajamarca t (076) 366 092

www.sgs.pe
e Pe.servicios@sgs.com

Miembro del Grupo SGS



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002



INFORME DE ENSAYO
MA2514426-AC-0

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					HUANTA - ME
FECHA DE MUESTREO HORA DE MUESTREO CATEGORIA SUB CATEGORIA					24/04/2025 08:00:00 AGUA RESIDUAL AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado ± Incertidumbre
Análisis Generales					
Sólidos Totales en Suspensión	EW_APHA2540D	mg Sólidos Totales en Suspensión/L	1	3	166 ± 38
Demanda Química de Oxígeno	EW_APHA5220D	mgO ₂ /L	1.8	4.5	417.7 ± 41.80
Aceites y Grasas	EW_ASTMD3921	mg/L	0.2	0.4	6.1 ± 1.30

Este documento es válido solo en entorno electrónico, de imprimirse pierde validez.

Página 2 de 5

SGS del Perú S.A.C.

Av. Elmer Faucett 3348
Ernesto Gunther 275
Jr. Arnaldo Márquez

Callao 1
Parque Industrial
Ba. San Antonio

Callao t (511) 517 1900 www.sgs.pe
Arequipa t (054) 213 506 e Pe.servicios@sgs.com
Cajamarca t (076) 366 092

Miembro del Grupo SGS



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002



INFORME DE ENSAYO
MA2514426-AC-0

CONTROL DE CALIDAD

LC: Límite de cuantificación
MB: Blanco del proceso.
LCS %Recovery: Porcentaje de recuperación del patrón de proceso.
MS %Recovery: Porcentaje de recuperación de la muestra adicionada.
MSD %RPD: Diferencia Porcentual Relativa entre los duplicados de la muestra adicionada.
Dup %RPD: Diferencia Porcentual Relativa entre los duplicados del proceso.

Parámetro	Unidad	LC	MB	DUP %RPD	LCS %Recovery	MS %Recovery	MSD %RPD
Aceites y Grasas	mg/L	0.4	<0.4	0%	98%	103%	
Demanda Química de Oxígeno	mgO ₂ /L	4.5	<4.5		97 - 100%	106%	3 - 11%
Sólidos Totales en Suspensión	mg Sólidos Totales en Suspensión/L	3	<3	1 - 2%	98 - 100%		



**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002**



**INFORME DE ENSAYO
MA2514426-AC-0**

REFERENCIAS DE MÉTODOS DE ENSAYO

Referencia	Sede	Parámetro	Método de Ensayo
EW_APHA2540D	Callao	Sólidos Totales en Suspensión	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540-D: 23rd: 2017. Solids: Total Suspended Solids dried at 103-105 °C. (VALIDADO - Aplicado fuera del alcance) 2017
EW_APHA5220D	Callao	Demanda Química de Oxígeno	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5220 D. 23rd Ed: 2017. Chemical Oxygen Demand, Closed Reflux, Colorimetric Method (VALIDADO - Aplicado fuera del alcance) 2017.
EW_ASTMD3921	Callao	Aceites y Grasas	ASTM D3921 - 96 (Reapproved 2011). Standard Test Method for Oil and Grease and Petroleum Hydrocarbons in Water. (VALIDADO - Aplicado fuera del alcance) 2015.



**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002**



**INFORME DE ENSAYO
MA2514426-AC-0**

NOTAS

- El reporte de tiempo se realiza en el sistema horario de 24 horas.
- Las muestras recibidas cumplen con las condiciones necesarias para la realización de los análisis solicitados.
- La incertidumbre expandida de medición reportada se ha obtenido multiplicando la incertidumbre estándar combinada por el factor de cobertura $k=2$, de modo que la probabilidad de cobertura corresponde aproximadamente a un nivel de confianza del 95%.

"Este informe de ensayo, al estar en el marco de la acreditación del INACAL-DA, se encuentra dentro del ámbito de reconocimiento multilateral/mutuo de los miembros firmantes de IAAC e ILAC"

Este documento es emitido bajo las Condiciones Generales de Servicio de SGS del Perú S.A.C., las cuales se encuentran descritas en la página <http://www.sgs.pe/es-ES/Terms-and-Conditions.aspx>. Son especialmente importantes las disposiciones sobre limitación de responsabilidad, pago de indemnizaciones y jurisdicción definidas en dichas Condiciones Generales de Servicio, su alteración o su uso indebido constituye un delito contra la fe pública y se regula por las disposiciones civiles y penales de la materia; queda prohibida la reproducción total o parcial, salvo autorización escrita de SGS del Perú S.A.C.

Los resultados del informe de ensayo sólo son válidos para la(s) muestra(s) ensayadas; no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. La compañía no es responsable del origen o fuente de la cual las muestras han sido tomadas y de la información proporcionada por el cliente.

Última Revisión Enero 2022

Este documento es válido solo en entorno electrónico, de imprimirse pierde validez.

Página 5 de 5

QUINTAS MENDEZ DAYMA

JR. 2 DE MAYO 845 - AYACUCHO - HUANTA - HUANTA

ENV / LB-356423-003

Fecha de Recepción SGS : 27-04-2025

Fecha de Ejecución : Del 27-04-2025 al 06-05-2025

Muestreo Realizado Por : CLIENTE

Estación de Muestreo
HUANTA - ME

Emitido por SGS del Perú S.A.C.

Impreso el 06/05/2025



Frank M. Julcamoro Quispe
C.Q.P. 1033
Supervisor de Laboratorio



Elizabeth V. Capuñay España
C.B.P 8508
Coordinador de Laboratorio Microbiología





INFORME DE ENSAYO MA2514426-NA-0

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					HUANTA - ME
FECHA DE MUESTREO HORA DE MUESTREO CATEGORIA SUB CATEGORIA					24/04/2025 08:00:00 AGUA RESIDUAL AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado ± Incertidumbre
Análisis Generales					
Potencial de Hidrógeno	EW APHA4500HB	pH	--	--	7.08 *
Turbidez	EW APHA2130B	NTU	0.100	0.200	119.000 (**) ± 2.97
Demanda Bioquímica de Oxígeno	EW APHA5210B	mg/L	1.0	2.6	166.2 (**) ± 34.90
Análisis Microbiológicos					
Numeración de Coliformes Fecales o Termotolerantes	EW_APHA9221E_NMP_CX	NMP/100 mL	--	--	920,000.0 (**) ±

Este documento es válido solo en entorno electrónico, de imprimirse pierde validez.

Página 2 de 5

INFORME DE ENSAYO MA2514426-NA-0

CONTROL DE CALIDAD

LC: Límite de cuantificación
MB: Blanco del proceso.
LCS %Recovery: Porcentaje de recuperación del patrón de proceso.
MS %Recovery: Porcentaje de recuperación de la muestra adicionada.
MSD %RPD: Diferencia Porcentual Relativa entre los duplicados de la muestra adicionada.
Dup %RPD: Diferencia Porcentual Relativa entre los duplicados del proceso.

Parámetro	Unidad	LC	MB	DUP %RPD	LCS %Recovery
Turbidez	NTU	0.200		4 - 13%	99 - 100%
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	2.6	<2.6		98 - 100%
Potencial de Hidrógeno	pH	--		0%	100%



INFORME DE ENSAYO MA2514426-NA-0

REFERENCIAS DE MÉTODOS DE ENSAYO

Referencia	Sede	Parámetro	Método de Ensayo
EW_APHA4500HB	Callao	Potencial de Hidrógeno	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-H+-B; 23rd Ed: 2017. pH Value: Electrometric Method.
EW_APHA2130B	Callao	Turbidez	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2130 B, 24th Ed.: 2023. Turbidity. Nephelometric Method
EW_APHA5210B	Callao	Demanda Bioquímica de Oxígeno	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5210 B ;24th Ed: 2023. Biochemical Oxygen Demand (BOD): 5-Day BOD test
EW_APHA9221E_NMP_CX	Cajamarca	Numeración de Coliformes Fecales o Termotolerantes	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 9221E.1, 24th Ed; 2023. Multiple-tube Fermentation Technique for Members of the Coliform Group. Thermotolerant (Fecal) Coliform Procedure. Thermotolerant Coliform Test (EC Medium).

INFORME DE ENSAYO MA2514426-NA-0

NOTAS

- El reporte de tiempo se realiza en el sistema horario de 24 horas.
- Las muestras recibidas cumplen con las condiciones necesarias para la realización de los análisis solicitados.
- La incertidumbre expandida de medición reportada se ha obtenido multiplicando la incertidumbre estándar combinada por el factor de cobertura $k=2$, de modo que la probabilidad de cobertura corresponde aproximadamente a un nivel de confianza del 95%.
- (*) Los resultados obtenidos corresponden a métodos que no han sido acreditados por el INACAL-DA.
- (**) Los resultados del ensayo no se encuentran dentro del marco de la acreditación otorgada por INACAL - DA debido a que la muestra no es idónea para el ensayo solicitado. Los resultados se emiten a solicitud del cliente.

Este documento es emitido bajo las Condiciones Generales de Servicio de SGS del Perú S.A.C, las cuales se encuentran descritas en la página <http://www.sgs.pe/es-ES/Terms-and-Conditions.aspx>. Son especialmente importantes las disposiciones sobre limitación de responsabilidad, pago de indemnizaciones y jurisdicción definidas en dichas Condiciones Generales de Servicio, su alteración o su uso indebido constituye un delito contra la fe pública y se regula por las disposiciones civiles y penales de la materia; queda prohibida la reproducción total o parcial, salvo autorización escrita de SGS del Perú S.A.C.

Los resultados del informe de ensayo sólo son válidos para la(s) muestra(s) ensayadas; no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. La compañía no es responsable del origen o fuente de la cual las muestras han sido tomadas y de la información proporcionada por el cliente.

Última Revisión Enero 2022

Este documento es válido solo en entorno electrónico, de imprimirse pierde validez.

Página 5 de 5



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002



INFORME DE ENSAYO
MA2514427-AC-0

QUINTAS MENDEZ DAYMA

JR. 2 DE MAYO 845 - AYACUCHO - HUANTA - HUANTA

ENV / LB-356423-004

Fecha de Recepción SGS : 27-04-2025

Fecha de Ejecución : Del 27-04-2025 al 06-05-2025

Muestreo Realizado Por : CLIENTE

Estación de Muestreo
HUANTA - MS

Emitido por SGS del Perú S.A.C.

Impreso el 06/05/2025

Frank M. Julcamoro Quispe

C.Q.P. 1033

Supervisor de Laboratorio

"Este informe de ensayo, al estar en el marco de la acreditación del INACAL-DA, se encuentra dentro del ámbito de reconocimiento multilateral/mutuo de los miembros firmantes de IAAC e ILAC"

Este documento es válido solo en entorno electrónico, de imprimirse pierde validez.

Página 1 de 5



SGS del Perú S.A.C.

Av. Elmer Faucett 3348
Ernesto Gunther 275
Jr. Arnaldo Márquez

Callao 1
Parque Industrial
Ba. San Antonio

Callao t (511) 517 1900
Arequipa t (054) 213 506
Cajamarca t (076) 366 092

www.sgs.pe
e Pe.servicios@sgs.com

Miembro del Grupo SGS



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002



INFORME DE ENSAYO
MA2514427-AC-0

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					HUANTA - MS
FECHA DE MUESTREO HORA DE MUESTREO CATEGORIA SUB CATEGORIA					24/04/2025 08:00:00 AGUA RESIDUAL AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado ± Incertidumbre
Análisis Generales					
Sólidos Totales en Suspensión	EW_APHA2540D	mg Sólidos Totales en Suspensión/L	1	3	76 ± 17
Demanda Química de Oxígeno	EW_APHA5220D	mgO ₂ /L	1.8	4.5	275.7 ± 27.60
Aceites y Grasas	EW_ASTMD3921	mg/L	0.2	0.4	<0.4

Este documento es válido solo en entorno electrónico, de imprimirse pierde validez.

Página 2 de 5

SGS del Perú S.A.C.

Av. Elmer Faucett 3348
Ernesto Gunther 275
Jr. Arnaldo Márquez

Callao 1
Parque Industrial
Ba. San Antonio

Callao t (511) 517 1900
Arequipa t (054) 213 506
Cajamarca t (076) 366 092
www.sgs.pe
e Pe.servicios@sgs.com

Miembro del Grupo SGS



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002



INFORME DE ENSAYO
MA2514427-AC-0

CONTROL DE CALIDAD

LC: Límite de cuantificación
MB: Blanco del proceso.
LCS %Recovery: Porcentaje de recuperación del patrón de proceso.
MS %Recovery: Porcentaje de recuperación de la muestra adicionada.
MSD %RPD: Diferencia Porcentual Relativa entre los duplicados de la muestra adicionada.
Dup %RPD: Diferencia Porcentual Relativa entre los duplicados del proceso.

Parámetro	Unidad	LC	MB	DUP %RPD	LCS %Recovery	MS %Recovery	MSD %RPD
Aceites y Grasas	mg/L	0.4	<0.4	0%	98%	103%	
Demanda Química de Oxígeno	mgO ₂ /L	4.5	<4.5		97 - 100%	106%	3 - 11%
Sólidos Totales en Suspensión	mg Sólidos Totales en Suspensión/L	3	<3	1 - 2%	98 - 100%		



**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002**



**INFORME DE ENSAYO
MA2514427-AC-0**

REFERENCIAS DE MÉTODOS DE ENSAYO

Referencia	Sede	Parámetro	Método de Ensayo
EW_APHA2540D	Callao	Sólidos Totales en Suspensión	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540-D: 23rd: 2017. Solids: Total Suspended Solids dried at 103-105 °C. (VALIDADO - Aplicado fuera del alcance) 2017
EW_APHA5220D	Callao	Demanda Química de Oxígeno	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5220 D. 23rd Ed: 2017. Chemical Oxygen Demand, Closed Reflux, Colorimetric Method (VALIDADO - Aplicado fuera del alcance) 2017.
EW_ASTMD3921	Callao	Aceites y Grasas	ASTM D3921 - 96 (Reapproved 2011). Standard Test Method for Oil and Grease and Petroleum Hydrocarbons in Water. (VALIDADO - Aplicado fuera del alcance) 2015.

Este documento es válido solo en entorno electrónico, de imprimirse pierde validez.

Página 4 de 5

SGS del Perú S.A.C.

Av. Elmer Faucett 3348
Ernesto Gunther 275
Jr. Arnaldo Márquez

Callao 1
Parque Industrial
Ba. San Antonio

Callao
Arequipa
Cajamarca

t (511) 517 1900
t (054) 213 506
t (076) 366 092
www.sgs.pe
e Pe.servicios@sgs.com

Miembro del Grupo SGS



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002



INFORME DE ENSAYO
MA2514427-AC-0

NOTAS

- El reporte de tiempo se realiza en el sistema horario de 24 horas.
- Las muestras recibidas cumplen con las condiciones necesarias para la realización de los análisis solicitados.
- La incertidumbre expandida de medición reportada se ha obtenido multiplicando la incertidumbre estándar combinada por el factor de cobertura $k=2$, de modo que la probabilidad de cobertura corresponde aproximadamente a un nivel de confianza del 95%.

"Este informe de ensayo, al estar en el marco de la acreditación del INACAL-DA, se encuentra dentro del ámbito de reconocimiento multilateral/mutuo de los miembros firmantes de IAAC e ILAC"

Este documento es emitido bajo las Condiciones Generales de Servicio de SGS del Perú S.A.C., las cuales se encuentran descritas en la página <http://www.sgs.pe/es-ES/Terms-and-Conditions.aspx>. Son especialmente importantes las disposiciones sobre limitación de responsabilidad, pago de indemnizaciones y jurisdicción definidas en dichas Condiciones Generales de Servicio, su alteración o su uso indebido constituye un delito contra la fe pública y se regula por las disposiciones civiles y penales de la materia; queda prohibida la reproducción total o parcial, salvo autorización escrita de SGS del Perú S.A.C.

Los resultados del informe de ensayo sólo son válidos para la(s) muestra(s) ensayadas; no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. La compañía no es responsable del origen o fuente de la cual las muestras han sido tomadas y de la información proporcionada por el cliente.

Última Revisión Enero 2022

Este documento es válido solo en entorno electrónico, de imprimirse pierde validez.

Página 5 de 5

SGS del Perú S.A.C.

Av. Elmer Faucett 3348
Ernesto Gunther 275
Jr. Arnaldo Márquez

Callao 1
Parque Industrial
Ba. San Antonio

Callao
Arequipa
Cajamarca

t (511) 517 1900
t (054) 213 506
t (076) 366 092

www.sgs.pe
e Pe.servicios@sgs.com

Miembro del Grupo SGS

QUINTAS MENDEZ DAYMA

JR. 2 DE MAYO 845 - AYACUCHO - HUANTA - HUANTA

ENV / LB-356423-004

Fecha de Recepción SGS : 27-04-2025

Fecha de Ejecución : Del 27-04-2025 al 06-05-2025

Muestreo Realizado Por : CLIENTE

Estación de Muestreo
HUANTA - MS

Emitido por SGS del Perú S.A.C.

Impreso el 06/05/2025



Frank M. Julcamoro Quispe
C.Q.P. 1033
Supervisor de Laboratorio



Elizabeth V. Capuñay España
C.B.P 8508
Coordinador de Laboratorio Microbiología





INFORME DE ENSAYO MA2514427-NA-0

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					HUANTA - MS
FECHA DE MUESTREO HORA DE MUESTREO CATEGORIA SUB CATEGORIA					24/04/2025 08:00:00 AGUA RESIDUAL AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado ± Incertidumbre
Análisis Generales					
Potencial de Hidrógeno	EW APHA4500HB	pH	--	--	7.10 *
Turbidez	EW APHA2130B	NTU	0.100	0.200	98.200 (**) ± 7.86
Demanda Bioquímica de Oxígeno	EW APHA5210B	mg/L	1.0	2.6	100.9 (**) ± 21.20
Análisis Microbiológicos					
Numeración de Coliformes Fecales o Termotolerantes	EW_APHA9221E_NMP_CX	NMP/100 mL	--	--	35,000.0 (**) ±

Este documento es válido solo en entorno electrónico, de imprimirse pierde validez.

Página 2 de 5

SGS del Perú S.A.C.

Av. Elmer Faucett 3348
Ernesto Gunther 275
Jr. Arnaldo Márquez

Callao 1
Parque Industrial
Ba. San Antonio

Callao
Arequipa
Cajamarca

t (511) 517 1900
t (054) 213 506
t (076) 366 092

www.sgs.pe
e Pe.servicios@sgs.com

Miembro del Grupo SGS

INFORME DE ENSAYO MA2514427-NA-0

CONTROL DE CALIDAD

LC: Límite de cuantificación
MB: Blanco del proceso.
LCS %Recovery: Porcentaje de recuperación del patrón de proceso.
MS %Recovery: Porcentaje de recuperación de la muestra adicionada.
MSD %RPD: Diferencia Porcentual Relativa entre los duplicados de la muestra adicionada.
Dup %RPD: Diferencia Porcentual Relativa entre los duplicados del proceso.

Parámetro	Unidad	LC	MB	DUP %RPD	LCS %Recovery
Turbidez	NTU	0.200		4 - 13%	99 - 100%
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	2.6	<2.6		98 - 100%
Potencial de Hidrógeno	pH	--		0%	100%

INFORME DE ENSAYO MA2514427-NA-0

REFERENCIAS DE MÉTODOS DE ENSAYO

Referencia	Sede	Parámetro	Método de Ensayo
EW_APHA4500HB	Callao	Potencial de Hidrógeno	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-H+-B; 23rd Ed: 2017. pH Value: Electrometric Method.
EW_APHA2130B	Callao	Turbidez	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2130 B, 24th Ed.: 2023. Turbidity. Nephelometric Method
EW_APHA5210B	Callao	Demanda Bioquímica de Oxígeno	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5210 B ;24th Ed: 2023. Biochemical Oxygen Demand (BOD): 5-Day BOD test
EW_APHA9221E_NMP_CX	Cajamarca	Numeración de Coliformes Fecales o Termotolerantes	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 9221E.1, 24th Ed; 2023. Multiple-tube Fermentation Technique for Members of the Coliform Group. Thermotolerant (Fecal) Coliform Procedure. Thermotolerant Coliform Test (EC Medium).

INFORME DE ENSAYO MA2514427-NA-0

NOTAS

- El reporte de tiempo se realiza en el sistema horario de 24 horas.
- Las muestras recibidas cumplen con las condiciones necesarias para la realización de los análisis solicitados.
- La incertidumbre expandida de medición reportada se ha obtenido multiplicando la incertidumbre estándar combinada por el factor de cobertura $k=2$, de modo que la probabilidad de cobertura corresponde aproximadamente a un nivel de confianza del 95%.
- (*) Los resultados obtenidos corresponden a métodos que no han sido acreditados por el INACAL-DA.
- (**) Los resultados del ensayo no se encuentran dentro del marco de la acreditación otorgada por INACAL - DA debido a que la muestra no es idónea para el ensayo solicitado. Los resultados se emiten a solicitud del cliente.

Este documento es emitido bajo las Condiciones Generales de Servicio de SGS del Perú S.A.C., las cuales se encuentran descritas en la página <http://www.sgs.pe/es-ES/Terms-and-Conditions.aspx>. Son especialmente importantes las disposiciones sobre limitación de responsabilidad, pago de indemnizaciones y jurisdicción definidas en dichas Condiciones Generales de Servicio, su alteración o su uso indebido constituye un delito contra la fe pública y se regula por las disposiciones civiles y penales de la materia; queda prohibida la reproducción total o parcial, salvo autorización escrita de SGS del Perú S.A.C.

Los resultados del informe de ensayo sólo son válidos para la(s) muestra(s) ensayadas; no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. La compañía no es responsable del origen o fuente de la cual las muestras han sido tomadas y de la información proporcionada por el cliente.

Última Revisión Enero 2022

Este documento es válido solo en entorno electrónico, de imprimirse pierde validez.

Página 5 de 5

Anexo 5
Artículo científico

**REDUCCIÓN DE LA TURBIDEZ Y LA DQO MEDIANTE
ELECTROCOAGULACIÓN DE LAS AGUAS DEL AFLUENTE DE LA PTAR
PUCA PUCA DE LA PROVINCIA DE HUANTA**

***TURBIDITY AND COD REDUCTION THROUGH ELECTROCOAGULATION OF
THE INFLUENT WATERS OF THE PUCA PUCA WWTP IN THE PROVINCE OF
HUANTA***

Bach. Dayma Quintas Mendez (ORCID: 0009-0001-1740-1666)

Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga.

Correo institucional: dayma.quintas.30@unsch.edu.pe

Resumen

La contaminación de los recursos hídricos por efluentes domésticos insuficientemente tratados constituye un problema ambiental de creciente relevancia en el Perú. El objetivo de la presente investigación fue evaluar la reducción de la turbidez y la demanda química de oxígeno (DQO) mediante el proceso de electrocoagulación de las aguas del afluente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) Puca Puca de la provincia de Huanta, región Ayacucho. La investigación fue de tipo aplicada, con enfoque cuantitativo, nivel explicativo y diseño experimental, empleándose un diseño estadístico Box-Behnken de cuatro factores (pH inicial, densidad de corriente, distancia entre electrodos y tiempo de operación) procesado con el software Design Expert 12. Se utilizó una celda electroquímica de acrílico de tipo discontinuo (batch) de 3,146 L de capacidad, con electrodos de aluminio en configuración monopolar en paralelo, tratándose 2500 mL de agua residual por ensayo. Las condiciones óptimas de operación correspondieron a un pH de 7,5, una densidad de corriente de 2,25

mA/cm², una distancia entre electrodos de 1 cm y un tiempo de operación de 15 minutos, con las cuales se alcanzó una remoción total promedio de contaminantes de 58,15 %. El análisis fisicoquímico del agua tratada evidenció reducciones significativas de turbidez, DQO, sólidos suspendidos totales y aceites y grasas, cumpliendo los Límites Máximos Permisibles. Se concluye que la electrocoagulación con electrodos de aluminio constituye una alternativa técnicamente viable como tratamiento complementario para dicha planta.

Palabras clave: *electrocoagulación, turbidez, demanda química de oxígeno, aguas residuales, electrodos de aluminio, PTAR Puca Puca.*

Abstract

Water resource pollution caused by insufficiently treated domestic effluents constitutes an environmental problem of growing relevance in Peru. The objective of this research was to evaluate the reduction of turbidity and chemical oxygen demand (COD) through the electrocoagulation process of the influent waters of the Puca Puca Wastewater Treatment Plant (WWTP) in the province of Huanta, Ayacucho region. The research was applied, with a quantitative approach, explanatory level and experimental design, employing a four-factor Box-Behnken statistical design (initial pH, current density, distance between electrodes and operating time) processed with Design Expert 12 software. A batch-type acrylic electrochemical cell with a capacity of 3.146 L was used, with aluminum electrodes in a monopolar parallel configuration, treating 2500 mL of wastewater per test. The optimal operating conditions corresponded to a pH of 7.5, a current density of 2.25 mA/cm², a distance between electrodes of 1 cm and an operating time of 15 minutes, achieving an average total pollutant removal of 58.15 %. The physicochemical analysis of the treated water showed significant reductions in

turbidity, COD, total suspended solids, and oils and greases, complying with the Maximum Permissible Limits. It is concluded that electrocoagulation with aluminum electrodes constitutes a technically viable alternative as a pretreatment or complementary treatment for said plant.

Keywords: *electrocoagulation, turbidity, chemical oxygen demand, wastewater, aluminum electrodes, Puca Puca WWTP.*

I. Introducción

El agua constituye un recurso natural estratégico e insustituible para el sostenimiento de la vida, el desarrollo económico y la estabilidad de los ecosistemas. No obstante, su disponibilidad en condiciones de calidad adecuada se ha convertido en uno de los mayores desafíos del siglo XXI. A escala mundial, el acelerado crecimiento demográfico, la expansión urbana no planificada y la intensificación de las actividades productivas han incrementado de manera sostenida la generación de aguas residuales, muchas de las cuales son vertidas a los cuerpos receptores sin un tratamiento adecuado. La Organización de las Naciones Unidas ha advertido reiteradamente que una proporción significativa de las aguas residuales generadas en los países en vías de desarrollo retorna al ambiente sin tratamiento efectivo, comprometiendo la salud pública y la integridad de los ecosistemas acuáticos.

En América Latina, esta problemática adquiere dimensiones particularmente críticas debido a las limitaciones de infraestructura sanitaria, la insuficiente cobertura de los sistemas de tratamiento y las restricciones presupuestarias que enfrentan los operadores de saneamiento. El Perú no es ajeno a esta realidad: una parte considerable de las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas presenta deficiencias operativas, sobrecarga hidráulica y orgánica, y dificultades

para cumplir con los Límites Máximos Permisibles establecidos por la normativa ambiental vigente. La región Ayacucho, y en particular la provincia de Huanta, refleja estas limitaciones estructurales en el desempeño de su infraestructura de saneamiento.

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Puca Puca, ubicada en la provincia de Huanta, constituye un caso representativo de esta problemática. El sostenido crecimiento poblacional del ámbito urbano de Huanta ha sobrepasado la capacidad operativa y los parámetros de diseño originales de la planta, ocasionando que tanto su afluente como su efluente presenten una elevada carga orgánica, expresada como demanda química de oxígeno (DQO), y una alta concentración de sólidos suspendidos, manifestada en niveles de turbidez que exceden los valores deseables. Esta situación resulta especialmente preocupante si se considera que las aguas resultantes son empleadas para el riego agrícola en las zonas aledañas, lo que representa un riesgo sanitario inaceptable por la potencial transmisión de agentes patógenos y la acumulación de contaminantes en los suelos y cultivos.

Frente a este escenario, resulta imperativo el desarrollo y la evaluación de tecnologías de tratamiento eficientes, descentralizadas, compactas y sostenibles, capaces de superar las limitaciones inherentes a los métodos convencionales. Los sistemas tradicionales de coagulación química demandan la adición masiva de reactivos, generan grandes volúmenes de lodos residuales y requieren extensas áreas de terreno, mientras que los tratamientos biológicos convencionales son sensibles a las variaciones de carga y exigen prolongados tiempos de retención. En este contexto, la electrocoagulación emerge como una alternativa tecnológica prometedora, al combinar los principios de la coagulación, la floculación y la electroquímica en un proceso compacto, de operación sencilla y con menor

generación de lodos.

La electrocoagulación es un proceso electroquímico en el cual se aplica una corriente eléctrica continua a través de electrodos metálicos de sacrificio, generalmente de aluminio o de hierro, sumergidos en el agua residual. Bajo la acción del campo eléctrico, el ánodo experimenta una disolución electrolítica que libera cationes metálicos directamente en el seno del líquido, los cuales se hidrolizan y generan in situ una diversidad de especies coagulantes activas. En el caso de los electrodos de aluminio, la oxidación anódica libera iones Al^{3+} conforme a la semirreacción de oxidación, mientras que en el cátodo se produce la reducción del agua con desprendimiento de hidrógeno gaseoso e iones hidroxilo. Estas reacciones pueden representarse mediante las siguientes ecuaciones:

En el ánodo (oxidación): $\text{Al}_{(s)} \rightarrow \text{Al}^{3+}_{(ac)} + 3e^{-}$

En el cátodo (reducción): $2\text{H}_2\text{O}_{(l)} + 2e^{-} \rightarrow \text{H}_{2(g)} + 2\text{OH}^{-}$

Hidrólisis y formación del coagulante: $\text{Al}^{3+}_{(ac)} + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Al}(\text{OH})_{3(s)} + 3\text{H}^{+}$

Reacción global: $2\text{Al}_{(s)} + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{Al}(\text{OH})_{3(s)} + 3\text{H}_{2(g)}$

El hidróxido de aluminio amorfo formado, $\text{Al}(\text{OH})_{3(s)}$, posee una elevada superficie específica y una notable capacidad de adsorción, actuando como un eficiente agente coagulante que neutraliza las cargas eléctricas superficiales de las partículas coloidales, responsables de la turbidez, y favorece su desestabilización, agregación y posterior separación. Simultáneamente, el hidrógeno gaseoso generado en el cátodo asciende en forma de microburbujas que arrastran los flóculos formados hacia la superficie, fenómeno conocido como electroflotación, complementando la remoción por sedimentación. La eficiencia global del proceso depende de manera crítica de un conjunto de parámetros de operación, entre los que destacan el pH inicial, la densidad de corriente aplicada, la distancia entre los

electrodos y el tiempo de tratamiento, cuya interacción determina tanto la dosis de coagulante generada como la naturaleza de las especies hidrolizadas predominantes.

En consecuencia, la presente investigación tuvo como objetivo general evaluar la reducción de la turbidez y la demanda química de oxígeno mediante el proceso de electrocoagulación de las aguas del afluente de la PTAR Puca Puca de la provincia de Huanta. Como objetivos específicos se plantearon: caracterizar las propiedades fisicoquímicas iniciales del afluente (turbidez, DQO, conductividad, pH y temperatura); determinar los parámetros de operación óptimos del proceso de electrocoagulación —pH, densidad de corriente, distancia entre electrodos y tiempo de operación— que influyen significativamente y maximizan la reducción de la turbidez y la DQO; y evaluar las propiedades fisicoquímicas del agua tratada, contrastándolas con los Límites Máximos Permisibles vigentes para efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas.

II. Metodología

La presente investigación fue de tipo aplicada, por cuanto empleó los conocimientos teóricos de la electroquímica y la ingeniería ambiental para resolver un problema concreto de tratamiento de aguas residuales. El enfoque fue cuantitativo, dado que la recolección y el análisis de los datos se fundamentaron en la medición numérica de las variables y en su tratamiento estadístico. El nivel fue explicativo, al buscar establecer las relaciones causa-efecto entre los parámetros de operación del proceso y las eficiencias de remoción alcanzadas, y el diseño fue experimental, con manipulación deliberada de las variables independientes.

Para la planificación de los ensayos se empleó un diseño experimental estadístico

de tipo Box-Behnken, perteneciente a la Metodología de Superficie de Respuesta (RSM), implementado mediante el software Design Expert 12. Se analizaron cuatro factores numéricos: el pH inicial, la densidad de corriente, la distancia entre electrodos y el tiempo de operación. Este diseño fue seleccionado por su eficiencia en el número de corridas experimentales requeridas, su capacidad para ajustar modelos cuadráticos de segundo orden y su idoneidad para localizar las condiciones óptimas de operación dentro de la región experimental, evitando las combinaciones de los vértices extremos que caracterizan a otros diseños factoriales.

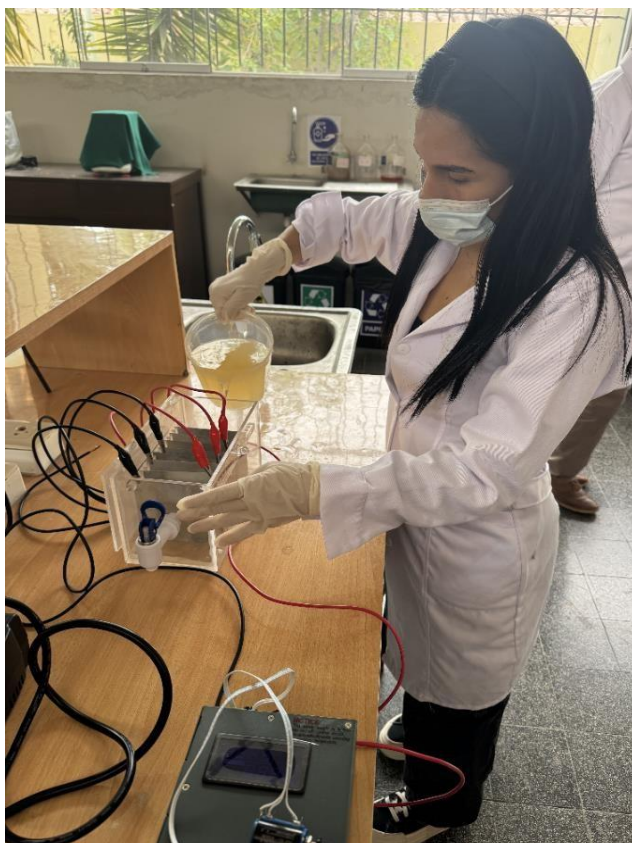
La población de estudio estuvo constituida por las aguas residuales domésticas del afluente de la PTAR Puca Puca de la provincia de Huanta, región Ayacucho. La muestra se recolectó en el punto de ingreso de la planta, cuyas coordenadas geográficas corresponden a la latitud -12,969192 y la longitud -74,271859. El muestreo fue de tipo no probabilístico por conveniencia, de carácter compuesto, recolectándose las muestras en el horario de mayor caudal conforme a los lineamientos del Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad de los Efluentes de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales. Las muestras se preservaron en cadena de frío a una temperatura menor o igual a 4 °C y se transportaron al laboratorio para su procesamiento dentro de las 24 horas siguientes.

El procedimiento experimental se desarrolló de manera secuencial. En primer lugar, se realizó la caracterización fisicoquímica inicial de la muestra, determinándose el pH, la turbidez, la DQO, la conductividad eléctrica y la temperatura, empleando equipos previamente calibrados, entre ellos el fotómetro multiparamétrico Hanna HI83399 y el turbidímetro HACH 2100Q. Posteriormente, el agua residual fue

sometida a un tratamiento primario previo, consistente en una filtración y sedimentación básica orientada a remover los sólidos gruesos y el material flotante que pudieran interferir con el desempeño de la celda electroquímica.

Figura 1

Configuración experimental para la electrocoagulación



La celda electroquímica consistió en un reactor de acrílico transparente de tipo discontinuo (batch), con una capacidad geométrica de 3,146 L, en el cual se procesó un volumen neto de muestra de 2500 mL por cada ensayo. Como electrodos se emplearon placas de aluminio dispuestas en configuración monopolar en paralelo, conectadas a una fuente de corriente continua regulable de 0 a 30 V y de 0 a 10 A, modelo HANMATEK HM310T. Antes de cada corrida, los electrodos fueron lijados, enjuagados con agua destilada y secados, a fin de eliminar la capa de pasivación y garantizar condiciones superficiales homogéneas. La ejecución de los tratamientos se realizó según la combinación establecida por

la matriz del diseño Box-Behnken, variando el pH inicial en el rango de 6 a 9, la distancia entre electrodos entre 1 y 2 cm, y el tiempo de operación entre 10 y 20 minutos, y la densidad de corriente correspondiente. Concluido cada ensayo, se dejó sedimentar el agua tratada, se extrajo el sobrenadante evitando el arrastre de lodos y espumas, procediendo a la evaluación fisicoquímica final. Los datos obtenidos fueron procesados estadísticamente mediante el análisis de varianza y la optimización numérica proporcionada por el software Design Expert 12.

III. Resultados y discusión

Resultados

La caracterización fisicoquímica inicial del afluente de la PTAR Puca Puca evidenció una elevada carga contaminante, con valores de turbidez y DQO que superan los Límites Máximos Permisibles establecidos para efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas. La Tabla 1 resume los parámetros iniciales representativos del agua residual cruda, los cuales confirman la condición de un efluente doméstico de carga media a alta y justifican la necesidad de un tratamiento complementario.

Tabla 1

Propiedades físicas y químicas del efluente de la PTAR Huanta

Descripción	Unidad	Valor
Turbidez	NTU	98,2
Demanda química de oxígeno	mg/L	275,7
Demanda bioquímica de oxígeno	mg/L	100,9
Coliformes termotolerantes	NMP/100mL	35000
Aceits y grasas	mg/L	< 0,4
Sólidos totales suspendidos	mg/L	76
pH	-.-	7,10

Nota. El análisis se realizó en la empresa SGS.

En cuanto a la eficiencia de remoción experimental, la matriz de ensayos derivada del diseño Box-Behnken permitió evaluar el comportamiento de la turbidez bajo las distintas combinaciones de los factores. Los resultados evidenciaron una marcada variabilidad de las eficiencias en función de las condiciones de operación, confirmando la influencia significativa de los parámetros seleccionados sobre la respuesta. Las corridas ejecutadas en condiciones cercanas a la neutralidad, con menor distancia entre electrodos y tiempos intermedios de operación, exhibieron sistemáticamente las mayores eficiencias de remoción.

El análisis estadístico de varianza (ANOVA) confirmó la significancia del modelo matemático cuadrático sugerido por el software Design Expert. El modelo presentó un coeficiente de determinación R^2 de 0,9494 y un R^2 ajustado de 0,8988, lo que indica que el modelo explica aproximadamente el 95 % de la variabilidad observada en la respuesta. Asimismo, el modelo resultó estadísticamente significativo (p-valor menor que 0,05), en tanto que la falta de ajuste no fue significativa, lo que valida la adecuación del modelo cuadrático para representar el comportamiento del sistema. La ecuación predictiva del modelo, en términos de factores reales, para la remoción de turbidez se expresa de manera general como:

$$Y = \beta_0 + \beta_1(\text{pH}) + \beta_2(J) + \beta_3(d) + \beta_4(t) + \beta_{ij}(X_i X_j) + \beta_{ii}(X_i^2)$$

donde Y representa la eficiencia de remoción de turbidez; pH, J, d y t corresponden al pH inicial, la densidad de corriente, la distancia entre electrodos y el tiempo de operación, respectivamente; y los coeficientes β representan los efectos lineales, de interacción y cuadráticos estimados por regresión. Los coeficientes específicos deben consignarse a partir de la salida del software una vez completada la fase experimental.

La optimización numérica, orientada a maximizar la eficiencia de remoción dentro

de la región experimental, determinó como condiciones óptimas de operación un pH de 7,5, una densidad de corriente de 2,25 mA/cm², una distancia entre electrodos de 1 cm y un tiempo de tratamiento de 15 minutos. Bajo estas condiciones se alcanzó una remoción óptima experimental del 58,15 % del conjunto de contaminantes evaluados, con una elevada concordancia entre el valor predicho por el modelo y el valor obtenido experimentalmente, lo que confirma la robustez de la optimización.

Finalmente, bajo las condiciones óptimas determinadas, se verificó que el proceso de electrocoagulación no solo redujo la turbidez, sino que también disminuyó de manera notable la DQO, los sólidos suspendidos totales y el contenido de aceites y grasas. Los valores finales de estos parámetros en el agua tratada cumplieron de forma rigurosa con los Límites Máximos Permisibles nacionales establecidos por el Ministerio del Ambiente para efluentes de PTAR, en particular el valor de DQO inferior a 200 mg/L, lo que demuestra la eficacia integral del tratamiento propuesto.

Tabla 2

Condiciones óptimas de electrocoagulación

Nombre	Unidad	Valor
Densidad de corriente	mA/cm ²	25,4472
pH	-.-	7,6623
Distancia entre electrodos	cm	1,58615
Tiempo	min	15,6799
Remoción de turbidez	%	59,0958

Nota. El rendimiento óptimo predicho de remoción de turbidez es 59,0958 %.

Discusión

El efecto del pH inicial sobre la eficiencia del proceso constituye uno de los hallazgos más relevantes del estudio y se explica a partir de la química de especiación del aluminio en medio acuoso. A valores de pH fuertemente ácidos

predominan las especies solubles del catión Al^{3+} y sus complejos monoméricos, que poseen una limitada capacidad coagulante; a valores fuertemente alcalinos, en cambio, se favorece la formación del anión aluminato soluble $\text{Al}(\text{OH})_4^-$, igualmente poco efectivo para la desestabilización coloidal. En el rango cercano a la neutralidad, en torno al pH óptimo de 7,5 determinado en esta investigación, predomina la precipitación del hidróxido de aluminio amorfo $\text{Al}(\text{OH})_3(\text{s})$, especie insoluble que actúa como un excelente agente de barrido coloidal mediante el mecanismo de coagulación por barrido de flóculos. Este comportamiento es coherente con los diagramas de solubilidad del aluminio ampliamente reportados en la literatura y explica por qué las eficiencias máximas se concentraron en la región neutra del espacio experimental.

El efecto conjunto de la densidad de corriente y el tiempo de operación se interpreta a la luz de la ley de Faraday, la cual establece una relación de proporcionalidad directa entre la carga eléctrica aplicada y la masa de aluminio disuelta en el ánodo de sacrificio. Un incremento en la densidad de corriente eleva la tasa de liberación de iones Al^{3+} y, por tanto, la dosis de coagulante disponible, además de intensificar la generación de microburbujas de hidrógeno en el cátodo, que favorecen la electroflotación de los flóculos. Sin embargo, la existencia de un tiempo óptimo intermedio de 15 minutos sugiere que, superado cierto umbral, los incrementos adicionales no se traducen en mejoras proporcionales de la remoción, sino que conllevan un mayor consumo energético y de material electródico, evidenciando la importancia de la optimización para equilibrar eficiencia y costo operativo.

El efecto de la distancia entre electrodos, cuyo valor óptimo se estableció en 1 cm, responde a un compromiso entre dos fenómenos contrapuestos. A distancias excesivamente reducidas, la intensa turbulencia y la proximidad de los campos

pueden fragmentar los flóculos formados, dificultando su crecimiento y posterior separación; a distancias mayores, en cambio, se incrementa la resistencia óhmica del sistema, lo que eleva las pérdidas energéticas por efecto Joule, promueve el calentamiento del medio y debilita la intensidad del campo eléctrico efectivo, reduciendo la eficiencia de la coalescencia coloidal. La distancia óptima de 1 cm representa, por tanto, el punto de equilibrio que maximiza la formación y estabilidad de los flóculos con un consumo energético razonable.

Al contrastar los resultados obtenidos con los reportados por otros autores que han tratado aguas residuales municipales mediante electrocoagulación, se observa una concordancia general en las tendencias identificadas, particularmente en lo referente al rol determinante del pH neutro y de la densidad de corriente sobre la eficiencia del proceso. Las eficiencias alcanzadas en la presente investigación se ubican dentro de los rangos documentados para efluentes domésticos de características similares, si bien la comparación directa debe realizarse con cautela debido a las diferencias en la composición de las aguas, la configuración de las celdas y los criterios de cuantificación empleados. El éxito de la optimización se fundamenta en el empleo de la Metodología de Superficie de Respuesta, que permitió modelar las interacciones entre los factores y localizar de manera eficiente las condiciones óptimas de operación, superando las limitaciones de los enfoques experimentales univariados tradicionales.

Conclusiones

1. Se evaluó la reducción de la turbidez y la demanda química de oxígeno mediante el proceso de electrocoagulación de las aguas del afluente de la PTAR Puca Puca, demostrándose que esta tecnología alcanzó una remoción total promedio de contaminantes del 58,15 % bajo las condiciones óptimas de

operación, lo que confirma su eficacia para el tratamiento de dichas aguas residuales.

2. La caracterización fisicoquímica inicial evidenció que el afluente de la PTAR Puca Puca presenta una elevada carga contaminante, con niveles de turbidez y DQO que superan los Límites Máximos Permisibles y que sobrepasan la capacidad operativa actual de la planta, justificando la incorporación de un tratamiento complementario.
3. Los parámetros óptimos de operación del proceso de electrocoagulación, determinados estadísticamente mediante el modelado cuadrático de superficie de respuesta con el software Design Expert 12, correspondieron a un pH de 7,5, una densidad de corriente de 2,25 mA/cm², una distancia entre electrodos de 1 cm y un tiempo de operación de 15 minutos.
4. El agua tratada bajo las condiciones óptimas cumplió con los Límites Máximos Permisibles establecidos para efluentes de PTAR domésticas, reduciendo significativamente la turbidez, la DQO, los sólidos suspendidos totales y los aceites y grasas, lo que valida técnicamente la electrocoagulación con electrodos de aluminio como una alternativa viable de pretratamiento o tratamiento complementario para dicha planta.

Referencias bibliográficas

Blas Malqui, K. J., & Conislla Ccoicca, Y. (2021). Remoción de la turbidez y demanda química de oxígeno de aguas residuales mediante electrocoagulación [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Centro del Perú]. Repositorio Institucional UNCP.

Riccio Yauri, G. A. (2015). Tratamiento de aguas residuales domésticas mediante

el proceso de electrocoagulación [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio Institucional UNI.

Nordio, F. (2024). Optimización de procesos de electrocoagulación para el tratamiento de efluentes mediante metodología de superficie de respuesta. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 40(2), 215–231.

Chang, R., & Overby, J. (2020). *Química* (13.^a ed.). McGraw-Hill Interamericana.

Castillo, J., Moreira, Y., & Banchón, C. (2025). Electrocoagulación de aguas residuales domésticas: revisión sistemática de efectos operacionales. *Research, Society and Development*, 14(5), e2814548700. <https://doi.org/10.33448/rsd-v14i5.48700>

Rodríguez-Díaz, Y. J., Fuentes-Guevara, M. D., Beleño-Díaz, O. D., & Montoya-Armenta, L. H. (2021). Electrocoagulación como alternativa de tratamiento de aguas residuales mixtas originadas en la industria del procesamiento de lácteos y cárnicos. *Tecnura*, 25(67), 26–39. <https://doi.org/10.14483/22487638.15769>

Moussa, D. T., El-Naas, M. H., Nasser, M., & Al-Marri, M. J. (2017). A comprehensive review of electrocoagulation for water treatment: Potentials and challenges. *Journal of Environmental Management*, 186, 24–41. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.10.032>

Garcia-Segura, S., Eiband, M. M. S. G., de Melo, J. V., & Martínez-Huitle, C. A. (2017). Electrocoagulation and advanced electrocoagulation processes: A general review about the fundamentals, emerging applications and its association with other technologies. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 801, 267–299. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2017.07.047>

Hakizimana, J. N., Gourich, B., Chafi, M., Stiriba, Y., Vial, C., Drogui, P., & Naja, J.

- (2017). Electrocoagulation process in water treatment: A review of electrocoagulation modeling approaches. *Desalination*, 404, 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.10.011>
- Bhatti, M. S., Reddy, A. S., & Thukral, A. K. (2009). Electrocoagulation removal of Cr(VI) from simulated wastewater using response surface methodology. *Journal of Hazardous Materials*, 172(2–3), 839–846. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.07.072>
- Montgomery, D. C. (2017). *Design and analysis of experiments* (9th ed.). John Wiley & Sons.
- Ministerio del Ambiente. (2010). Decreto Supremo N.º 003-2010-MINAM. Límites Máximos Permisibles para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales. *Diario Oficial El Peruano*.
- APHA, AWWA, & WEF. (2017). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (23rd ed.). American Public Health Association.
- Mollah, M. Y. A., Schennach, R., Parga, J. R., & Cocke, D. L. (2001). Electrocoagulation (EC) — science and applications. *Journal of Hazardous Materials*, 84(1), 29–41. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(01\)00176-5](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(01)00176-5)
- Koby, M., Can, O. T., & Bayramoglu, M. (2003). Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes. *Journal of Hazardous Materials*, 100(1–3), 163–178. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(03\)00102-X](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(03)00102-X)



ESCUELA DE

POSGRADOUNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL
DE HUAMANGA**CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD N°0106-2026-UNSCH-EPG/KBA**

El que suscribe; responsable verificador de originalidad de trabajo de tesis de Posgrado en segunda instancia para la **Escuela de Posgrado – UNSCH**; en cumplimiento a la Resolución Directoral N°002-2026-UNSCH-EPG/D, Reglamento de Originalidad de trabajos de Investigación de la UNSCH, otorga lo siguiente:

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD

AUTOR	Bach. DAYMA QUINTAS MENDEZ
DENOMINACIÓN DEL PROGRAMA DE ESTUDIOS	MAESTRÍA EN INGENIERÍA AMBIENTAL
GRADO ACADÉMICO QUE OTORGA	MAESTRO
DENOMINACIÓN DEL GRADO ACADÉMICO	MAESTRO(A) EN INGENIERÍA AMBIENTAL
TÍTULO DE TESIS	Reducción de la turbidez y la DQO mediante electrocoagulación de las aguas del afluente de la PTAR Puca Puca de la provincia de Huanta
EVALUACIÓN DE ORIGINALIDAD	17% de similitud
N° DE TRABAJO	3015176103
FECHA	20 de agosto de 2026

Por tanto, según los artículos 12, 13 y 17 del Reglamento de Originalidad de Trabajos de Investigación, es procedente otorgar la constancia de originalidad con depósito.

Se expide la presente constancia a solicitud de la interesada para los fines que crea conveniente.

20 de agosto de 2026.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA
ESCUELA DE POSGRADO
Mg. Kelvis BERROCAL ARGUMEDO
Sub Director de Investigación

CC.
Archivo
KBA/

Reducción de la turbidez y la DQO mediante electrocoagulación de las aguas del afluente de la PTAR Puca Puca de la provincia de Huanta

por Dayma QUINTAS MENDEZ

Reducción de la turbidez y la DQO mediante electrocoagulación de las aguas del afluente de la PTAR Puca Puca de la provincia de Huanta

INFORME DE ORIGINALIDAD

17%

INDICE DE SIMILITUD

16%

FUENTES DE INTERNET

9%

PUBLICACIONES

9%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	Submitted to Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga	4%
	Trabajo del estudiante	
2	hdl.handle.net	2%
	Fuente de Internet	
3	scielo.sld.cu	1%
	Fuente de Internet	
4	repositorio.unac.edu.pe	1%
	Fuente de Internet	
5	ri.uaemex.mx	1%
	Fuente de Internet	
6	repositorio.unap.edu.pe	1%
	Fuente de Internet	
7	repositorio.unaj.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	
8	Submitted to unhuancavelica	<1%
	Trabajo del estudiante	
9	repositorio.lamolina.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	
10	Submitted to Universidad Cesar Vallejo	<1%
	Trabajo del estudiante	
11	docplayer.es	<1%
	Fuente de Internet	
12	1library.co	<1%
	Fuente de Internet	
13	repositorio.ucsm.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	
14	repositorio.uap.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	

15	Fuente de Internet	<1 %
16	dokumen.pub Fuente de Internet	<1 %
17	bdigital.unal.edu.co Fuente de Internet	<1 %
18	Submitted to Universidad Laica Vicente Rocafuerte de Guayaquil Trabajo del estudiante	<1 %
19	repositorio.ucv.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
20	docs.google.com Fuente de Internet	<1 %
21	Submitted to uncedu Trabajo del estudiante	<1 %
22	vsip.info Fuente de Internet	<1 %
23	ri.ues.edu.sv Fuente de Internet	<1 %
24	repositorio.unal.edu.co Fuente de Internet	<1 %
25	repositorio.unc.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
26	apirepositorio.unh.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
27	repositorio.ug.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
28	repositorio.uss.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
29	repositorio.uancv.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
30	revistas.unsaac.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
31	ribuni.uni.edu.ni Fuente de Internet	<1 %
32	documentos.uru.edu Fuente de Internet	<1 %

<1 %

33

repositorio.uncp.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

34

Submitted to Universidad Católica Boliviana "San Pablo"

Trabajo del estudiante

<1 %

35

repositorio.upagu.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

36

www.coursehero.com

Fuente de Internet

<1 %

37

Submitted to Universidad de Cartagena

Trabajo del estudiante

<1 %

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias

< 30 words

Excluir bibliografía

Activo

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR
EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO(A) EN INGENIERÍA AMBIENTAL
RESOLUCIÓN DIRECTORAL N°00689-2026-UNSCH-EPG/D.

Siendo las 04:00 p.m. del 21 de julio de 2026 se reunieron en el auditorium de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, el Jurado Examinador y Calificador de Tesis, presidido por el **Dr. JOHNNY ALDO TINCO JAYO** Director (e) de la Escuela de Posgrado, el **Mtro. ABEL NILO JUSCAMAYTA TOMASEVICH** Director de la Unidad de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Química y Metalurgia, e integrado por los siguientes miembros: **Dr. HERNAN PEDRO QUISPE MISAICO** y el **Dr. EDGAR GREGORIO ARONES MEDINA**; para la sustentación oral y pública de la tesis titulada: **REDUCCIÓN DE LA TURBIDEZ Y LA DQO MEDIANTE ELECTROCOAGULACIÓN DE LAS AGUAS DEL AFLUENTE DE LA PTAR PUCA PUCA DE LA PROVINCIA DE HUANTA**, presentado por la **Bach. DAYMA QUINTAS MENDEZ**. Teniendo como asesor al **Mg. ANIBAL PABLO GARCIA BENDEZU**.

Acto seguido se procedió a la exposición de la tesis, con el fin de optar el Grado Académico de **MAESTRO(A) EN INGENIERÍA AMBIENTAL**. Formuladas las preguntas, éstas fueron absueltas por la graduanda.

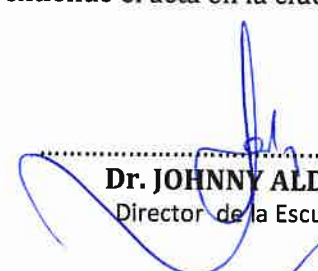
A continuación, el Jurado Examinador y Calificador de Tesis procedió a la votación, la que dio como resultado el siguiente calificativo: DIECIOCHO (18).

CALIFICACION (x)	
Aprobado(a) por Unanimidad.	
Aprobado(a) por Mayoría.	X
Desaprobado(a) por Unanimidad.	
Desaprobado(a) por Mayoría.	

Marcar con un aspa (x).

Luego, el presidente del Jurado recomienda que la Escuela de Posgrado proponga que se le otorgue a la **Bach. DAYMA QUINTAS MENDEZ**, el Grado Académico de **MAESTRO(A) EN INGENIERÍA AMBIENTAL**. Siendo las.....5:20 pm.....hrs. se levanta la sesión.

Se extiende el acta en la ciudad de Ayacucho, a las.....5:40 pm.....hrs. del 21 de julio de 2026.


.....
Dr. JOHNNY ALDO TINCO JAYO
Director de la Escuela de Posgrado.


.....
Mtro. ABEL NILO JUSCAMAYTA TOMASEVICH
Director de la UPG-FIQM.


.....
Dr. HERNAN PEDRO QUISPE MISAICO
Miembro.


.....
Dr. EDGAR GREGORIO ARONES MEDINA
Miembro.


.....
Dr. ENRIQUE JAVIER AGUILAR FELICES
Secretario Docente.

Observaciones: