

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y DE RECURSOS
NATURALES

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y DE
RECURSOS NATURALES



**“EFICIENCIA ENERGÉTICA MEDIANTE LA OPTIMIZACIÓN DE
PARÁMETROS DE OPERACIÓN DE UN SISTEMA DE
ELECTROCOAGULACIÓN INTERMITENTE EN EL CO-
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES URBANAS Y AGUAS
DE DRENAJE ÁCIDO DE MINA”**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO
AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES**

KATHERIN LIZ QUISPE RAMOS

EDILBERTO RONALD MELGAR IZAGUIRRE

Asesor: Mg. ALEX WILLY PILCO NUÑEZ

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: CIENCIAS DE LA TIERRA Y DEL
AMBIENTE

Callao, 2024

PERÚ



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
FACULTAD DE INGENIERIA AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES



VIII CICLO TALLER DE TESIS

ANEXO 3

ACTA N° 012-2024 DE SUSTENTACIÓN DE TESIS CON CICLO DE TESIS PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES.

LIBRO 01 FOLIO No. 182 ACTA N°012-2024 DE SUSTENTACIÓN DE TESIS CON CICLO DE TESIS PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES.

A los 16 días del mes de junio del año 2024, siendo las 13:00 horas, se reunieron en el auditorio de la Facultad de Ingeniería Ambiental y de Recursos Naturales, el **JURADO DE SUSTENTACIÓN DE TESIS** para la obtención del **TÍTULO Profesional de Ingeniero Ambiental y de Recursos Naturales** de la Facultad de Ingeniería Ambiental y de Recursos Naturales, conformado por los siguientes docentes ordinarios de la Universidad Nacional del Callao:

Ms.C.	María Teresa Valderrama Rojas	: Presidente
Mg.	Luis Enrique Lozano Vieytes	: Secretario
Mtra.	Janet Mamani Ramos	: Vocal
Mg.	Alex Willy Pilco Núñez	: Asesor

Con el quórum reglamentario de ley, de conformidad con lo establecido por el Reglamento de Grados y Títulos vigente, y habiendo cumplido con los requisitos para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental y de Recursos Naturales, se dio inicio al acto de sustentación de la tesis, de los bachilleres Edilberto Ronald Melgar Izaguirre y Katherin Liz Quispe Ramos, titulada: "EFICIENCIA ENERGÉTICA MEDIANTE LA OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS DE OPERACIÓN DE UN SISTEMA DE ELECTROCOAGULACIÓN INTERMITENTE EN EL CO-TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES URBANAS Y AGUAS DE DRENAJE ÁCIDO DE MINA", cumpliendo con la sustentación en acto público, de manera presencial en el auditorio de la Facultad;

Luego de la exposición, la absolución de las preguntas formuladas por el Jurado y efectuadas las deliberaciones pertinentes, el jurado acordó: Dar por **APROBADO** la presente tesis, con la escala de calificación cualitativa **BUENO** y calificación cuantitativa **QUINCE (15)**, conforme a lo dispuesto en el Art. 24 del Reglamento de Grados y Títulos de la UNAC, aprobado por Resolución de Consejo Universitario N° 150-2023-CU del 15 de junio de 2023.

Se dio por cerrada la Sesión a las 14:00 horas del día domingo 16 de junio del año en curso.

Presidente
Ms.C. María Teresa Valderrama Rojas

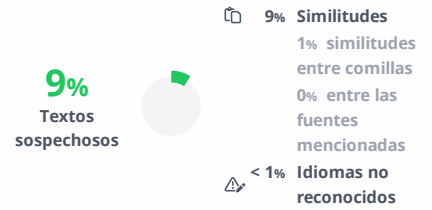
Secretario
Mg. Luis Enrique Lozano Vieytes

Vocal
Mtra. Janet Mamani Ramos

Asesor
Mg. Alex Willy Pilco Núñez



1A; QUISPE RAMOS-Katherin Liz; MELGAR IZAGUIRRE-Edilberto Ronald; TESIS CON CT.



Nombre del documento: 1A; QUISPE RAMOS-Katherin Liz; MELGAR IZAGUIRRE-Edilberto Ronald; TESIS CON CT..pdf
ID del documento: cba2ac7e0007e020e4370781820780709cd217bd
Tamaño del documento original: 1,41 MB

Depositante: FIARN PREGRADO UNIDAD DE INVESTIGACION
Fecha de depósito: 11/6/2024
Tipo de carga: interface
fecha de fin de análisis: 11/6/2024

Número de palabras: 12.379
Número de caracteres: 80.349

Ubicación de las similitudes en el documento:



Fuentes principales detectadas

N°	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	1A; NAVARRETE ASIAN-Jessica Alessandra; TIMANÁ CASTILLO-Ysmael N... #b1d0ba El documento proviene de mi biblioteca de referencias	3%		🔗 Palabras idénticas: 3% (323 palabras)
2	info.igme.es https://info.igme.es/SidPDF/113000/258/113258_0000001.pdf 3 fuentes similares	2%		🔗 Palabras idénticas: 2% (240 palabras)
3	renati.sunedu.gob.pe Registro Nacional de Trabajos de Investigación: Efecto de l... https://renati.sunedu.gob.pe/handle/sunedu/3282045 1 fuente similar	2%		🔗 Palabras idénticas: 2% (233 palabras)
4	investigaliacr.com Profundidad o alcance de los estudios cuantitativos - Investig... https://investigaliacr.com/investigacion/profundidad-o-alcance-de-los-estudios-cuantitativos/ 5 fuentes similares	< 1%		🔗 Palabras idénticas: < 1% (57 palabras)
5	1A_HINOSTROZA ANTONIO; EDILBERTO_TESIS DE MAESTRIA.pdf 1A_HIN... #2ac2e0 El documento proviene de mi biblioteca de referencias 1 fuente similar	< 1%		🔗 Palabras idénticas: < 1% (47 palabras)

Fuentes con similitudes fortuitas

N°	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	repositorio.unac.edu.pe https://repositorio.unac.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12952/7207/IF_Baca_Neglia-2022.pdf?sequ...	< 1%		🔗 Palabras idénticas: < 1% (36 palabras)
2	blogs.ugto.mx Clase digital 4. Definición del alcance de la investigación que se r... https://blogs.ugto.mx/rea/clase-digital-4-definicion-del-alcance-de-la-investigacion-que-se-realizara...	< 1%		🔗 Palabras idénticas: < 1% (36 palabras)
3	carrerasuniversitarias.pe Ingeniería Ambiental y de Recursos Naturales - UNAC -... https://carrerasuniversitarias.pe/universidades/universidad-nacional-del-callao/ingenieria-ambient...	< 1%		🔗 Palabras idénticas: < 1% (24 palabras)
4	fcc.unac.edu.pe https://fcc.unac.edu.pe/wp-content/uploads/2022/07/319-22-R-DIRECTIVA-004-ELABORACION-PROY...	< 1%		🔗 Palabras idénticas: < 1% (21 palabras)
5	repositorio.uap.edu.pe https://repositorio.uap.edu.pe/xmlui/bitstream/20.500.12990/10002/1/Tesis_determinantes_sociales...	< 1%		🔗 Palabras idénticas: < 1% (20 palabras)

HOJA DE REFERENCIA DEL JURADO Y APROBACIÓN

MIEMBROS DEL JURADO EVALUADOR

Presidente: MsC. María Teresa Valderrama Rojas

Secretario: Mg. Luis Enrique Lozano Vieytes

Vocal: Mtra. Janet Mamani Ramos

Asesor: Mg. Alex Willy Pilco Nuñez

Nº DE LIBRO: 01

Nº DE FOLIO: 182

Nº DE ACTA: 012-2024

FECHA DE APROBACION DE TESIS: 16 DE JUNIO, 2024

INFORMACIÓN BÁSICA

FACULTAD: Ingeniería Ambiental y de Recursos Naturales

UNIDAD DE INVESTIGACIÓN: Unidad de investigación de la Facultad de Ingeniería Ambiental y de Recursos Naturales.

TÍTULO: “Eficiencia energética mediante la optimización de parámetros de operación de un sistema de electrocoagulación intermitente para el co-tratamiento de aguas residuales urbanas y aguas de drenaje ácido de mina, 2023”

AUTORES:

Edilberto Ronald Melgar Izaguirre, ORCID: 0009-0009-6377-0997, DNI: 70323517

Katherin Liz Quispe Ramos, ORCID: 0009-0006-7260-3523, DNI: 77206054.

ASESOR:

M.Sc. Alex Willy Pilco Nuñez, ORCID: 0000-0002-3911-6428, DNI: 10291118

LUGAR DE EJECUCIÓN: Laboratorio de la Facultad de Ingeniería Ambiental y de Recursos Naturales de la Universidad Nacional del Callao.

UNIDAD DE ANÁLISIS: Litros de aguas residuales urbanas y aguas de drenaje ácido co-tratadas.

TIPO DE INVESTIGACIÓN: Aplicada

ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN: Cuantitativo.

NIVEL DE INVESTIGACIÓN: Explicativa

DISEÑO DE INVESTIGACIÓN: Experimental

TEMA OCDE: 1.05.00 Ciencias de la Tierra y del Ambiente

DEDICATORIA

"A nuestras queridas madres, Secilia y Bertha, cuyo amor incondicional, comprensión, aceptación y paciencia han enriquecido nuestras vidas con innumerables recuerdos y alegrías. A nuestro apreciado tío Enrique, modelo de independencia y sabiduría, cuya guía y ejemplo han sido fundamentales en nuestro camino."

AGRADECIMIENTO

A la vida, por demostrarnos que en su recorrido nos da muchos golpes y algunas alegrías, pero es justo por eso que los momentos de dicha duran una eternidad. Gracias por enseñarnos a levantarnos y por retarnos a ser mejores.

ÍNDICE

RESUMEN.....	14
ABSTRACT.....	15
INTRODUCCIÓN.....	16
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	18
1.1. Descripción de la realidad problemática.....	18
1.2. Formulación del problema.....	20
1.2.1. Problema general.....	20
1.2.2. Problemas específicos.....	20
1.3. Objetivos.....	21
1.4. Justificación.....	21
1.5. Delimitantes de la investigación.....	22
1.5.1. Teórico.....	22
1.5.2. Temporal.....	22
1.5.3. Espacial.....	23
2. MARCO TEÓRICO.....	24
2.1. Antecedentes.....	24
2.1.1. Internacionales.....	24
2.1.2. Nacionales.....	26
2.2. Bases teóricas.....	27
2.2.1. La eficiencia energética.....	27
2.2.2. La eficiencia energética en la industria.....	29
2.2.3. La eficiencia energética en el tratamiento de aguas residuales ..	30
2.2.4. La eficiencia energética en valorización de subproductos.....	31
2.2.5. Tratamiento de aguas residuales.....	31

2.2.6.	Tratamientos de drenajes ácidos de minas.....	34
2.2.7.	Co-tratamiento de aguas residuales urbanas y aguas de drenaje ácidos de mina.....	35
2.3.	Marco conceptual	37
2.3.1.	Eficiencia energética.....	37
2.3.2.	Optimización de parámetros de operación.....	38
2.4.	Definición de términos básicos	39
3.	HIPÓTESIS Y VARIABLES.....	41
3.1.	Hipótesis.....	41
3.1.1.	Hipótesis general	41
3.1.2.	Hipótesis específica	41
3.2.	Operacionalización de variables	42
3.2.1.	Definición operacional de la variable	42
4.	METODOLOGÍA DEL PROYECTO	43
4.1.	Diseño metodológico	43
4.2.	Método de investigación	43
4.2.1.	Recolección y caracterización del agua residual urbana (ARU) ..	43
4.2.2.	Recolección y caracterización del agua de drenaje ácido de mina (ADAM)	44
4.2.3.	Implementación de un sistema de electrocoagulación intermitente	45
4.2.4.	Procedimiento experimental	46
4.2.5.	Muestreo y análisis del agua tratada	49
4.2.6.	Consumo de energía	49
4.2.7.	Eficiencia de remoción.....	50
4.3.	Población y muestra	50

4.3.1.	Población.....	50
4.3.2.	Muestra	50
4.4.	Lugar de estudio y periodo desarrollado	50
4.5.	Técnicas e instrumentos para la recolección de la información.....	51
4.6.	Análisis y procesamientos de datos	51
4.7.	Aspectos éticos de la investigación	52
5.	RESULTADOS	53
5.1.	Resultados descriptivos.	53
5.1.1.	Resultados de las características físico-químicos del agua residual doméstica	53
5.1.2.	Resultados de las características físico-químicas del agua acida de la laguna Quiulacocha	53
5.1.3.	Resultados experimentales.....	54
5.1.4.	Efectos de los factores del tratamiento	55
5.2.	Resultados inferenciales.....	61
5.2.1.	Resultados inferenciales de la eficiencia de remoción	61
5.2.2.	Resultados inferenciales del consumo de energía.....	64
5.2.3.	Resultados inferenciales eficiencia del consumo de electrodos ..	67
5.3.	Otro tipo de resultados estadísticos	70
VI.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	71
6.1.	Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados.....	71
6.2.	Contrastación de los resultados con estudios similares	72
6.3.	Responsabilidad ética.....	73
	CONCLUSIONES	75
	RECOMENDACIONES	76
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	77

ANEXOS.....84

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Etiqueta eficiencia energética	28
Figura 2 Emisiones directas de CO ₂ de la industria global	30
Figura 3 Proceso de degradación de aguas residuales.....	32
Figura 4 Sistema de co-tratamiento de ARU y el ADAM	36
Figura 5 Ubicación de la PTAR Valle Las Higueras	44
Figura 6 Vista panorámica y desde arriba de la laguna Quiulacocha	45
Figura 7 Sistema de electrocoagulación intermitente	46
Figura 8 Equipo de prueba de jarras para la dosificación de agua acida y agua residual urbana	47
Figura 9 Sistema de electrocoagulación	48
Figura 10 Efecto del tiempo de reposo sobre la eficiencia de remoción (%) ...	56
Figura 11 Efecto de la densidad de corriente sobre la eficiencia de remoción (%)	57
Figura 12 Efecto de la densidad de corriente sobre la energía consumida	58
Figura 13 Efecto de la ratio S/V sobre la energía consumida.....	58
Figura 14 Efecto de la densidad de corriente y la ratio S/V sobre la energía consumida	59
Figura 15 Efecto de la densidad de corriente sobre la eficiencia de consumo de electrodos	60
Figura 16 Efecto de la ratio S/V sobre la eficiencia de consumo de electrodos	61
Figura 17 Normalidad de los datos de la eficiencia de remoción.....	62
Figura 18 Homogeneidad de la varianza de los datos de la eficiencia de remoción.....	63

Figura 19 Normalidad de los datos del consumo de energía.....	65
Figura 20 Homogeneidad de la varianza de los datos del consumo de energía	65
Figura 21 Normalidad de los datos del consumo de electrodos	67
Figura 22 Homogeneidad de varianza de los datos del consumo de electrodos	68

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Definición operacional de las variables	42
Tabla 2. Factores y niveles del diseño propuestos.....	49
Tabla 3. Método analítico para la recolección de la información	51
Tabla 4. Caracterización físico-química de las aguas residuales urbanas.....	53
Tabla 5. Caracterización físico-química de la laguna Quilulacocha.....	54
Tabla 6. Condiciones de operación y resultados de los experimentos diseñados	54
Tabla 7. Resumen de los resultados.....	55
Tabla 8. Análisis de varianza (ANOVA) para el modelo cuadrático de consumo remoción de contaminante.....	64
Tabla 9. Análisis de varianza (ANOVA) para el modelo cuadrático de consumo energético específico	66
Tabla 10. Análisis de varianza (ANOVA) para el modelo cuadrático de eficiencia de consumo de electrodos	68
Tabla 11. Análisis R^2 , R^2_{pred} y R^2_{adj}	69

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

ADAM: Agua de drenaje ácido de mina

ARU: Aguas residuales urbanas

EC: Electrocoagulación

PTAR: Planta de tratamiento de aguas residual

RESUMEN

En esta investigación se evaluó la eficiencia energética mediante la optimización de parámetros de operación de un sistema de electrocoagulación intermitente para el co-tratamiento de aguas residuales urbanas y aguas de drenaje ácido de mina. Esta investigación es de tipo básico, de enfoque cuantitativo, con un diseño experimental donde se empleó la metodología de superficie de respuesta (RSM). Se estudiaron los indicadores como la densidad de corriente ($1\text{--}3\text{ A/m}^2$), el tiempo de residencia del reactor ($60\text{--}90\text{ min}$) y la relación entre la superficie del ánodo y el volumen del reactor (relación S/V, $180\text{--}300\text{ m}^2/\text{m}^3$) y como indicadores de respuesta se evaluó la eficiencia de remoción de DQO (%), energía consumida (kw/m^3) y el consumo de electrodos (mg). Los resultados mostraron la máxima remoción de contaminantes en función del DQO (%) es del 90.02%, con una Densidad de corriente de 2 A/m^2 , Ratio S/V de $300\text{ m}^2/\text{m}^3$ y Tiempo de reposo de 60 min con un consumo máximo de electrodos de 704,32mg. El consumo de energía mínimo fue de $0.17\text{ kWh}/\text{m}^3$, para una densidad de corriente de 1 A/m^2 , Ratio S/V de $180\text{ m}^2/\text{m}^3$ y Tiempo de reposo de 75 min. Los resultados inferencia mostraron que la densidad de corriente, Ratio S/V y Tiempo de reposo tienen un efecto significativo ($p < 0.05$) en la remoción de DQO (%), energía consumida (kw/m^3) y el consumo de electrodos (mg). Los resultados de esta investigación pueden potenciar el camino para el desarrollo de una unidad de electrocoagulación industrial eficiente y económica utilizada para el co-tratamiento de aguas residuales.

La finalidad de esta fue encontrar la eficiencia energética mediante la optimización de parámetros (densidad de corriente, tiempo de residencia del reactor y relación entre la superficie del ánodo y el volumen del reactor) de operación de un sistema de electrocoagulación intermitente para el co-tratamiento de aguas residuales urbanas y aguas de drenaje ácido de mina.

Palabras clave: eficiencia energética, electrocoagulación, co-tratamiento de aguas residuales.

ABSTRACT

In this research, the energy efficiency was evaluated by optimizing the operating parameters of an intermittent electrocoagulation system for the co-treatment of urban wastewater and acid mine drainage wastewater. This research is basic, with a quantitative approach, with an experimental design where the response surface methodology (RSM) was used. Indicators such as current density (1–3 A A/m²), reactor residence time (60–90 min), and the relationship between anode surface area and reactor volume (S/V ratio, 15) were studied. 180–300 m²/m³) and as response indicators, the COD removal efficiency (%), energy consumed (kw/m³) and electrode consumption (mg) were evaluated. The results showed the maximum removal of contaminants depending on the COD (%) is 90.02%, with a Current Density of 2 A/m², S/V Ratio of 300 m²/m³ and Rest Time of 60 min with a consumption maximum electrode of 704.32mg. The minimum energy consumption was 0.17 kWh/m³, for a current density of 1 A/m², S/V Ratio of 180 m²/m³ and Rest Time of 75 min. The inference results showed that current density, S/V Ratio and Rest Time have a significant effect ($p < 0.05$) on COD removal (%), energy consumed (kw/m³) and electrode consumption (mg). The results of this research may pave the way for the development of an efficient and economical industrial electrocoagulation unit used for co-treatment of wastewater.

The purpose of this was to find energy efficiency by optimizing parameters (current density, reactor residence time, and ratio between the anode surface area and reactor volume) for operating an intermittent electrocoagulation system for the co-treatment of urban wastewater and acid mine drainage wastewater.

Keywords: energy efficiency, electrocoagulation, wastewater co-treatment.

INTRODUCCIÓN

La gestión del recurso hídrico en la actualidad se ha convertido en un tema crucial, pues hace que se requieran diversos tratamientos para hacerla apta para el desarrollo de actividades y el consumo humano. Esto se debe a que muchas veces el agua contiene contaminantes que representan una amenaza para este recurso, el cual se ha convertido en un grave problema en nuestro país (Berrocal, 2019)

Existe una creciente contaminación de los ecosistemas terrestres y acuáticos por las aguas de drenaje ácido minero (ADAM) que son generados por actividades mineras y los efluentes de aguas residuales urbanas (ARU) donde su tratamiento es un tema de preocupación ambiental emergente, a nivel nacional e internacional (Nepfumbada et al., 2023). Por lo tanto, los contaminantes contenidos tanto en la ADAM y ARU son de gran preocupación para el medio ambiente receptor. Por ejemplo, los metales incrustados en las ADAM presentan efectos eco toxicológicos para ecosistemas y adversos al ser humano (Kefeni et al., 2017), mientras que los nutrientes contenidos en ARU son conocidos por la generación de la eutrofización en cuerpos de agua (Kim et al., 2015). En consecuencia, estos efluentes deben ser tratados preferentemente antes de ser vertidos al medio ambiente. Sin embargo, en los países de tercer mundo solo se trata entre el 8 % y el 38 % de las aguas residuales municipales e industriales (Nepfumbada et al., 2023), destacando la necesidad de iniciativas en el tratamiento de ambas aguas.

La presente investigación se enmarca dentro de la categoría de investigación de tipo aplicada y a nivel explicativa, presenta a la electrocoagulación como una técnica prometedora que puede tratar diversas aguas residuales, como lixiviados de vertederos, aguas residuales de restaurantes, aguas residuales salinas, aguas residuales de arena bituminosa y esquisto, aguas residuales urbanas, aguas residuales de lavandería, aguas residuales ácidas y aguas residuales urbanas (Pulkka et al., 2014). Sin embargo, una desventaja de la electrocoagulación es que el costo de la energía eléctrica consumida es alto (Arango, 2011). En general, para tener una eficiencia en el uso de la energía en

un sistema de electrocoagulación, está condicionada por muchos factores, como, por ejemplo, el método adoptado para realizar la operación, el tipo y características particulares de los equipos que se emplean, las condiciones de operación, y otros. Por lo tanto, esta investigación presenta un enfoque en encontrar la mejor eficiencia en el uso de energía de un sistema de electrocoagulación que se debe emplear para que el desarrollo de un co-tratamiento tenga los mayores beneficios; dicho de otro modo, para que aquel tratamiento ofrezca ventajas en el uso eficiente de la energía.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción de la realidad problemática

La industria minera desempeña un papel crucial a nivel internacional, especialmente en países como China, Estados Unidos y Rusia, que se destacan como los principales actores en esta actividad. Sin embargo, esta industria tiene un impacto significativo y negativo en uno de los recursos naturales más vitales; el agua. Los procesos mineros generan una cantidad considerable de contaminación y residuos que afectan gravemente la calidad del agua, poniendo en riesgo tanto el medio ambiente como la salud de las comunidades locales (Abinandan et al., 2018). Además, los diversos procedimientos mineros se emplean considerables volúmenes de agua, y los residuos generados por la actividad minera, como los relaves y el agua ácida, contribuyen a la contaminación de los cuerpos de agua superficiales y subterráneas (Jiménez et al., 2009).

Por otra parte, en el Perú, la minería contemporánea enfrenta tensiones socio ambientales debido a la producción de agua ácida de las minas. Los drenajes mineros se originan en yacimientos con una geología y mineralogía complicada, donde la pirita es el mineral principal asociado (Rodríguez, 2018).

Así mismo las aguas residuales urbanas (ARU) son otro tipo de efluentes residuales que también plantean un problema ambiental. Estas aguas se caracterizan por contener contaminantes, microorganismos, y concentraciones de materia inorgánica y orgánica (Mavhungu et al., 2020). Entre estos contaminantes, destacan el fósforo y el amonio, los cuales representan una preocupación ambiental (Yang et al., 2020), ya que están asociados a la eutrofización (Rout et al., 2021). Estos componentes se consideran contaminantes que se buscan eliminar en estos efluentes.

Por otro parte, en diversas regiones con una intensa actividad minera, como las zonas andinas y otras áreas mineras del Perú, la contaminación del agua es un problema crítico. Las aguas residuales urbanas y las aguas de drenaje ácido de mina, presentan desafíos significativos para la gestión del agua

y la protección del medio ambiente. Estas aguas no solo afectan los recursos hídricos locales, sino también la salud pública y los ecosistemas circundantes.

El ADAM es un problema de contaminación que persiste en muchas áreas con un historial de actividad minera. El ADAM se produce cuando la pirita (FeS_2) expuesta al agua y al oxígeno durante la minería se oxida, generando aguas con alta acidez y metales disueltos (Johnson, 2003). Los metales de interés pueden variar según la ubicación geográfica y el tipo de mina, pero comúnmente incluyen hierro (Fe), aluminio (Al) y manganeso (Mn) (Skousen, 2002). Además, La presencia de estos metales en el agua puede tener efectos perjudiciales para el medio ambiente y la salud humana, lo que subraya la importancia de gestionarlos adecuadamente. Además, el cambio climático puede intensificar la acidez del mineral.

En la última década, la eficiencia del co-tratamiento de ADAM y ARU viene siendo estudiada con mayor profundidad, por ejemplo, se tiene el co-tratamiento usando celdas microbianas (Vélez et al., 2020), el co-tratamiento usando lodos activados sustituyendo al ARU (Hughes y Gray, 2013). Además, (Strosnider et al., 2013) exploró el co-tratamiento pasivo de aguas ácidas ricas en Zn y ARU sin procesar, y la viabilidad de co-tratamiento con un tratamiento anaerobio (Smyntek et al., 2018). Sin embargo, los estudios indican que los efluentes resultantes del co-tratamiento aún conservan contaminantes (Ruihua et al., 2011), como la abundancia de sulfatos, la presencia de hierro, fósforo y niveles bajos de pH. Por fin, una opción para mejorar la calidad de estos efluentes, derivados del tratamiento conjunto de aguas ácidas y residuales urbanas, implica el empleo de técnicas de purificación económica y pasivas, como los humedales artificiales.

La electrocoagulación (EC) se presenta como una técnica prometedora para el tratamiento de aguas residuales, aprovechando la generación de floculantes metálicos catiónicos a través de la disolución del electrodo metálico del ánodo. Estos floculantes son eficaces en la separación de contaminantes presentes en el agua residual mediante procesos como la condensación, flotación, reducción y descomposición oxidativa (Xu et al., 2018). La EC es un

método efectivo y económico, pero hasta el momento no se ha informado sobre su aplicación en el co-tratamiento de aguas residuales urbanas y ácidas. Sin embargo, la principal desventaja de la electrocoagulación radica en el alto consumo de energía que se requiere para llevar este proceso desde el ámbito de laboratorio a la escala industrial.

La Facultad de Ingeniería Ambiental y de Recursos Naturales de la Universidad Nacional del Callao cuenta con un reactor de electrocoagulación intermitente a escala laboratorio, el cual realiza el co-tratamiento de ARU y ADAM, pero no se ha estudiado lo referente a la demanda de energía del reactor. Por este motivo, el propósito de este estudio fue evaluar la optimización de parámetros de operación del sistema de electrocoagulación intermitente para mejorar el consumo de energía en el co-tratamiento de ARU y ADAM, a escala laboratorio.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema general

¿Cuál será la eficiencia energética obtenida a partir de la optimización de parámetros de operación de un sistema de electrocoagulación intermitente para el co-tratamiento de aguas residuales urbanas y aguas de drenaje ácido de mina?

1.2.2. Problemas específicos

- ¿Cuál será el efecto de los parámetros de operación del sistema de electrocoagulación sobre el consumo de energía para el co-tratamiento de aguas residuales urbanas y aguas de drenaje ácido de mina?
- ¿Cuál será el efecto de los parámetros de operación del sistema de electrocoagulación sobre la eficiencia de remoción para el co-tratamiento de aguas residuales urbanas y aguas de drenaje ácido de mina?
- ¿Cuál será el efecto de los parámetros de operación del sistema de electrocoagulación sobre el consumo de electrodos para el co-tratamiento de aguas residuales urbanas y aguas de drenaje ácido de mina?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Evaluar la eficiencia energética mediante la optimización de parámetros de operación de un sistema de electrocoagulación intermitente para el co-tratamiento de aguas residuales urbanas y aguas de drenaje ácido de mina.

1.3.2. Objetivos específicos

- Determinar el efecto de los parámetros de operación del sistema de electrocoagulación sobre el consumo de energía para el co-tratamiento de aguas residuales urbanas y aguas de drenaje ácido de mina
- Determinar el efecto de los parámetros de operación del sistema de electrocoagulación sobre la eficiencia de remoción para el co-tratamiento de aguas residuales urbanas y aguas de drenaje ácido de mina
- Determinar el efecto de los parámetros de operación del sistema de electrocoagulación sobre el consumo de electrodos para el co-tratamiento de aguas residuales urbanas y aguas de drenaje ácido de mina

1.4. Justificación

1.4.1. Justificación económica

El uso de la electrocoagulación en el tratamiento de aguas residuales podría justificarse económicamente al considerar tanto los beneficios como los costos asociados con esta tecnología. A pesar de requerir un consumo inicial de energía relativamente alto, la electrocoagulación ofrece una eficiencia energética superior a otros métodos de tratamiento de aguas residuales.

La electrocoagulación es capaz de separar de manera efectiva contaminantes y sólidos suspendidos, reduciendo así la necesidad de etapas adicionales de tratamiento energéticamente intensivas. Al eliminar los contaminantes en las primeras etapas, se logra una mayor eficiencia energética del sistema de tratamiento, lo que conduce a un menor consumo total de energía.

En el presente trabajo de investigación, el co-tratamiento desarrolla una alta eficiencia como pretratamiento, combinado con la electrocoagulación podría ofrecer ventajas económicas a largo plazo. Al lograr una mayor eficiencia

energética, se reduce el costo total de operación del tratamiento de aguas residuales. Menor consumo de energía significa facturas de electricidad más bajas, lo que se traduce en ahorros significativos a lo largo de la vida útil del sistema.

1.4.2. Justificación ambiental

A pesar de que el uso de la electrocoagulación amerita un gasto energético, este trabajo de investigación evidenciará una eficiencia energética por un bajo consumo de energía. En consecuencia, la eficiencia energética adquiere una importancia significativa en la consecución de objetivos económicos asociados a la disminución de costos en el tratamiento de aguas residuales. Además, se revela como un componente fundamental para alcanzar metas ambientales, ya que contribuye directamente al logro del Objetivo Prioritario 3, que se centra en la reducción de la contaminación del aire, agua y suelo. Este aporte se materializa a través del recurso seguro y productivo de aguas residuales, en consonancia con los lineamientos establecidos en la Política Nacional del Ambiente al 2030.

1.4.3. Justificación legal

El tratamiento adecuado de las aguas residuales es un requisito legal. El sistema de co-tratamiento puede ayudar a las empresas a cumplir con las normativas ambientales y los límites de descarga establecidos, evitando sanciones y multas por el incumplimiento de los estándares ambientales.

1.5. Delimitantes de la investigación

1.5.1. Teórico

El trabajo de investigación se centra en el co-tratamiento de aguas residuales urbanas y aguas de drenaje ácido de mina, la electrocoagulación y la eficiencia energética del proceso de tratamiento a escala laboratorio.

1.5.2. Temporal

Los experimentos están sujetos a la disponibilidad de los laboratorios y el acceso a las aguas ácidas y aguas residuales urbanas. Los análisis realizados para la investigación se realizaron durante los meses de abril y mayo del 2024 en el

Laboratorio de Facultad de Ingeniería Ambiental y de Recursos Naturales de la universidad Nacional del Callao.

1.5.3. Espacial

El agua residual urbana (ARU) se tomará de la PTAR Valle Las Higueras, distrito de Pachacamac, provincia de Lima y el agua de drenaje ácido de mina (ADAM) se tomará de la laguna Quiulacocha en la ciudad de Pasco. Ambas muestras serán analizadas y utilizadas en las pruebas experimentales que se realizarán en el laboratorio de la Facultad de Ingeniería Ambiental y de Recursos Naturales de la Universidad Nacional del Callao donde se tiene un sistema de electrocoagulación intermitente que cuenta con dos tanques para el almacenamiento de aguas residuales, un sedimentador y un reactor de electrocoagulación.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

2.1.1. Internacionales

Wang et al. (2023) en su investigación titulada “Evaluación energética del tratamiento de aguas residuales con fenol mediante un reactor de electrodiálisis inversa utilizando diferentes ánodos”, tuvo como objetivo evaluar el reactor de electrodiálisis inversa (REDR) utilizando diferentes ánodos (Ti/IrO₂-RuO₂, Ti/PbO₂ y Ti/Ti₄O₇). Se discutieron los efectos de la corriente de salida y el caudal de la solución de enjuague de electrodos (ERS) sobre la eficiencia de mineralización y la producción de energía. Los resultados demostraron que la tasa de eliminación de COD (η_{COD}) aumentó casi linealmente con la corriente de salida y el caudal de ERS cuando se usa Ti/Ti₄O₇ ánodo, pero las condiciones de operación excesivas causaron un aumento lento o incluso una disminución de η_{COD} cuando se usaban ánodos de Ti/IrO₂-RuO₂ o Ti/PbO₂. Los resultados mostraron que el orden de pérdida de potencial del sistema de electrodos (E_{ele}) para los tres ánodos fue Ti/Ti₄O₇ > Ti/PbO₂ > Ti/IrO₂-RuO₂. También se definieron cuatro parámetros de eficiencia energética para evaluar la recuperación de energía desde múltiples perspectivas al vincular la producción de energía con la capacidad de mineralización. Eran eficiencia de electrodo (η_{ele}), eficiencia energética (EE), eficiencia de corriente general (GCE) y consumo de energía (CE), respectivamente. Los resultados mostraron que REDR con Ti/Ti₄O₇. Los ánodos y las condiciones de operación adecuadas lograron los indicadores energéticos y la eficiencia de mineralización óptimos, lo que brindó una opción eficiente y económica para el tratamiento de aguas residuales y la recuperación de energía.

Karimi et al. (2022) en su investigación “Aplicación secuencial de electrocoagulación aireada y adsorción de nanopartículas γ -Fe₂O₃ para la eliminación de DQO: consumo de la menor cantidad de energía y evaluación económica” tuvo como objetivo investigar el tratamiento de aguas residuales industriales de una planta de teñido de textiles mediante un proceso combinado de electrocoagulación, seguido del uso de-(Maghemita) adsorbentes de

nanopartículas. Las propiedades de las nanopartículas sintetizadas se determinaron mediante análisis XRD, SEM y FTIR. Se investigó el efecto de la velocidad de aireación (0–2,65 L/min), la concentración de nanopartículas (0–480 mg/L) y el pH inicial EC (3–7) sobre la eliminación de DQO del proceso secuencial y un modelo cuadrático (p -valor $< 0,0001$ y $R^2 > 0,98$). Luego, bajo dos escenarios, se realizó la optimización. Los resultados mostraron que, en el primer escenario, se apuntó a la mayor eliminación de DQO independientemente del uso de energía o químicos. Bajo el segundo escenario, se consideraron el uso de energía y químicos, así como la reducción de los gastos de capital y operativos. La comparación de los dos escenarios condujo a tasas de aireación de 1,5 l/min frente a 0,86 l/min, concentración de nanopartículas de 160 mg/l frente a 120 mg/l y pH EC de 4 frente a 5,32. La remoción de DQO en el primer escenario fue de 88.7% mientras que se redujo a 67.7% cuando se consideraron CAPEX y OPEX.

Molinos y Maziotis (2022), en su investigación “Evaluación de la eficiencia energética de las plantas de tratamiento de aguas residuales: La influencia de la tecnología y los factores de envejecimiento”, tuvo como objetivo evaluar la eficiencia energética de una muestra de plantas de tratamiento de aguas residuales chilenas utilizando una técnica recientemente desarrollada, denominada envolvente estocástica no paramétrica de datos (StoNED). Los resultados evidenciaron que las PTAR chilenas eran considerablemente ineficientes (la puntuación promedio fue de 0,433), lo que presentaba importantes oportunidades para ahorrar energía (el ahorro promedio fue de 203.413 MWh/año). Solo 8 de 203 instalaciones reportaron un puntaje promedio de eficiencia energética superior a 0,81. También se constató que la antigüedad de las instalaciones influía negativamente en la eficiencia energética. Las plantas de tratamiento de aguas residuales construidas recientemente mostraron una puntuación media de eficiencia energética de 0,489, mientras que las instalaciones más antiguas resultaron ser considerablemente ineficientes, con una media de 0,340. Se concluyó que las EDAR que utilizan procesos de crecimiento suspendido, es decir, lodos activados convencionales y aireación

extendida, como tratamiento secundario fueron las que presentaron los niveles más bajos de eficiencia energética en promedio.

Li et al. (2021) en su investigación “Evaluación de la eficiencia energética de las plantas de tratamiento de aguas residuales de China por unidad de consumo de energía por kg de DQO eliminado”, tuvo como objetivo evaluar y clasificar la sostenibilidad de las principales tecnologías de tratamiento de 1215 plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) en China. Los datos de consumo energético de estas PTAR se seleccionaron de la base de datos de 1399 EDAR para evaluar la eficiencia energética de diferentes tecnologías de tratamiento. Los resultados mostraron que el 80,3% de las PTAR aplica como tecnologías principales anaerobio-óxido, zanja de oxidación y reactor discontinuo secuencial (SBR). El análisis estadístico muestra que el consumo unitario de energía de las PTAR disminuye al aumentar el índice de flujo de diseño, el índice de carga de operación y la concentración de DQO del afluente. El consumo medio unitario de energía de SBR disminuye de 1,71 kWh/kg COD eliminado a 1,32 kWh/kg COD eliminado y 2,85 kWh/kgCOD eliminado a 0,63 kWh/kg COD eliminado a medida que la tasa de carga de operación y la eliminación de COD aumentan del 40 % al 100 % y de menos de 150 mg/L a más de 450 mg/L, respectivamente. SBR tiene el consumo de energía unitario más bajo entre todas las tecnologías. Por lo tanto, SBR podría ser la tecnología más apropiada en las PTAR de pequeña y mediana escala en China.

2.1.2. Nacionales

Alejo y Santos (2021) en la investigación titulada “Efecto de la velocidad de rotación en la eficiencia energética de un oxigenador de agua residual con discos rotativos”, tuvo como objetivo evaluar la influencia de la concentración de oxígeno disuelto en agua residual, y la velocidad de rotación de los discos de un aparato para oxigenar, en el índice de energía de la transferencia de oxígeno (I_{eto}) del aparato aireador. Se utilizó el I_{eto} como indicador de la eficiencia energética en la operación de aireación, que fue definida como la cantidad de energía requerida por cada unidad de masa de oxígeno transferido al líquido. Para tal efecto, se utilizaron datos de ensayos experimentales de aireación de

aguas, en un aparato aireador que poseía 12 discos rotativos. Las pruebas se realizaron con agua potable y agua residual sintética preparada a una demanda química de oxígeno (DQO) de 400 ppm. Los niveles de velocidad de giro de los discos a las que se ensayaron fueron de 30, 40 y 50 RPM. Las concentraciones de oxígeno disuelto (COD) a las que se evaluó el I_{eto} fue a 1, 2, 3, 4 y 5 ppm. Durante cada experimento se midieron la COD, temperatura, tensión de corriente e intensidad de corriente eléctrica suministrado al motor eléctrico que hace girar los discos. Con los resultados obtenidos se concluye que, el I_{eto} es afectado por la velocidad de rotación y la COD de manera significativa, de modo tal que, si la velocidad de rotación o la COD también aumenta, entonces el también I_{eto} se incrementa.

Orbegoso (2020) en la investigación titulada “Gestión energética al caldero Piro-tubular de la Empresa Curtiembre Ecológica del Norte E.I.R.L, para mejorar su eficiencia energética”, tuvo como objetivo analizar la situación actual de la curtiembre encontrando que la eficiencia del caldero es 78.10%, con un consumo de combustible de 50 gal/h y flujo de vapor de 370 Kg/h. Se propuso medidas correctivas entre ellas implementar un precalentador de aire, aislar las paredes del caldero, implementar un sistema de osmosis inversa y economizador para calentar el agua de alimentación. Las propuestas energéticas lograron incrementar el rendimiento del caldero a 92.60% reduciendo la pérdida de gases residuales de 9% a 5.15%, convección de 1% a 0.158%, hollín de 3.60% a 0.51%, combustión incompleta de 5.6% a 0.63%, radiación de 0.843% a 0.73% y purgas de 2% a 0.84%, con un flujo másico de combustible de 42 gal/h, logrando un ahorro de 8 gal/h. La inversión para la gestión energética es 13056.56 dólares, beneficio de 31659.40 dólares y periodo de retorno de 5 meses, valor viable para la empresa.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. La eficiencia energética

La eficiencia energética implica llevar a cabo una serie de medidas que reducen el consumo de energía en un proceso, sin comprometer el nivel de servicio energético y sin afectar la calidad del bienestar deseado. De esta manera, todos

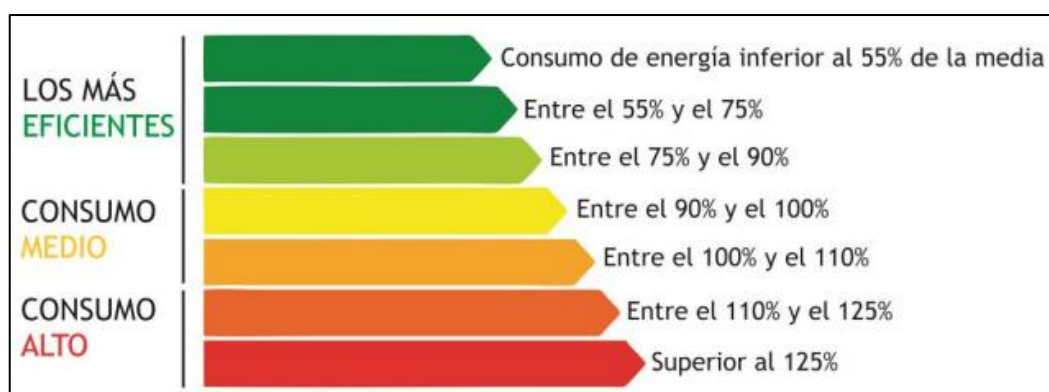
podemos contribuir al cuidado de la energía. En otras palabras, al hacer pequeños cambios en el uso de la electricidad, el agua caliente y el gas, es posible lograr ahorros significativos tanto en energía como en costos, con los consiguientes beneficios para el medio ambiente (Flensburg, 2021).

Para ahorrar energía, es fundamental comenzar por revisar detenidamente la factura de los servicios, ya que proporciona información valiosa. Además de la fecha de vencimiento y el importe a pagar, muestra un desglose del consumo del mes actual y permite compararlo con periodos anteriores. En el caso de la factura de gas, se expresa el consumo en metros cúbicos (m³), mientras que para la electricidad se utiliza kilovatio-hora (kWh) (Flensburg, 2021).

El consumo de energía depende principalmente de la duración de uso de los equipos y su potencia. Por lo tanto, es necesario modificar hábitos de consumo, como apagar los dispositivos cuando no se necesiten y desconectarlos por completo. También es importante aprender a utilizar los equipos correctamente, ajustando los termostatos de acuerdo a las necesidades reales y manteniéndolos limpios. Al momento de adquirir nuevos equipos, es recomendable elegir aquellos que sean eficientes consultando la etiqueta de eficiencia energética. Esta etiqueta brinda información clara y rápida sobre los valores de consumo de energía de los equipos (Figura 1) (Flensburg, 2021).

Figura 1

Etiqueta eficiencia energética



Nota. Tomado de Secretaría de Energía de la República Argentina (2021)

2.2.2. La eficiencia energética en la industria

La creciente demanda de energía por parte de los sectores industriales hace que alcanzar este objetivo sea aún más variable. Otro desafío es hacer coincidir la producción renovable variable con diferentes perfiles de carga en el consumo de energía. El almacenamiento de energía es la tecnología clave para cerrar la brecha entre la oferta y la demanda de tales fuentes de energía intermitentes y lograr metas ambiciosas del futuro bajo en carbono. Sin embargo, el potencial del almacenamiento de energía a veces se subestima, porque puede ser una tecnología oculta en el conjunto. sistema de energía Los beneficios ambientales y económicos del almacenamiento de energía deben enfatizarse y demostrarse más (Kaygusuz, 2021).

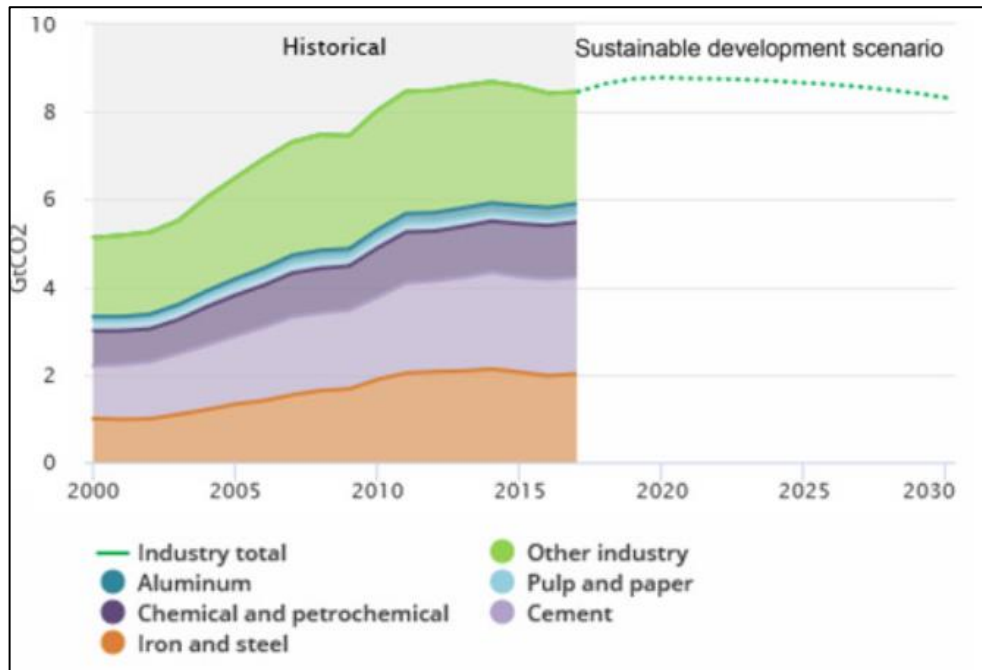
Varias fuentes renovables, como la bioenergía, la radiación solar y la energía geotérmica, pueden utilizarse para producir calor con fines industriales, pero la disponibilidad de estos recursos no es ni espacial ni temporalmente uniforme (Philibert, 2017).

Los procesos innovadores, que aún no están completamente comercializados, han contribuido con el 19% de las reducciones acumuladas de CO₂ en los sectores industriales.

Estos procesos incluyen nuevas técnicas para la fabricación de acero, el uso de ánodos inertes en la fundición de aluminio, la implementación de hornos de oxidación en la producción de clínker en la fabricación de cemento, mejoras catalíticas y basadas en biomasa en la producción química, y la integración de la captura y almacenamiento de carbono (CCS) en procesos industriales intensivos en energía (IEA, 2022).

Figura 2

Emisiones directas de CO2 de la industria global



Nota. Tomado de Kaygusuz (2021).

2.2.3. La eficiencia energética en el tratamiento de aguas residuales

Los sistemas de agua y aguas residuales son importantes consumidores de energía, por ejemplo, un estimado del 3 % al 4 % del consumo total de electricidad de EE. UU. utilizado para el movimiento y tratamiento de agua y aguas residuales. Los problemas relacionados con el agua y la energía son cada vez más importantes en el contexto de la escasez de agua, el aumento de los costos de energía y materiales y el cambio climático (Goldstein y Smith, 2002).

Existe una relevancia de reducir el consumo eléctrico en las plantas de tratamiento de agua. Por un lado, el costo de la electricidad es el principal componente de los costos de operación, variando del 2% al 60% de los costos de operación. Por otro lado, cuando la electricidad se produce utilizando fuentes de energía convencionales (no renovables), implica la generación de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). En particular, la operación de las PTAR implica emisiones directas e indirectas de GEI (An et al., 2018). Dada la relevancia económica y ambiental del consumo de energía para operar una

planta de tratamiento, varios estudios previos se centraron en cuantificar y modelar el uso de energía y los costos de energía de las instalaciones de tratamiento.

2.2.4. La eficiencia energética en valorización de subproductos

La valorización de los subproductos procedentes de los procesos industriales que se realizan en las depuradoras es una parte clave para alcanzar una economía circular en el sector del agua urbana. De hecho, la legislación peruana de residuos establece disposiciones relativas a la puesta a disposición en el mercado de los productos procedentes de productos de origen residual, y se prevén cupos obligatorios de reciclaje de macronutrientes (fosfatos, potasio, etc.) de las plantas de tratamiento convencionales (Cordero, 2019).

Por ejemplo, la utilización en la agricultura de los lodos de depuradora tratados adecuadamente supone un ahorro de entre un 5 y un 15% de los fertilizantes químicos convencionales y es un buen ejemplo de aplicación de los principios de economía circular. En todo caso, la aplicación de estos lodos, sin un adecuado tratamiento, puede tener indeseables consecuencias ambientales debidas fundamentalmente a su potencial contenido de patógenos y de contaminantes (Cordero, 2019).

2.2.5. Tratamiento de aguas residuales

La escasez de agua es una de las consecuencias del cambio climático es la escasez de agua. El calentamiento global ha provocado más períodos de sequía en diferentes partes del globo. La escasez de agua es un tema que se ha tomado más atención en el mundo (AghaKouchak et al., 2015). Es fundamental contar con herramientas de medición precisas para controlar y neutralizar la composición química de las aguas residuales.

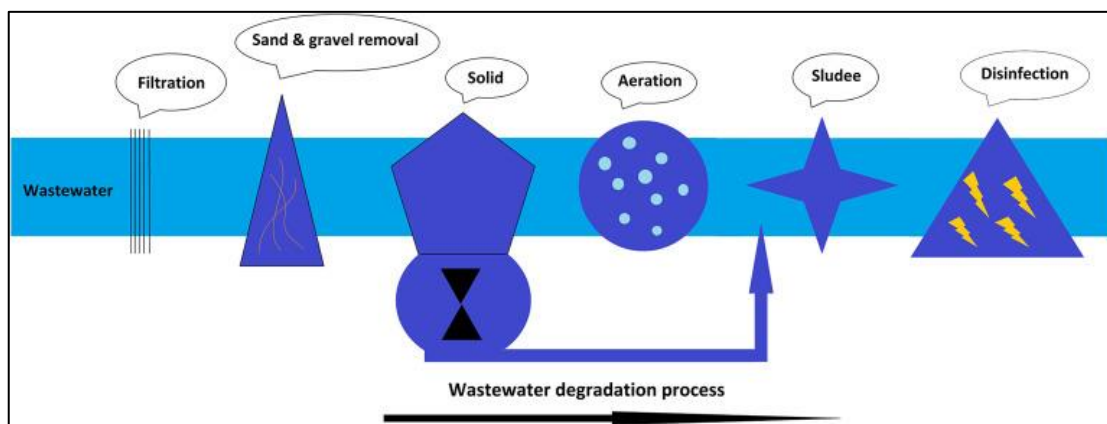
El tratamiento de aguas residuales puede ser una fuente valiosa de agua en cuanto a cantidad y uso, pero se requiere un proceso previo antes de poder utilizarlas. Hay diferentes tipos de aguas residuales tratadas (residuales domésticas, industriales y superficiales) y dependiendo de ellos, hay diversas técnicas para depurarlas y eliminar la contaminación. Teóricamente se requiere

conocer los procesos de tratamiento de aguas residuales para luego identificar el método más eficiente en términos de costo y tiempo, obtener conclusiones fundamentadas (Shojaei y Shojaei, 2021).

El proceso de tratamiento de aguas residuales incluye una serie de métodos de tratamiento de aguas residuales en los que los humanos diseñan equipos para producir aguas residuales, purificar y separar los desechos (Sonune y Ghatte, 2004). En la Figura 3 se muestran ejemplos de procesos de tratamiento de aguas residuales.

Figura 3

Proceso de degradación de aguas residuales



Nota. Tomado de Sonune y Ghatte (2004)

El tratamiento de aguas residuales requiere tiempo, energía y costo. Cualquier método que pueda optimizar el proceso de tratamiento de aguas residuales es muy importante porque uno de los objetivos del desarrollo sostenible es reducir el consumo de energía y reducir los procesos estratégicos en todo el mundo. El tratamiento de aguas residuales se puede realizar mediante métodos físicos, químicos y biológicos (Shojaei y Shojaei, 2021).

a. Tratamiento físico de aguas residuales

El tratamiento mecánico de aguas residuales es uno de los tipos de tratamiento de aguas residuales. En este método se utilizan operaciones mecánicas a través de leyes físicas para eliminar los contaminantes. Las operaciones físicas suelen ser simples y cuantitativamente más eficientes que otros métodos de tratamiento de aguas residuales. La filtración es el primer paso en cualquier sistema de

tratamiento de aguas residuales. Este proceso implica la eliminación de contaminantes no biodegradables que ingresan a una planta de aguas residuales (Shojaei y Shojaei, 2021).

b. Tratamiento químico de aguas residuales

Otro tipo de método de tratamiento de aguas residuales es el tratamiento químico de aguas residuales. En este método se utilizan productos químicos e incluye la separación o conversión de contaminantes como resultado de una reacción química. Este método de tratamiento es muy costoso. Todos los investigadores buscan nuevos métodos para reducir muchos pasos del tratamiento químico, o esperan obtener los mejores resultados utilizando la cantidad óptima de productos químicos (contaminación). De esta forma, el objetivo de la neutralización es controlar la cantidad de pH en el sistema de tratamiento de aguas residuales. De esta manera, la dilución de entrada tiene un pH ajustado al rango óptimo para acelerar los metales como hidróxidos (Shojaei y Shojaei, 2021).

c. Tratamiento biológico de aguas residuales

El último método para tratar aguas residuales es conocido como tratamiento biológico de aguas residuales. Es frecuente el uso de microorganismos en este proceso. Los métodos basados en actividades biológicas se dividen en dos partes, aeróbicas y anaeróbicas. Se utilizan para eliminar sustancias biodegradables, solubles, orgánicas y nutrientes, y coloides de las aguas residuales. Aunque el tratamiento biológico de aguas residuales no está totalmente comprendido en la intersección de la biología y la bioquímica, se basa en el uso de bacterias y nematodos para descomponer los desechos orgánicos a través de procesos celulares normales. El objetivo de este tratamiento es crear un sistema que permita recoger fácilmente los productos de la descomposición para tener acceso adecuado a ellos (Sahu et al., 2021).

2.2.6. Tratamientos de drenajes ácidos de minas

a. Tratamientos activos

Este tipo de tratamiento precisa de una operación continuada, como sucede en una planta química de tratamiento de aguas ácidas. El tratamiento de ADAM utilizando métodos químicos mediante la adición de sustancias alcalinas que tienen alto costo sobre todo cuando el tratamiento se dará a grandes volúmenes. Más aún, requiere un control y mantenimiento de las instalaciones de aireación y mezclado, así como de un almacenamiento adecuado de los lodos con carga metálica (Aduvire, 2006).

Los tratamientos activos del ADAM implican el uso de materiales alcalinos como la cal para neutralizar los ácidos del agua. Estos tratamientos activos son altamente costosos, por ello surgen los tratamientos pasivos que se utilizan ampliamente en todo el mundo, tenemos en referencia a humedales artificiales, biorreactores anaeróbicos reductores de sulfato, drenajes anóxicos de piedra caliza, entre otros.(Qin et al., 2019)

Como detalla (Aduvire, 2006), en muchas instalaciones se suele trabajar elevando el pH hasta aproximadamente ADAM entre 9,0 en términos medios, pues en condiciones de mayor basicidad también aumenta la solubilidad de los metales. Asimismo, la mayoría de sistemas de tratamiento activo para aguas ácidas de mina están basados en la precipitación de hidróxidos, que se realiza en un proceso de tres pasos:

- Oxidación (para convertir Fe^{2+} en Fe^{3+})
- Dosis con álcalis, especialmente $Ca(OH)_2$ pero también con $Na(OH)_2$, $NaHCO_3$ y otras sustancias.
- Sedimentación.

b. Tratamientos pasivos

De acuerdo a Aduvire (2006), los sistemas pasivos tienen mayor eficacia en el tratamiento de pequeños caudales, como los que se generan en minas abandonadas. Una vez recogido los drenajes residuales y antes de elegir el sistema de tratamiento, se debe proceder a su caracterización geoquímica (pH,

oxígeno disuelto, conductividad, contenido de metales y otros), y poner especial atención a las condiciones hidrológicas del lugar, así como a los cambios de temperatura y clima.

Como puntualiza Rosa y Carranza (2015), la acidez y la alcalinidad de un drenaje ácido de mina son parámetros básicos en la selección del tipo de tratamiento pasivo; estas representan la capacidad de esas aguas para neutralizar una base o un ácido.

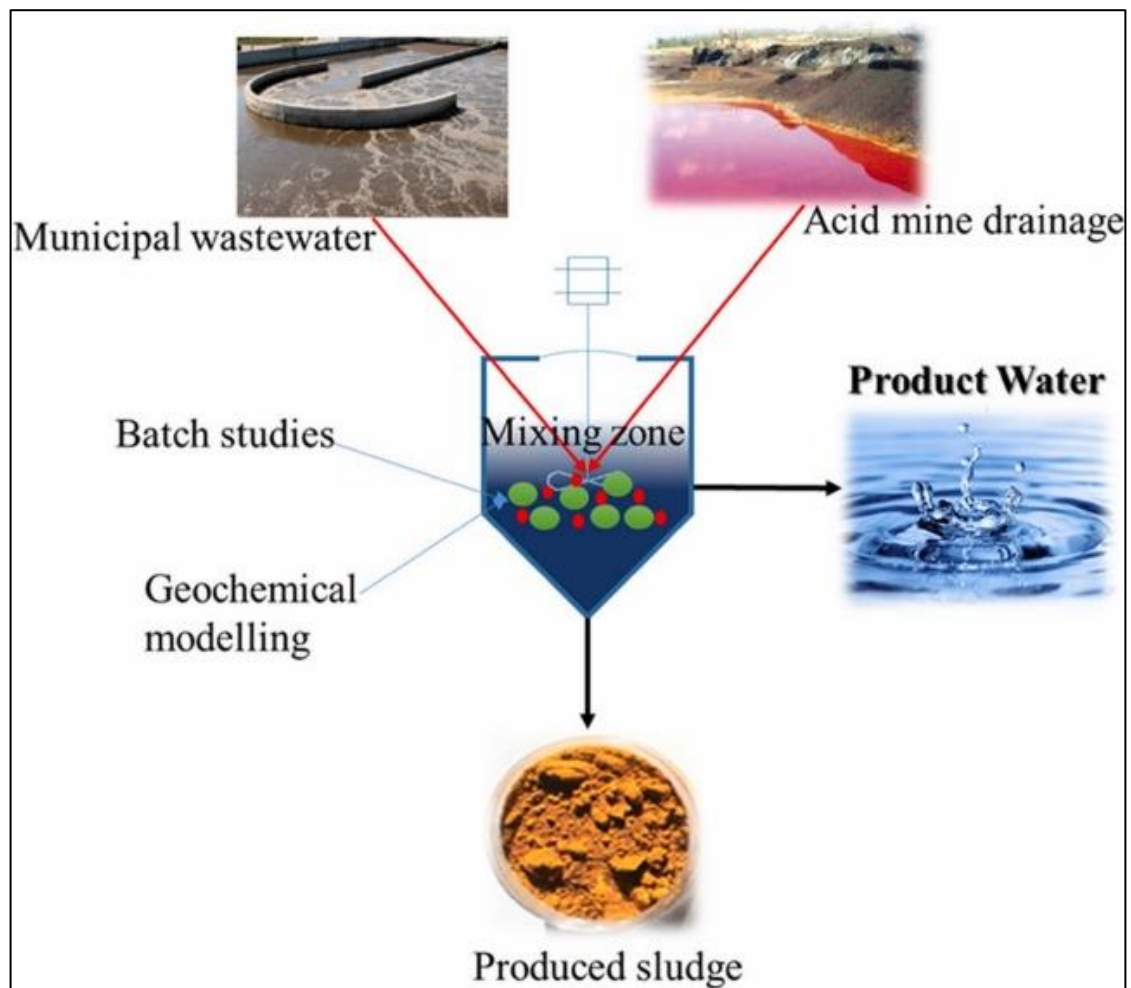
Se debe considerar entre los principales aspectos para el diseño de un sistema pasivo, a lo siguiente: Características del agua a tratar, el área o superficie, la geometría del dispositivo, la profundidad de las celdas, el tiempo de retención hidráulica y la composición del sustrato (Aduvire, 2006).

2.2.7. Co-tratamiento de aguas residuales urbanas y aguas de drenaje ácidos de mina

Las ARU y el ADAM son dos aguas residuales que representan riesgos ambientales al medio ambiente. Las modernas instalaciones de ARU son capaces de eliminar los componentes orgánicos y los patógenos de las aguas residuales antes de ser descargada. Así también existen métodos probados también para tratar el ADAM, comúnmente no se trata. En los últimos años, los investigadores han iluminado nuevos enfoques para tratar simultáneamente en las ARU y el ADAM. En la Figura 4 se muestra un sistema de co-tratamiento de ARU y el ADAM.

Figura 4

Sistema de co-tratamiento de ARU y el ADAM



Nota. Tomado de Masindi et al. (2022)

La literatura sobre el co-tratamiento ARU y el ADAM se ha incrementado en los últimos años (Masindi et al., 2022). Johnson y Younger (2006), obtuvo como resultados de un co-tratamiento un ratio volumétrico de 1:3 (Aguas de drenaje ácido de mina: Agua doméstica) una remoción para los contaminantes Fe, PO₄, NO₃, DBO, SST. De la misma manera Deng y Lin (2013) señalan que aplicando la tecnología de mezclas entre ARU y el ADAM, se puede remover eficientemente el fósforo que es uno de los principales nutrientes que causan eutrofización en las aguas receptoras.

Ruihua et al. (2011) indica que los principales componentes ADAM serían FeSO_4 , $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ que son coagulantes comunes en el tratamiento de aguas residuales. Asimismo, evaluaron el uso de coagulantes convencionales y el drenaje ácido de mina para tratar aguas residuales doméstica, determinando que la eliminación de fósforo total usando como coagulante al AA fue mejor que la de FeSO_4 dentro del rango de pH de 5-9. La eliminación de fósforo total aumentó de 20% a 95% y la concentración de hierro total residual disminuyó de 19 a 3 mg / L.

2.3. Marco conceptual

2.3.1. Eficiencia energética

La eficiencia energética es un concepto ampliamente reconocido y relevante, ya que maximizar el uso de la energía producida es crucial. Tradicionalmente, para alcanzar un rendimiento energético óptimo en un edificio, los ingenieros llevan a cabo un estudio exhaustivo de diversos factores que influyen en su eficiencia energética. Tras realizar este análisis, se certifica la calificación energética del edificio (Lombilla, 2021).

“...La eficiencia energética es el uso eficiente de la energía, de esta manera se optimizan los procesos productivos y el empleo de la energía utilizando lo mismo o menos para producir más bienes y servicio (Llauce, 2019)”.

“La eficiencia energética es la parte de la entrada total de energía a la máquina o sistema que se consume en trabajo útil y no se desperdicia como calor inútil o de otra manera. Mide cuánta energía utiliza cualquier sistema o equipo para proporcionar el nivel de rendimiento deseado (Islam y Hasanuzzaman, 2020)”.

“...el uso eficiente de la energía. Cualquier elemento que use energía, ya sea una persona, una instalación, un proceso, un producto o un servicio, se dice que es energéticamente eficiente cuando consume una cantidad inferior a la media de energía para realizar una misma actividad o trabajo. Si añadimos el compromiso con el medio ambiente, se trataría de abastecerse con la mayor cantidad posible de energías renovables como forma de cuidar el planeta...(Cordero, 2019)”

De acuerdo con las definiciones planteadas se construye el siguiente concepto sobre la eficiencia energética:

“La eficiencia energética se refiere al uso óptimo y eficiente de la energía en los procesos productivos y en el suministro de bienes y servicios. Es la medida de cuánta energía se utiliza para generar trabajo útil, minimizando el desperdicio de calor o energía no aprovechada. Además, implica consumir menos energía que el promedio en la realización de una misma actividad o trabajo. En el contexto de un compromiso ambiental, la eficiencia energética también implica el uso preferente de fuentes de energía renovable para preservar el medio ambiente”.

2.3.2. Optimización de parámetros de operación

La optimización de los parámetros es un proceso integral que combina el diseño experimental, la medición precisa, el análisis detallado y la implementación práctica para mejorar la eficiencia y eficacia de un sistema o proceso. Este enfoque no solo permite obtener resultados óptimos, sino que también facilita la comprensión de los factores clave que influyen en el rendimiento, lo que es esencial para el desarrollo y la mejora continua de tecnologías y métodos en diversos campos (Jun et al., 2020).

Según Shojaei y Shojaei (2021), se puede optimizar las características de los parámetros de operación de un sistema en función de su composición, proceso de tratamiento y operación.

De acuerdo con las definiciones se desarrolla los siguientes constructos:

La optimización de los parámetros se refiere al proceso de encontrar los valores óptimos o más favorables de los diferentes parámetros involucrados en un sistema, diseño experimental o proceso de tratamiento. Esta optimización puede basarse en los diseños experimentales y los resultados de medición, como mencionado por Jun et al. (2020). En este enfoque, se busca determinar los valores de los parámetros que conduzcan a respuestas deseadas o mejoras específicas, utilizando información recopilada a partir de mediciones y experimentos.

Además, según Shojaei y Shojaei (2021), los parámetros de operación de un sistema también pueden ser optimizados en función de su composición, proceso de tratamiento y operación. En este sentido, se considera la influencia de factores como la composición de los elementos o sustancias involucrados, los métodos de tratamiento aplicados y las condiciones de operación del sistema. La optimización de estos parámetros busca mejorar la eficiencia, rendimiento o resultados del sistema en cuestión.

En resumen, el constructor de "La optimización de los parámetros" implica encontrar los valores óptimos de los parámetros de un sistema, diseño experimental o proceso de tratamiento, ya sea a través del análisis de resultados de mediciones y diseños experimentales, o considerando la composición, proceso de tratamiento y operación del sistema. El objetivo es lograr mejoras específicas o maximizar la eficiencia y rendimiento del sistema en cuestión.

2.4. Definición de términos básicos

Eficiencia energética

Se puede definir como “ *el uso de menos energía para producir el mismo número de servicios o producción útil* (Patterson, 1996)”

Límite máximo permisible (LMP)

Se define como “*La medida de la concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, que caracterizan a una emisión, que al ser excedida causa o puede causar daños a la salud, al bienestar humano y al ambiente* (MINAM, 2010)”

Metales pesados

Metales de número atómico elevado, como cadmio, cobre, cromo, hierro, magnesio, mercurio, níquel, plomo y zinc, entre otros, que son tóxicos en concentraciones reducidas y tienden a la bioacumulación (Bermeo y Salazar, 2013).

Optimizar

La RAE (2020) lo define como *“La mejor manera de buscar de realizar una actividad”*.

Electrocoagulación

Método que emplea electricidad transmitida mediante electrodos para aglutinar y aislar partículas y contaminantes presentes en el agua, a recipiente también micro plásticos (Mayta, 2023).

Co-tratamiento

Este tratamiento combina elementos de métodos pasivos y activos para el manejo del drenaje ácido de mina (ADM) y el tratamiento convencional de aguas residuales urbanas (ARU), adoptando una perspectiva de sinergia. Facilita la mezcla y regulación de la alcalinidad, nutrientes y materia orgánica provenientes del ARU para mejorar de manera significativa la calidad del agua, sin requerir energía constante ni el uso de materiales procesados (Strosnider y Nairn, 2010).

Tratamiento de aguas residuales

Método para retirar sustancias contaminantes e indeseadas de las aguas residuales previo a su descarga en el entorno natural (Mayta, 2023).

Agua tratada

El producto final del procedimiento de electrocoagulación, en el cual se ha conseguido una notable disminución en la concentración de microplásticos y demás contaminantes presentes en el agua residual (Mayta, 2023).

3. HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1. Hipótesis

3.1.1. Hipótesis general

La eficiencia energética será alta mediante la optimización de parámetros de operación de un sistema de electrocoagulación intermitente para el co-tratamiento de aguas residuales urbanas y aguas de drenaje ácido de mina.

3.1.2. Hipótesis específica

- Los parámetros de operación del sistema de electrocoagulación tienen un efecto significativo sobre el consumo de energía para el co-tratamiento de aguas residuales urbanas y aguas de drenaje ácido de mina
- Los parámetros de operación del sistema de electrocoagulación tienen un efecto significativo sobre la eficiencia de remoción para el co-tratamiento de aguas residuales urbanas y aguas de drenaje ácido de mina
- Los parámetros de operación del sistema de electrocoagulación tienen un efecto significativo sobre el consumo de electrodos para el co-tratamiento de aguas residuales urbanas y aguas de drenaje ácido de mina

3.2. Operacionalización de variables

3.2.1. Definición operacional de la variable

Tabla 1.

Definición operacional de las variables

Variables	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensión	Indicadores	Índice	Método	Técnica
Independiente: Optimización de parámetros de operación	La optimización de los parámetros de operación se puede dar en función de los diseños experimentales y los resultados de medición (respuestas) o las condiciones bajo las cuales las respuestas múltiples se combinen (Jun et al. 2020).	La optimización de los parámetros de operación del sistema de co-tratamiento estará delimitado por los factores físicos y el tiempo de operación del sistema	Parámetros de operación	Densidad de corriente	A/m ²		
				Relación área de ánodo/volumen del reactor	m ² /m ³		
Dependiente: Eficiencia energética	“La eficiencia energética es la parte de la entrada total de energía a la máquina o sistema que se consume en trabajo útil y no se desperdicia como calor inútil o de otra manera. Mide cuánta energía utiliza cualquier sistema o equipo para proporcionar el nivel de rendimiento deseado (Islam y Hasanuzzaman 2020)”.	La eficiencia energética se medirá en función del consumo de energía del sistema de co-tratamiento	Consumo de energía	Cantidad de energía por volumen de agua tratada	kw/m ³	Hipotético - deductivo	Observación experimental
			Eficiencia de remoción	Cantidad de DQO removido	%		
			Consumo de electrodos	Cantidad de masa disminuida de electrodos	mg/L		

4. METODOLOGÍA DEL PROYECTO

4.1. Diseño metodológico

El trabajo de investigación es aplicado. Según Ñaupas et al. (2023, p. 160) este tipo de investigación se centra en la aplicación práctica del conocimiento científico para resolver problemas específicos y concretos.

El trabajo de investigación corresponde a nivel explicativo. Según Hernández-Sampieri y Mendoza (2018, p. 110) los estudios explicativos van más allá de la descripción de fenómenos, conceptos o variables o del establecimiento de relaciones entre estas; están dirigidos a responder por las causas de los eventos y fenómenos de cualquier índole. Su interés se centra en explicar por qué ocurre un fenómeno y en qué condiciones se manifiesta, o por qué se relaciona dos o más variables.

El diseño de investigación para este trabajo fue experimental. Según Arias y Cangalaya (2023, p.157) los diseños experimentales se basan en el grado de control ejercido sobre las variables objeto de estudio y el grado de aleatoriedad para asignar los objetos de investigación.

4.2. Método de investigación

El método aplicado en el presente trabajo de investigación será el hipotético-deductivo (Behar, 2008). El objetivo es demostrar las hipótesis planteadas de acuerdo con una secuencia deductiva donde el cumplimiento de las hipótesis específicas demostraría la hipótesis general.

4.2.1. Recolección y caracterización del agua residual urbana (ARU)

El agua residual urbana (ARU) se tomó de la planta de tratamiento de agua residual (PTAR) Valle Las Higueras ubicada en el distrito de Pachacamac, provincia de Lima, esta recolecta aguas domésticas. En la figura 5 se presenta el mapa de ubicación de la PTAR, con coordenadas de ubicación 293344 E y 8647030 S. La PTAR comprende de un sistema captación, desarenador, tanque equalizador, reactor aerobio y desinfección por cloración. La recolección de la muestra se realizó en la salida del tanque equalizador. Los parámetros para la caracterización del ARU fueron DQO, DBO y fósforo total.

Figura 5

Ubicación de la PTAR Valle Las Higueras



Nota. Imagen de Google Earth.

4.2.2. Recolección y caracterización del agua de drenaje ácido de mina (ADAM)

La recolección del agua de drenaje ácido de mina (ADAM) se realizó en la laguna Quiulacocha ubicada en Pasco. Esta laguna se encuentra contaminada con drenaje ácido de mina. La Figura 6 muestra una vista panorámica de la Laguna Quiulacocha con coordenadas de ubicación 359530.00 E y 8816864.00 S y una vista de esta desde arriba.

Figura 6

Vista panorámica y desde arriba de la laguna Quiulacochoa



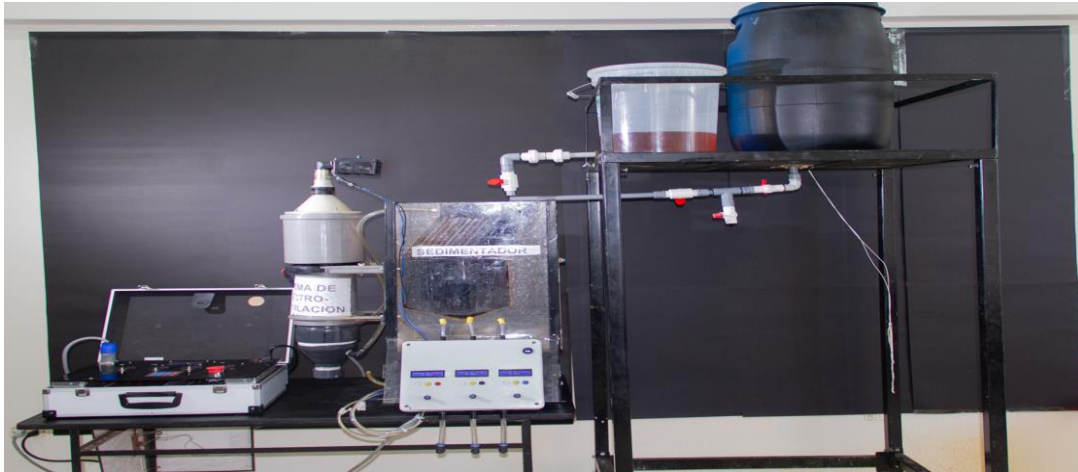
Nota. Imagen derecha: Mapa referencial de Google earth, imagen izquierda: toma de muestra de agua Laguna Quiulacochoa,

4.2.3. Implementación de un sistema de electrocoagulación intermitente

La Facultad de Ingeniería Ambiental y Recursos Naturales de la Universidad Nacional del Callao cuenta con un sistema de electrocoagulación intermitente, que comprende dos tanques para el almacenamiento de aguas residuales, un sedimentador y un reactor de electrocoagulación, tal como se muestra en la Figura 7.

Figura 7

Sistema de electrocoagulación intermitente



4.2.4. Procedimiento experimental

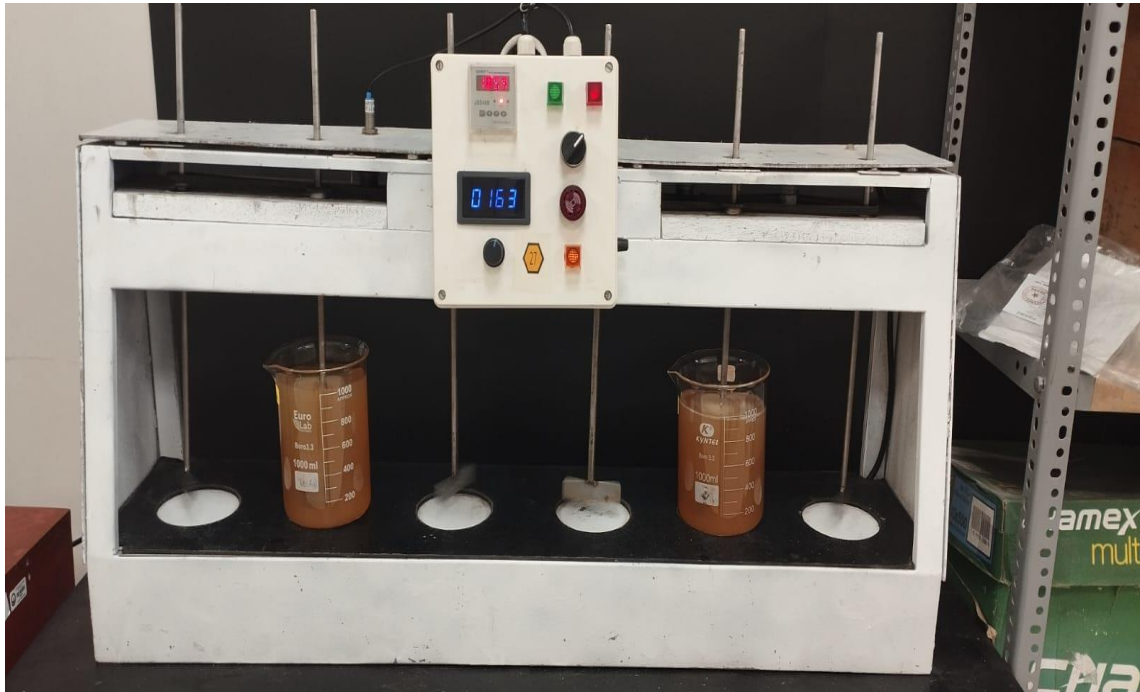
a. Dosificación de aguas residuales para el co-tratamiento

Se realizaron pruebas previas de co-tratamiento en el equipo de prueba de jarras a diferentes proporciones de ARU y ADAM. El equipo de prueba de jarra (laboratorio FIARN-UNAC) tiene una capacidad de agitación de seis posiciones de 1 L (vaso precipitado), tal como se muestra en la Figura 8.

Se agregaron dosificaciones de acuerdo a la relación molar ($\text{mmol Fe}/\text{mmol P}$) en un rango de 1 a 10, a cada vaso de precipitado de 1 L y se agitaron en un rango de tiempo de 5 a 15 min y una velocidad agitación de 150 a 300 rpm. Después de la agitación se dejaron reposar y las muestras clarificadas se recuperaron por la parte superior del vaso de precipitado para realizar los análisis de los parámetros de DQO. Las pruebas experimentales se llevaron a cabo a temperatura ambiente promedio de 27 °C.

Figura 8

Equipo de prueba de jarras para la dosificación de agua acida y agua residual urbana



b. Sistema de electrocoagulación intermitente

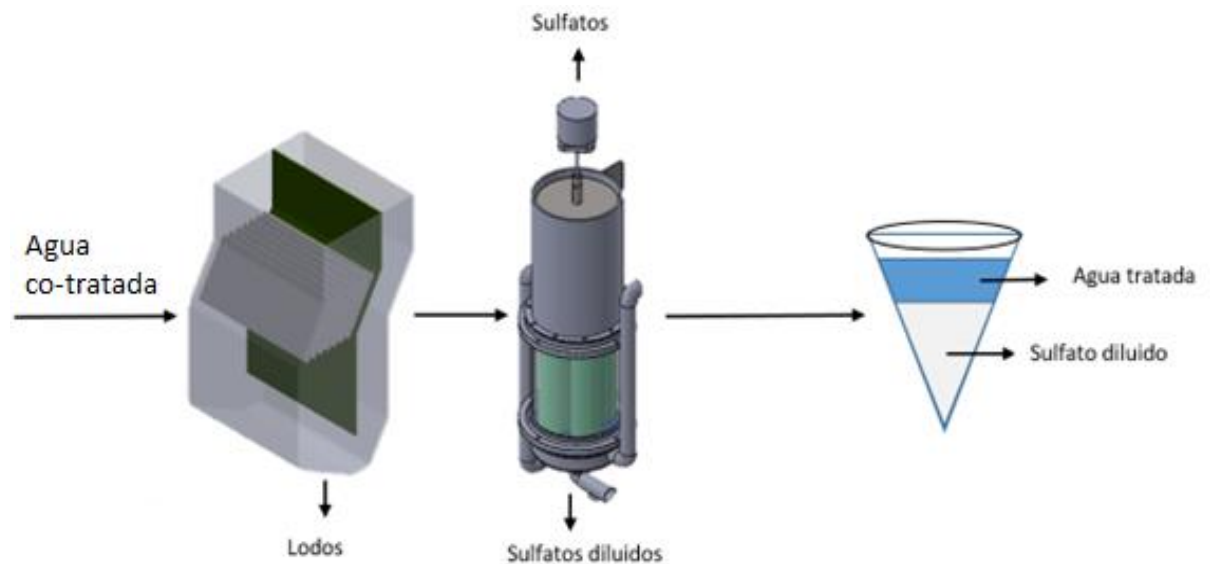
b.1. Funcionamiento

El proceso de electrocoagulación se inicia con la entrada del agua co-tratada al sedimentador, con un caudal de ingreso (Q) de 2.5 L/min, dentro de un recipiente de capacidad total de 25 L y un tiempo de retención hidráulica (TRH) de 30 minutos. Una vez que el agua ha pasado por el proceso de sedimentación, se bombea hacia el reactor de electrocoagulación. Este reactor opera con una corriente (A) de 10 amperios, tiene un volumen (V) de 13 L, un tiempo de operación (T_{op}) variable entre 30 y 50 minutos, un tiempo de reacción (T_{rx}) de 3 minutos y una retención hidráulica (TRH) de 20 minutos. Durante esta etapa, se ajusta la densidad de corriente para optimizar el tratamiento.

El resultado del tratamiento en el reactor de electrocoagulación es la obtención de agua tratada y sulfato diluido. La Figura 9 ilustra el diagrama de funcionamiento del reactor de electrocoagulación según lo mencionado anteriormente.

Figura 9

Sistema de electrocoagulación



b.2. Diseño experimental

En este trabajo de investigación, se utilizó la metodología de superficie de respuesta (MSR), que consistía en una colección de técnicas matemáticas y estadísticas implementadas para obtener una relación entre las variables independientes y las variables dependientes.

El objetivo fue evaluar la importancia relativa de varios factores efectivos en presencia de interacciones complejas. Se optó por un diseño Box-Behnken (DBB) de tres factores y tres niveles. Este DBB fue seleccionado como uno de los enfoques MSR estándar y efectivos, ya que permitía construir modelos cuadráticos para la respuesta sin necesidad de recurrir a un experimento factorial completo de tres niveles.

Los indicadores que son de importancia práctica fueron la densidad de corriente eléctrica (A), y la relación área de superficie del ánodo/volumen (S/V) (B) tiempo

de reposo (C). La Tabla 2 muestra los valores y los niveles codificados correspondientes a los factores.

Tabla 2

Factores y niveles del diseño propuestos

Nombre	Units	Mínimo (-1)	Medio (0)	Maximo (+1)
Densidad de corriente	A/m ²	1	2	3
ratio S/V	m ² /m ³	180	240	300
Tiempo de reposo	min	60	75	90

4.2.5. Muestreo y análisis del agua tratada

Cada vez que se realizaban los tratamientos en el agua tratada, se analizaba el parámetro DQO.

4.2.6. Consumo de energía

En la investigación, las respuestas en función de los tres factores independientes fueron la eficiencia de eliminación de contaminantes (Y_1) y el consumo específico de energía (Y_2).

Para el cálculo de los costos de operación, fue necesario calcular la energía. La energía, denotada por C, representaba el valor del consumo de energía de la unidad para el tratamiento de las aguas contaminadas con hidrocarburos; se calculaba en (kWh/m³).

$$C_{energía} = \frac{U.I.t}{v} \quad (1)$$

Donde C es la energía consumida en condiciones de operación para tratar el agua residual en un tiempo (t), V es el potencial de celda, t es el tiempo de electrocoagulación (h), v es el volumen de la muestra tratada, en m³ y C es la concentración inicial y residual.

4.2.7. Eficiencia de remoción

Se evaluó la eficiencia de remoción en función del parámetro de DQO como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\%Eficiencia = \frac{DQO_i - DQO_t}{DQO_i} \quad (2)$$

Dónde: La eficiencia de remoción del DQO a la energía consumida en condiciones de operación para tratar el agua residual, el DQO_i es el DQO inicial tomado de las aguas residuales y el DQO_t tomado de los DQO de tratamiento.

4.3. Población y muestra

4.3.1. Población

La población de estudio se define como un conjunto de elementos con características comunes, en el cual se busca generalizar los resultados. Esta población está compuesta por estratos o características que permiten la distinción entre los elementos. Siguiendo esta definición (Hernández y Mendoza, 2018), el universo de investigación en este estudio está representado

La población estaba representada por la mezcla de agua del drenaje ácido de mina (ADAM) y agua residual urbana (ARU). La cantidad de volumen era de 50L.

4.3.2. Muestra

La muestra es un sub conjunto de la población obtenido con la finalidad de estudiar las propiedades que tiene el universo, y que tiene las mismas características del universo y que la representa (Hernández y Mendoza, 2018).

La muestra fue una alícuota del agua tratada del sistema de co-tratamiento combinación del agua residual urbana (ARU) y agua de drenaje ácido de mina (ADAM). La cantidad de volumen de la alícuota fue de 1 L.

4.4. Lugar de estudio y periodo desarrollado

Las aguas residuales urbanas provenían de la PTAR Valle Las Higueras, ubicada en el distrito de Pachacamac, provincia de Lima, mientras que el agua de drenaje

ácido de mina proviene de la laguna llamada Quiulacocha, ubicada en la ciudad de Cerro de Pasco. Todos los experimentos propuestos en el presente trabajo de investigación se realizaron en el laboratorio de investigación de la Facultad de Ingeniería Ambiental y de Recursos Naturales de la Universidad Nacional del Callao durante los meses abril y mayo del 2024.5

4.5. Técnicas e instrumentos para la recolección de la información

4.5.1. Técnica

Según la referencia de Hernández (2018), en este estudio se utilizó la técnica de observación directa participativa para la recolección de datos. Esta técnica implicaba registrar de manera sistemática, válida y confiable los comportamientos o conductas que se manifestaban, siguiendo un conjunto de reglas y procedimientos predeterminados basados en la formulación del problema de investigación. La observación directa participativa permitía obtener información detallada y contextualizada sobre los fenómenos observados, lo que contribuía a un análisis más profundo y preciso de los datos recopilados.

4.5.2. Instrumento

Los instrumentos que se utilizaron para la presente investigación fueron la ficha de recolección de datos, la cual se adjuntó en el Anexo 2. Esta ficha contenía datos específicos relacionados con el diseño experimental, los resultados y las conclusiones obtenidas en el estudio. Asimismo, la Tabla 3 resume los métodos de análisis de laboratorio de los parámetros que se midieron:

Tabla 3

Método analítico para la recolección de la información

Indicadores	Unidades	Método	Instrumento
DQO	mg/L	SM 5220 D - Método Colorimétrico	Ficha experimental- informe del equipo de análisis

4.6. Análisis y procesamientos de datos

El análisis de regresión es un enfoque sencillo que permite comprender cómo una variable dependiente (Y) está relacionada con variables independientes (X),

según explican Molinos y Sala (2017). En este estudio, se utiliza el análisis de regresión lineal mediante el método de optimización para examinar la influencia de un conjunto de factores en la eficiencia energética del sistema de co-tratamiento. Antes de llevar a cabo los análisis de regresión, se realizan pruebas estadísticas para verificar que se cumplen los supuestos estadísticos básicos.

Para el análisis y procesamiento de los datos recopilados, se empleó el software Microsoft Excel versión 2019. Este software se utilizó para crear gráficos de dispersión que comparaban los diferentes tratamientos aplicados en el estudio.

Además, se utilizó el software estadístico Desing expert v.11 para llevar a cabo el análisis de varianza (ANOVA) con un nivel de significancia de 0.05. Se aplicaron pruebas estadísticas como la prueba de normalidad de los residuos y el test de Levene para verificar la homogeneidad de las varianzas. El estadístico usado para determinar el grado de significancia fue el F-value, en la prueba ANOVA. La utilización de estos software y pruebas estadísticas permitió realizar un análisis riguroso de los datos y demostrar la Hipótesis planteadas acerca de la eficiencia energética del sistema de co-tratamiento objeto de estudio.

4.7. Aspectos éticos de la investigación

Este trabajo de investigación se realizó respetando el código de ética de la Universidad Nacional del Callao y la directiva N° 004-2022-R "Directiva para la elaboración de proyecto e informe final de investigación de pregrado, posgrado, equipos, centros e institutos de investigación", con la finalidad de elaborar un trabajo de investigación que aporte conocimiento a la comunidad científica y sociedad. Asimismo, se reconoce las fuentes, autores, aportes científicos y técnicos correctamente citados.

5. RESULTADOS

5.1. Resultados descriptivos.

5.1.1. Resultados de las características físico-químicos del agua residual doméstica

Las aguas residuales urbanas (ARU) fueron recolectadas de la PTAR Valle Las Higueras, la cual proporcionó la ficha de caracterización. En la Tabla 4 (Anexo 3) se muestran las características de las aguas residuales urbanas (ARU), donde la cantidad de DQO y DBO es característica de este tipo de aguas residuales, con un alto contenido de Sulfatos y un moderado contenido de Fosforo.

Tabla 4

Caracterización físico-química de las aguas residuales urbanas

Parámetro	Unidad	Valor
pH	unidad de pH	5.70
Turbidez	NTU	3.60
Conductividad	μS/cm	2730.0
DBO ₅	mg/L	151.20
DQO	mg/L	255.50
Sulfato	mg/L	1542.8
Fosforo	mg/L	0.30

Nota: Los valores iniciales muestran el nivel de contaminación del ARU, que serán tratados en el sistema de electrocoagulación intermitente.

5.1.2. Resultados de las características físico-químicas del agua acida de la laguna Quiulacochoa

Se realizó la caracterización de las aguas ácidas de la laguna Quillacochoa en Pasco. Según la Tabla 5 (Anexo 4), estas aguas presentan una gran acidez y se caracterizan por una gran cantidad de metales, entre ellos resalta el Hierro Total y el Zinc que es característicos de esta laguna contaminada por la relvaera.

Tabla 5*Caracterización físico-química de la laguna Quilulacocha*

Parámetro	Unidad	Valor
pH	unidad de pH	1.74
Turbidez	NTU	23.07
Conductividad	$\mu\text{S/cm}$	1625.00
Antimonio	mg/L	0.0050
Arsénico	mg/L	0.004
Bario	mg/L	0.0008
Cadmio	mg/L	0.28450
Cromo	mg/L	0.0040
Fe Total	mg/L	984.8
Niquel	mg/L	0.2075
Plomo	mg/L	0.0010
Selenio	mg/L	0.004
Talio	mg/L	0.0006
Zinc	mg/L	195.8

5.1.3. Resultados experimentales

Posterior a los diferentes tratamientos experimentales en el sistema de electrocoagulación, los resultados mostraron que en todos los experimentos se presentó una alta remoción de contaminantes (mayor al 81%), pero hubo una variabilidad significativa en el consumo de energía, así como una variabilidad significativa en el consumo de electrodos, como se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6*Condiciones de operación y resultados de los experimentos diseñados*

Corrida	A:Densidad de corriente A/m²	B:ratio S/V (m²/m³)	C:Tiempo de reposo (min)	Eficiencia de remoción de DQO %	Energía consumida (kW/m³)	Consumo de electrodos (mg)
1	2	180	60	84,19	0,33	572,55
2	2	240	75	85,91	0,44	58,40
3	1	180	75	82,69	0,17	361,72

4	2	300	60	90,02	0,63	704,32
5	3	240	90	85,81	0,67	13,48
6	3	240	60	85,89	0,67	83,16
7	2	300	90	83,54	0,63	528,79
8	2	240	75	83,13	0,44	62,98
9	3	300	75	91,97	0,94	145,35
10	1	240	60	87,46	0,22	11,24
11	2	180	90	84,97	0,33	381,81
12	1	240	90	81,16	0,22	20,23
13	1	300	75	83,31	0,31	216,88
14	3	180	75	83,29	0,50	53,13

De los resultados mostrados en la Tabla 6, la Tabla 7 muestra en resumen los resultados descriptivos. Se observa que la máxima remoción de contaminantes en función del DQO (%) es del 90.02%, lograda por el tratamiento 4 con una Densidad de corriente de 2 A/m², Ratio S/V de 300 m²/m³ y Tiempo de reposo de 60 min. Por otro lado, el consumo de energía mínimo es de 0.17 kWh/m³, alcanzado por el tratamiento 3 con una configuración de Densidad de corriente de 1 A/m², Ratio S/V de 180 m²/m³ y Tiempo de reposo de 75 min y el máximo consumo de electrodos se da en el tratamiento 10 (704,32 mg).

Tabla 7

Resumen de los resultados

Parámetro	Media	Máximo	Mínimo	Desviación estándar
Eficiencia remoción %	85,24	91,97	81,16	2,95
Consumo de energía kWh/m ³	0,46	0,94	0,17	0,22
Consumo de electrodos (mg)	229,57	704,32	11,23	236,68

5.1.4. Efectos de los factores del tratamiento

a. Eficiencia de remoción de DQO

En la Figura 10 muestra la dependencia de la eficiencia de remoción de contaminantes al tiempo de reposo. Como se ve en la Figura 10, la remoción de

DQO se mantiene alto en un rango de 90% al 92%. Es de destacar que el aumento del tiempo de reposo para la generación de nata en el electrocoagulador este tiempo de reposo mejoró la flotación de los flocúlos. Asimismo, se observa que la relación de S/V favorece a la remoción tanto para niveles más elevados como para los más reducidos, mientras que para los niveles intermedios la remoción de DQO es menor. Por otra parte, conforme la densidad de corriente es mayor afecta positivamente a la remoción de DQO.

Figura 10

Efecto del tiempo de reposo sobre la eficiencia de remoción (%)

Design-Expert® Software
Factor Coding: Actual

DQO residual

● Design points above predicted value

○ Design points below predicted value

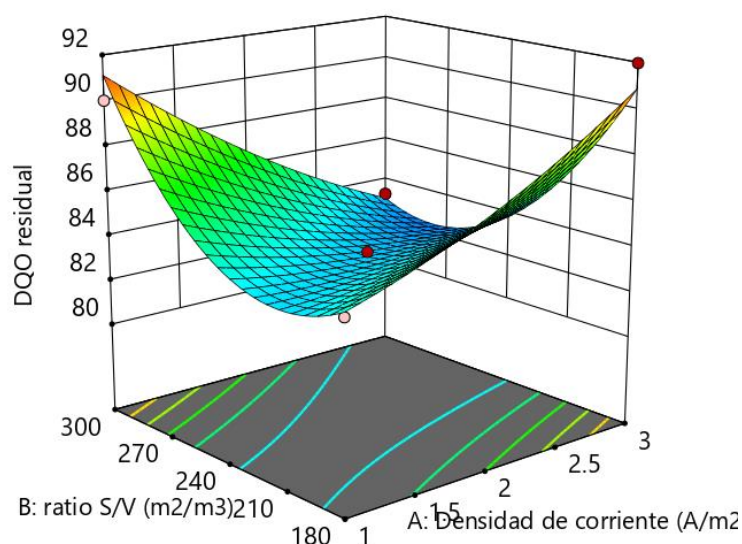
81.1628  91.9701

X1 = A: Densidad de corriente

X2 = B: ratio S/V

Actual Factor

C: Tiempo de reposo = 75

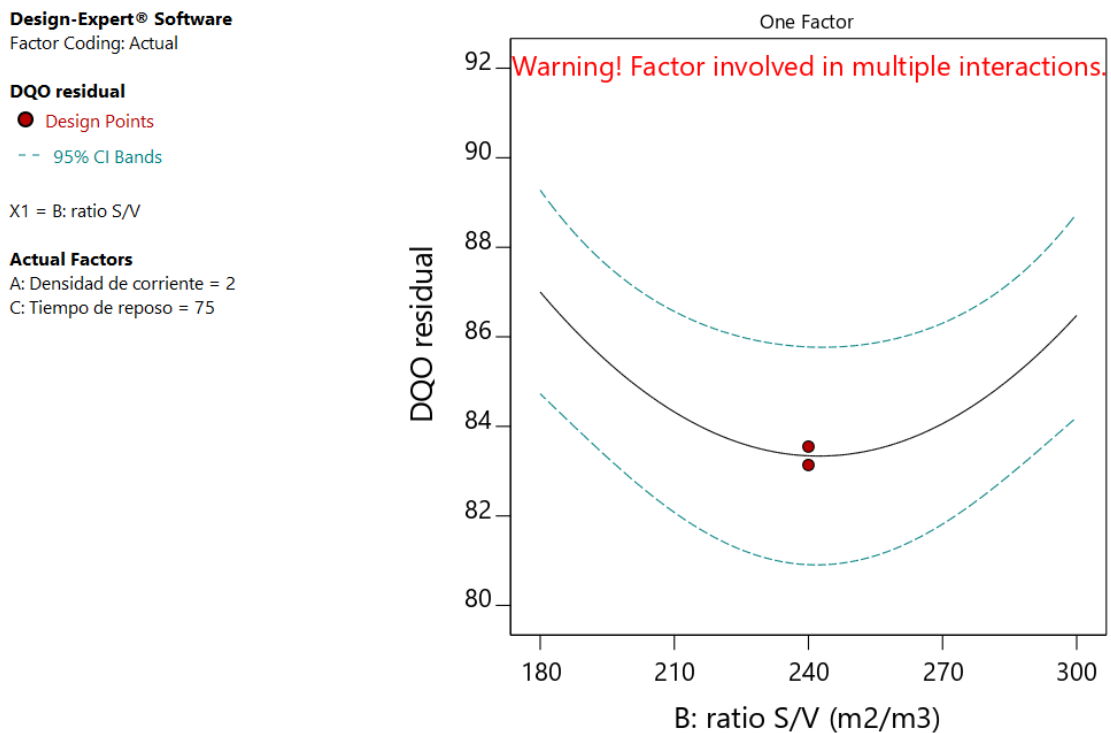


La Figura 11 ilustra que para el nivel medio de densidad de corriente (55 A/m²), la eficiencia de remoción aumentó al aumentar la relación S/V en un tiempo de residencia determinado. La pendiente del aumento, sin embargo, fue mayor para tiempos de residencia relativamente cortos y se estabilizó gradualmente al aumentar el tiempo de residencia. Esto implica que proporcionar una mayor superficie anódica para un volumen de reactor determinado puede considerarse una medida eficaz para mejorar la eliminación de aceite cuando el período de residencia de las aguas residuales en un reactor de

electrocoagulación continuo es corto, por ejemplo, una vez que el volumen del reactor es pequeño y/o el caudal es alto. Esta es otra indicación de que, debido al impacto adverso del retromezclado sobre la eficiencia de eliminación de aceite que se mejora con tiempos de residencia prolongados, se puede encontrar un valor óptimo para el tiempo de residencia en el que se alcanzaría la máxima eficiencia de eliminación del contaminante.

Figura 11

Efecto de la densidad de corriente sobre la eficiencia de remoción (%)



b. Consumo de energía específica

Las Figuras 12, 13 y 14 indican que el consumo de energía específico aumenta con la densidad de corriente, el tiempo de residencia y la relación S/V. Cuanto mayor sea el nivel de estos factores, mayor será la tasa de aumento del consumo específico de energía. Por ejemplo, en el nivel bajo de densidad de corriente (1 A/m²), el consumo de energía específico aumentó en un 82.35% (de 0.17 a 0.31 kWh/m³) al aumentar la relación S/V de 180 a 300 m²/m³, manteniendo el tiempo de residencia en 75 minutos. Sin embargo, para el mismo

tiempo de residencia, cuando la densidad de corriente se fijó en su nivel alto (3 A/m²), el consumo de energía específico aumentó en un 88% (de 0,5 kWh/m³ a 0.94) al aumentar la relación S/V de 180 a 300 m²/m³.

Figura 12

Efecto de la densidad de corriente sobre la energía consumida

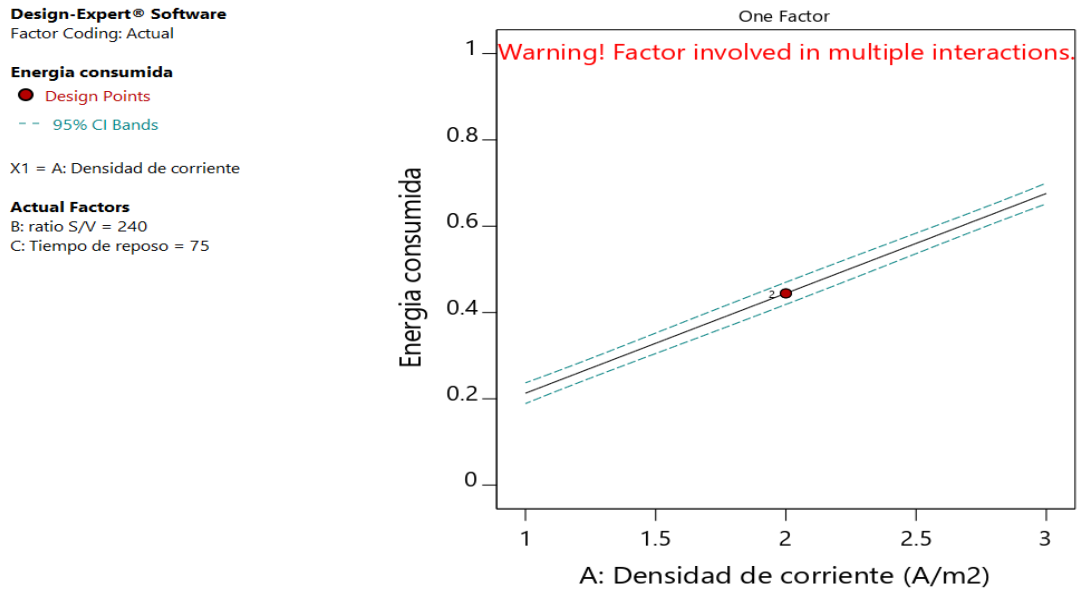
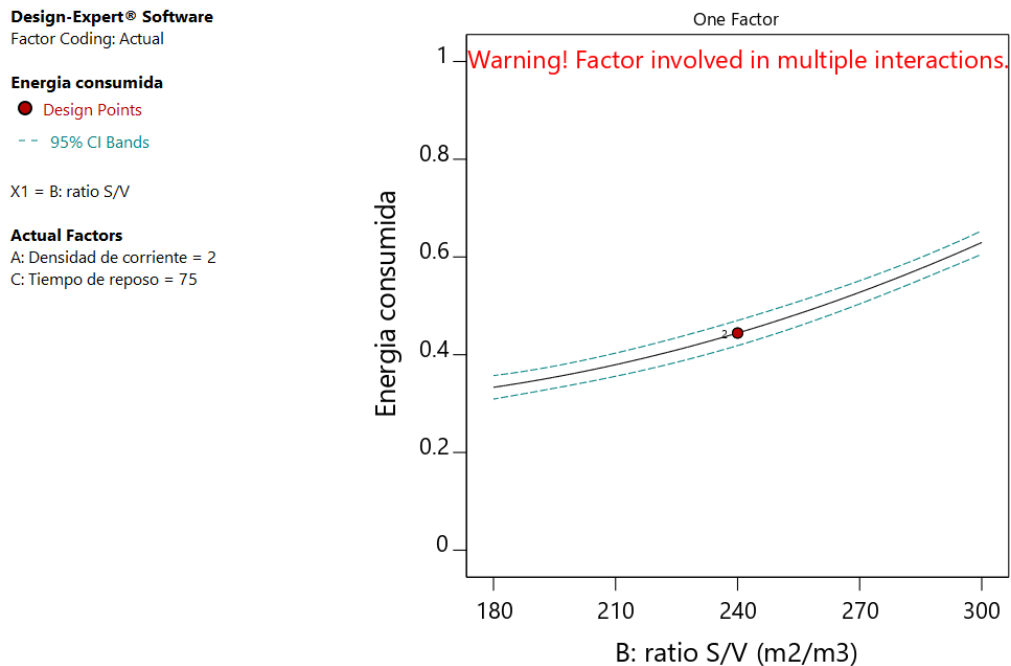


Figura 13

Efecto de la ratio S/V sobre la energía consumida




En la figura 14, cuando la ratio es de 180 S/V (m^2/m^3) en el intervalo de variación de la Densidad de corriente, la energía consumida aumenta en 194.12% (de 0.17 kWh/ m^3 a 0.5 kWh/ m^3); en cambio, para la ratio de 300 S/V (m^2/m^3), la energía consumida aumenta en el intervalo de variación del factor Densidad de corriente en 203.23% (0.31 kWh/ m^3 a 0.94 kWh/ m^3).

Figura 14

Efecto de la densidad de corriente y la ratio S/V sobre la energía consumida

Design-Expert® Software
Factor Coding: Actual

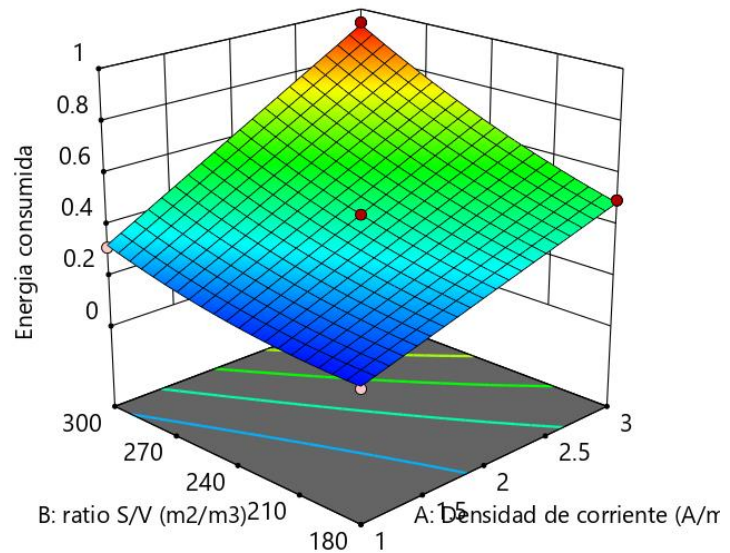
Energía consumida

- Design points above predicted value
 - Design points below predicted value
- 0.166667  0.944444

X1 = A: Densidad de corriente
X2 = B: ratio S/V

Actual Factor

C: Tiempo de reposo = 75



c. Consumo de electrodos

La Figura 15, muestra el efecto de la densidad de corriente en el consumo de electrodos. En el intervalo de 1 A/m^2 a 2 A/m^2 , cuanto mayor sea el nivel de la densidad de corriente mayor será la eficiencia de consumo de electrodos. Sin embargo, en el nivel alto de densidad de corriente ($>2 \text{ A}/\text{m}^2$) la eficiencia de consumo de electrodos disminuye manteniendo la ratio S/V (240 m^2/m^3) y el tiempo de residencia en 75 minutos.

Figura 15

Efecto de la densidad de corriente sobre la eficiencia de consumo de electrodos

Design-Expert® Software

Factor Coding: Actual

Eficiencia de consumo de electrodos (%)

● Design Points

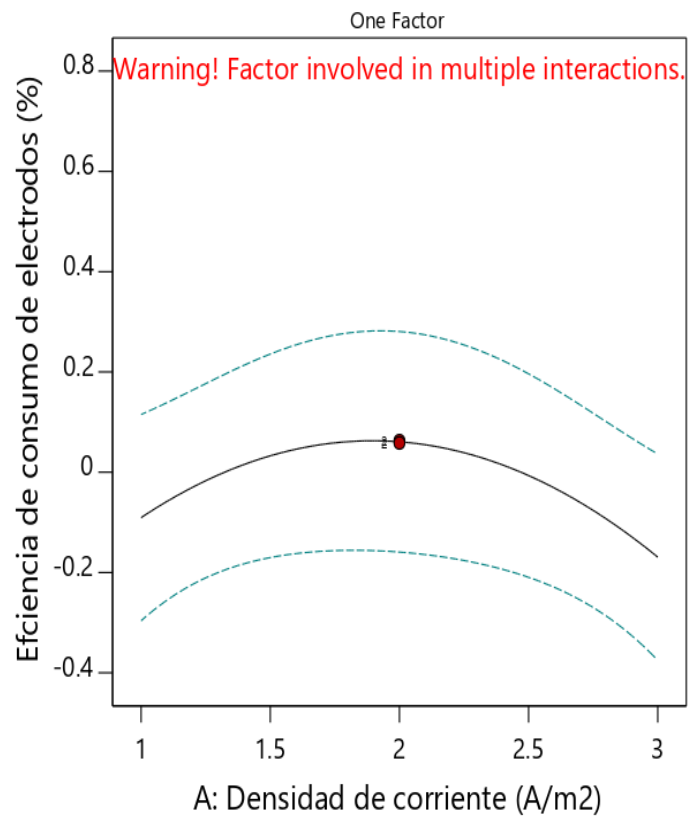
-- 95% CI Bands

X1 = A: Densidad de corriente

Actual Factors

B: ratio S/V = 240

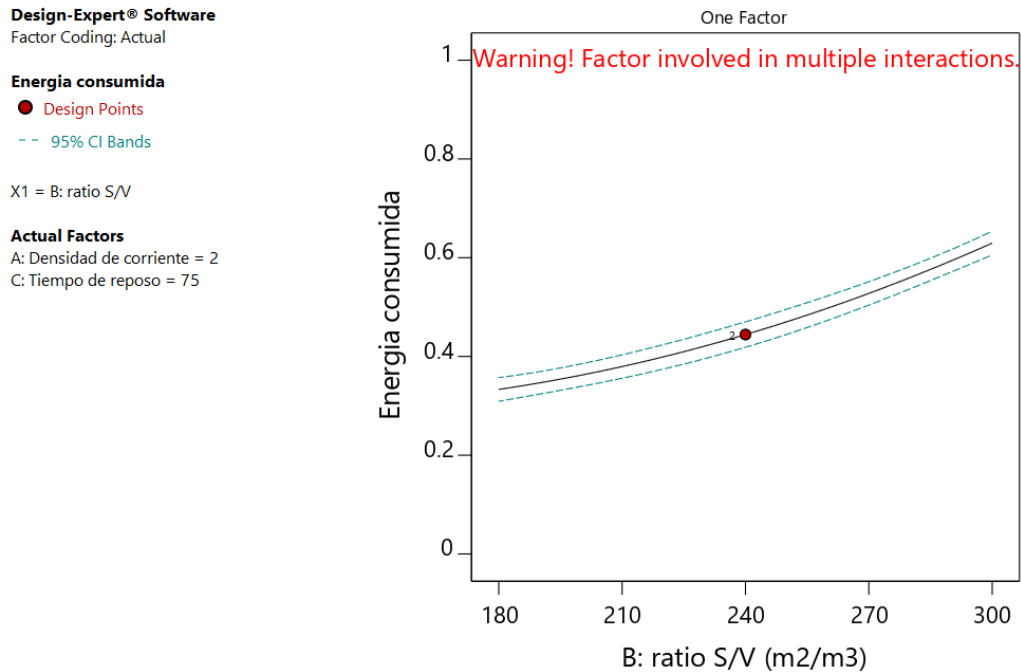
C: Tiempo de reposo = 75



En la Figura 16, se observa el efecto de la ratio S/V en el consumo de electrodos. Se evidencia que al aumentar la ratio S/V, la eficiencia de consumo de electrodos presenta un incremento en el intervalo evaluado, considerando que se mantiene fijos los factores densidad de corriente en 2 A/m² y tiempo la ratio S/V (240 m²/m³) y el tiempo de reposo en 75 minutos.

Figura 16

Efecto de la ratio S/V sobre la eficiencia de consumo de electrodos



5.2. Resultados inferenciales

5.2.1. Resultados inferenciales de la eficiencia de remoción

En la figura 17 se observa la tendencia de los puntos cercanos a la línea (principalmente en el centro), confirmando la satisfacción del requisito; los términos del error se distribuyen normalmente. Además, el coeficiente de variación se refiere a la relación entre el error estándar (Std. Dev) de los datos estimados a la media en el modelo.

Figura 17

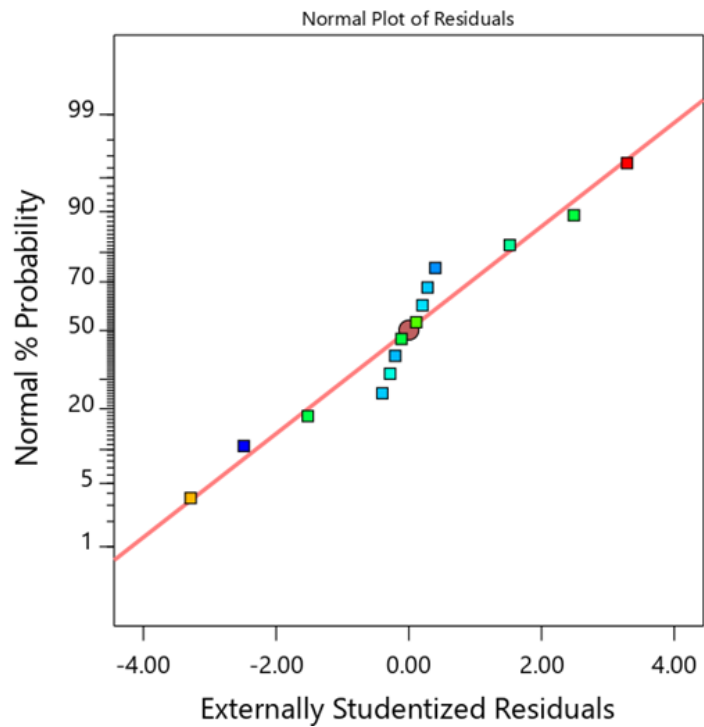
Normalidad de los datos de la eficiencia de remoción

Design-Expert® Software

DQO residual

Color points by value of
DQO residual:

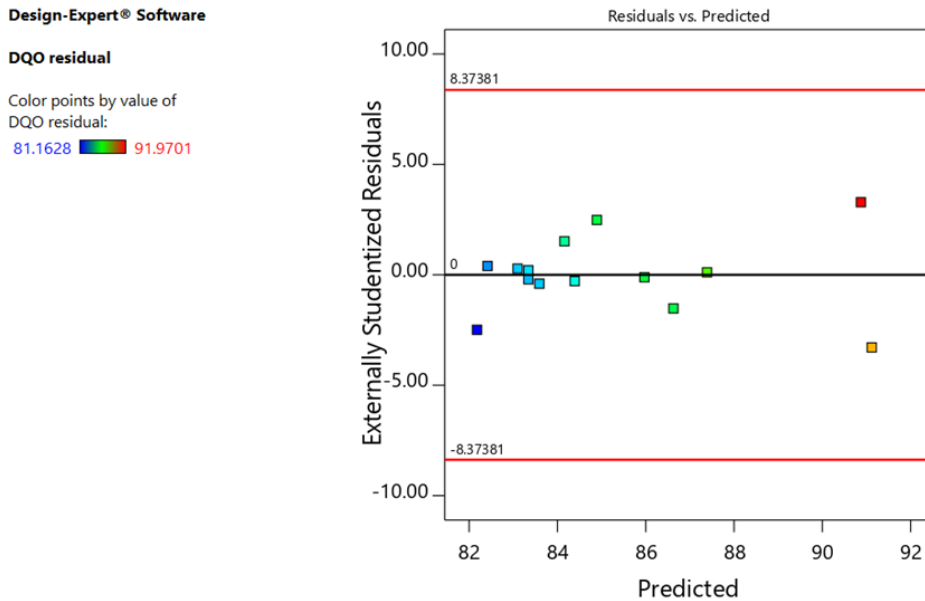
81.1628  91.9701



En la figura 18 se observa que los datos se distribuyen cercanos a la línea media, esto sugiere homogeneidad de la varianza. Sin embargo, existen valores atípicos.

Figura 18

Homogeneidad de la varianza de los datos de la eficiencia de remoción



a. Análisis de la varianza (ANOVA)

Se realizó la prueba estadística de Fisher para el análisis de varianza (ANOVA) de un modelo de regresión para el porcentaje de remoción de contaminante (%) como función cuadrática de la densidad de corriente eléctrica (A), el tiempo de reposo (B) y la superficie del ánodo/ relación de volumen del rector (S/V) (C). Los resultados de ANOVA para este modelo se presentan en la Tabla 8. Los valores de $p < 0,05$ para los coeficientes del modelo significan su importancia. Por lo tanto, se consideran significativos para la eficiencia de eliminación de contaminante, y los términos restantes con coeficientes A^2 y C^2 se excluyeron del modelo. En consecuencia, el mejor modelo de regresión cuadrática para el porcentaje remoción de DQO en términos de los valores reales de los factores investigados viene dado por:

$$\text{DQO residual} = +83.34 - 0.3850A - 0.2625 B - 0.9722C - 3.63AB + 0.2666AC - 0.6429BC + 0.6308A^2 + 3.40B^2 - 0.7031C^2$$

Tabla 8.

Análisis de varianza (ANOVA) para el modelo cuadrático de consumo remoción de contaminante

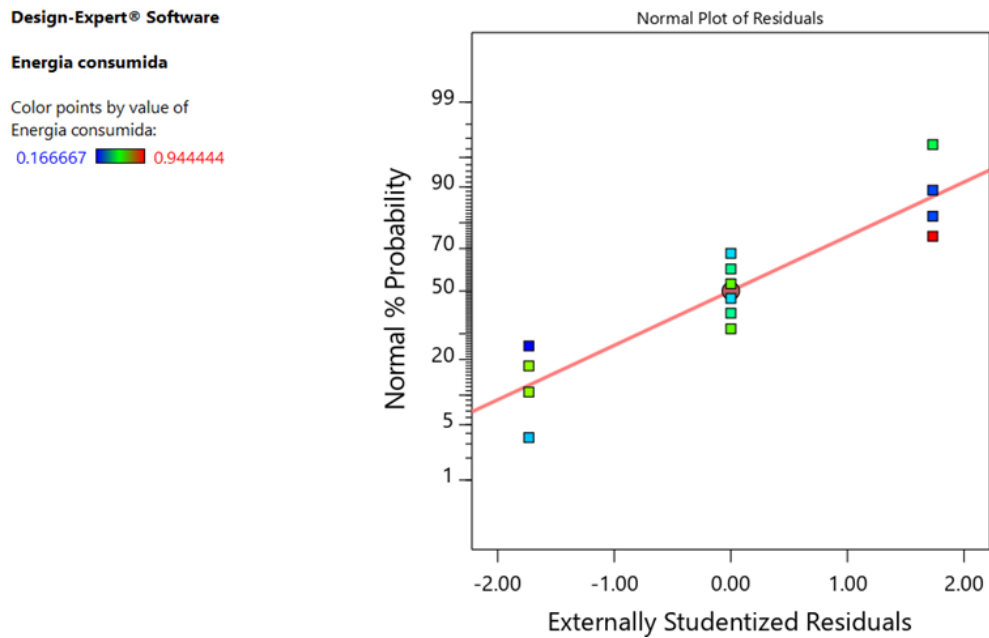
Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	F-valor	p-valor
Modelo	107,255	9	11,92	7,77	0,03
A-Densidad de corriente	1,186	1	1,19	0,77	0,43
B-ratio S/V	0,551	1	0,55	0,36	0,58
C-Tiempo de reposo	7,561	1	7,56	4,93	0,09
AB	52,599	1	52,60	34,28	0,00
AC	0,284	1	0,28	0,19	0,69
BC	1,653	1	1,65	1,08	0,36
A ²	1,273	1	1,27	0,83	0,41
B ²	36,936	1	36,94	24,07	0,01
C ²	1,582	1	1,58	1,03	0,37
Residual	6,138	4	1,53		
Lack of Fit	6,053	3	2,02	23,78	0,15
Pure Error	0,085	1	0,08		
Cor Total	113,392	13			

5.2.2. Resultados inferenciales del consumo de energía

Según la normalidad los datos se distribuyen en a lo largo de la línea, en el que los términos de error se distribuyen normalmente. Los resultados se observan en la figura 19.

Figura 19

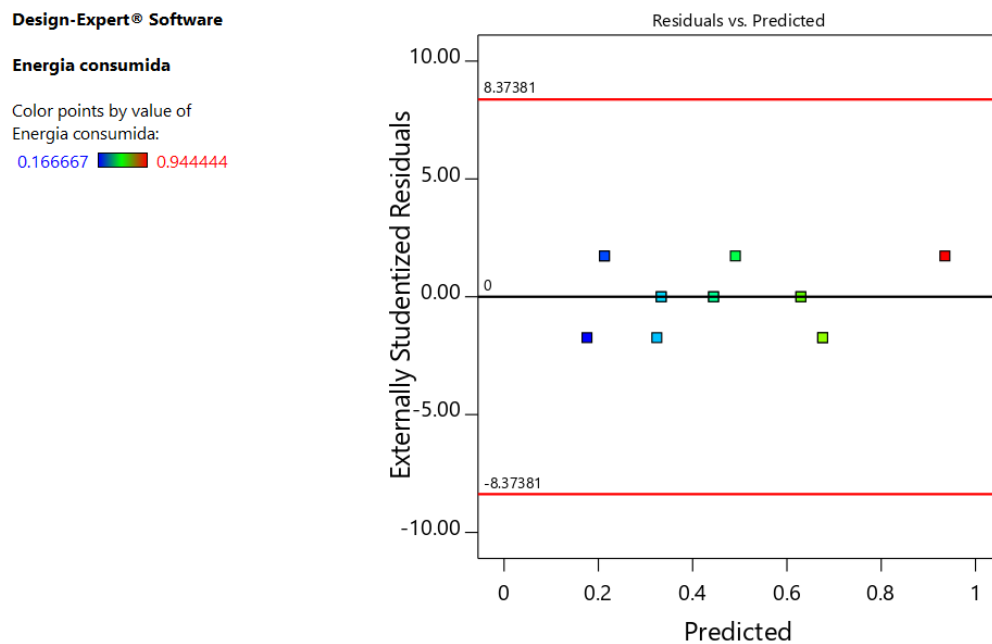
Normalidad de los datos del consumo de energía



En la figura 20 se observa que los datos se distribuyen homogéneamente a lo largo de la línea media, esto sugiere homogeneidad de la varianza.

Figura 20

Homogeneidad de la varianza de los datos del consumo de energía



a. Análisis de la varianza (ANOVA)

Según los resultados del ANOVA para el modelo de regresión cuadrática, presentados en la Tabla 9, los factores efectivos en el consumo específico de energía son A, B, AB, AC y BC, coeficientes A² con valores de P < 0,05. Además, ninguno de los términos cuadráticos puros de los factores afecta significativamente el consumo específico de energía. Por lo tanto, se concluye que un modelo de regresión de interacción de dos factores (2FI) para el consumo específico de energía es adecuado para describir su relación con los factores estudiados.

$$\text{Consumo de Energía} = 0.56 - 0.18A - 0.22B + 0.20C + 0.46AB + 0.59AC + 0.7875BC + 0.69A^2 + 0.07B^2 + 0.44C^2$$

Tabla 9

Análisis de varianza (ANOVA) para el modelo cuadrático de consumo energético específico

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	F-valor	p-valor
Model	0,63	9	0,07	408,83	0,00
A-Densidad de corriente	0,43	1	0,43	2500,00	0,00
B-ratio S/V	0,18	1	0,18	1024,00	0,00
C-Tiempo de reposo	0,00	1	0,00	0,00	1,00
AB	0,02	1	0,02	128,00	0,00
AC	0,00	1	0,00	0,00	1,00
BC	0,00	1	0,00	0,00	1,00
AÂ ²	0,00	1	0,00	0,00	1,00
BÂ ²	0,00	1	0,00	25,60	0,01
CÂ ²	0,00	1	0,00	0,00	1,00
Residual	0,00	4	0,00		
Lack of Fit	0,00	3	0,00		
Pure Error	0,00	1	0,00		
Cor Total	0,63	13			

5.2.3. Resultados inferenciales eficiencia del consumo de electrodos

En la figura se observa la distribución de los datos, la tendencia es cercana a la línea, se evidencia que los valores predichos exhiben un alto grado de proximidad a los valores reales. Los términos del error se distribuyen uniformemente, ya que muestra linealmente a lo largo de la línea diagonal.

En la figura se observa que los datos se distribuyen cercanos a la línea media, esto sugiere homogeneidad de la varianza. Sin embargo, existen valores atípicos

Figura 21

Normalidad de los datos del consumo de electrodos

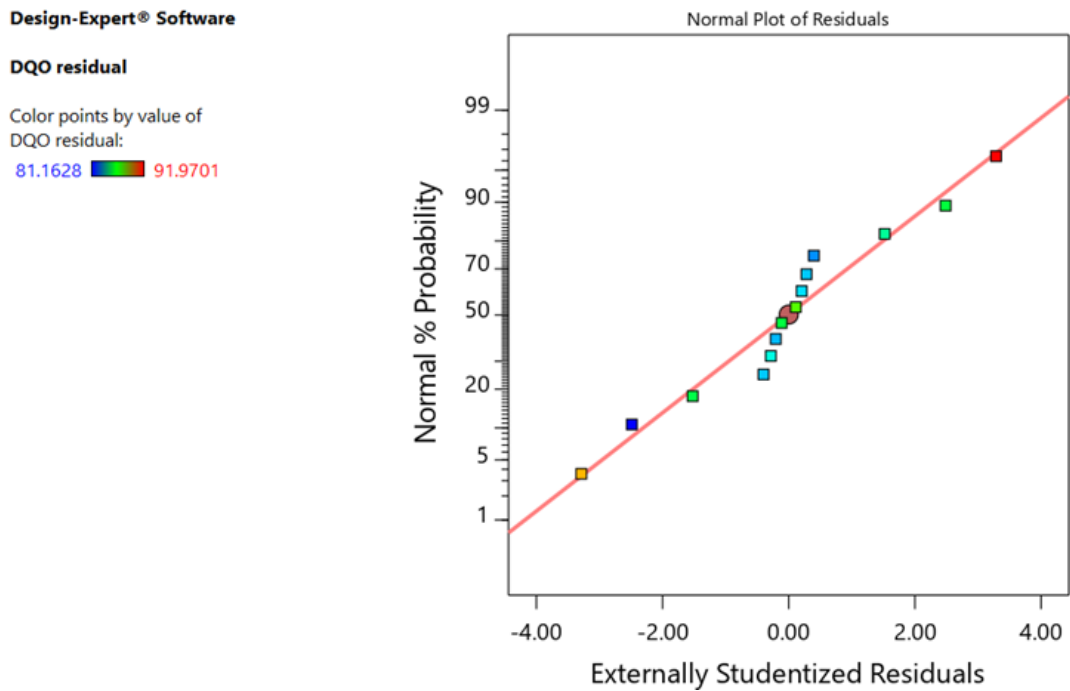
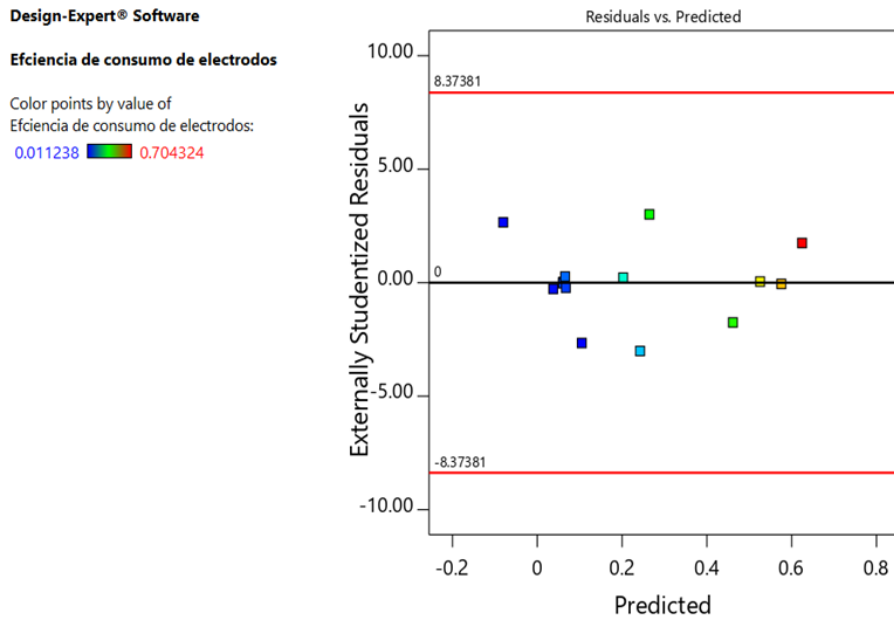


Figura 22

Homogeneidad de varianza de los datos del consumo de electrodos



a. Análisis de la varianza (ANOVA)

Se realizó la prueba estadística de Fisher para el análisis de varianza (ANOVA) de un modelo de regresión para la eficiencia de consumo de electrodos como función cuadrática de la densidad de corriente eléctrica (A), el tiempo de reposo (B) y la superficie del ánodo/ relación de volumen del rector (S/V) (C). Los resultados de ANOVA para este modelo se presentan en la Tabla 10. Los valores de $p < 0,05$ para los coeficientes del modelo significan su importancia. Por lo tanto, se consideran significativos para la eficiencia de consumo de electrodos, respecto a los términos restantes con coeficientes A^2 y B^2 .

Tabla 10

Análisis de varianza (ANOVA) para el modelo cuadrático de eficiencia de consumo de electrodos

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	F-valor	p-valor
Modelo	0.678	9	0.08	6.0037	0.0499
A-Densidad de corriente	0.012	1	0.01	0.9880	0.3765
B-ratio S/V	0.006	1	0.01	0.5094	0.5148
C-Tiempo de reposo	0.023	1	0.02	1.8159	0.2491
AB	0.014	1	0.01	1.1196	0.3497
AC	0.002	1	0.00	0.1233	0.7432
BC	0.000	1	0.00	0.0046	0.9492
A ²	0.116	1	0.12	9.2669	0.0382
B ²	0.336	1	0.34	26.8037	0.0066
C ²	0.084	1	0.08	6.6894	0.0609
Residual	0.050	4	0.01		
Lack of Fit	0.050	3	0.02	1593.7836	0.0184
Pure Error	0.000	1	0.00		
Cor Total	0.728	13			

Además, el valor F del modelo obtenido fue de 6.0037 con un valor de $p < 0.0499$, lo cual indica que el modelo es significativo para explicar el proceso

Tabla 11

Análisis R^2 , R^2_{pred} y R^2_{adj}

R²	R² ajustado	Precisión adecuada	Desv. Estand.	Media	C.V. %
0.9311	0.7760	7.4474	0.1120	0.2296	48.80

De la Tabla 11, se observa el valor de R^2 DE 0.93 y el $R^2_{adj}=0.7760$, teniendo una diferencia menor a 0,2, esto implica que este indicador de ajuste global del modelo es adecuado, es decir, el modelo explica el 93% del proceso. El valor de “*Precisión Adecuada*” mide la relación señal/ruido. Una razón mayor a 4 es

deseable. Se observa que se tiene un valor de razón de 7.4474 lo que indica una señal adecuada. En consecuencia, el mejor modelo de regresión cuadrática para la eficiencia de consumo de electrodos en términos de los valores reales de los factores investigados viene dado por:

$$\text{Eficiencia de consumo de electrodos} = +0.0607 - 0.0394*A - 0.0283*B - 0.0534*C - 0.0593*A*B - 0.0197*A*C + 0.0038*B*C - 0.1906*A^2 + 0.3242*B^2 - 0.1620*C^2$$

5.3. Otro tipo de resultados estadísticos

En el trabajo de investigación, los análisis estadísticos se limitaron a los métodos inferenciales y descriptivos. No se incluyeron otros tipos de análisis estadísticos. La decisión de centrarse únicamente en los análisis inferenciales y descriptivos se debió a la naturaleza de los datos y a los objetivos específicos del estudio. Estos métodos fueron considerados suficientes para responder a las preguntas de investigación planteadas y para proporcionar una comprensión clara y concisa de los resultados.

VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1. Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados

Las hipótesis se discutirán en función de las dimensiones de las variables independiente y dependiente.

a. Hipótesis general

La eficiencia energética será alta mediante la optimización de parámetros de operación de un sistema de electrocoagulación intermitente para el co-tratamiento de aguas residuales urbanas y aguas de drenaje ácido de mina.

b. Hipótesis específica 1

H₀: Los parámetros de operación del sistema de electrocoagulación no tienen un efecto significativo sobre el consumo de energía en el co-tratamiento de aguas residuales urbanas y aguas de drenaje ácido de mina.

H₁: Los parámetros de operación del sistema de electrocoagulación tienen un efecto significativo sobre el consumo de energía en el co-tratamiento de aguas residuales urbanas y aguas de drenaje ácido de mina.

Según la Tabla 9 la densidad de corriente, el tiempo de reposo y el ratio S/V presenta una significancia con un $p < 0.05$ en el indicador consumo de energía; entonces **se rechaza la Hipótesis Nula (H₀) y se acepta la hipótesis alternativa**. Definiendo que existe un efecto significativo como componente de operación del electrocoagulador con un valor $p < 0.05$. Mientras no tiene un efecto significativo en los demás parámetros de estudio.

c. Hipótesis específica 2

H₀: Los parámetros de operación del sistema de electrocoagulación no tienen un efecto significativo sobre la eficiencia de remoción en el co-tratamiento de aguas residuales urbanas y aguas de drenaje ácido de mina.

H₁: Los parámetros de operación del sistema de electrocoagulación tienen un efecto significativo sobre la eficiencia de remoción en el co-tratamiento de aguas residuales urbanas y aguas de drenaje ácido de mina.

Según la Tabla 8 el tiempo de reposo presenta una significancia con un $p < 0.05$ en el indicador consumo de energía; entonces ***se rechaza la Hipótesis Nula (H₀) y se acepta la hipótesis alternativa.*** Definiendo que existe un efecto significativo como componente de operación de del electrocoagulador con un valor $p < 0.05$. Mientras no tiene un efecto significativo en los demás parámetros de estudio.

e. Hipótesis específica 3

H₀: Los parámetros de operación del sistema de electrocoagulación no tienen un efecto significativo sobre el consumo de electrodos en el co-tratamiento de aguas residuales urbanas y aguas de drenaje ácido de mina.

H₁: Los parámetros de operación del sistema de electrocoagulación tienen un efecto significativo sobre el consumo de electrodos en el co-tratamiento de aguas residuales urbanas y aguas de drenaje ácido de mina.

Según la Tabla 8 la ratio S/V presenta una significancia con un $p < 0.05$ en el indicador consumo de energía; entonces ***se rechaza la Hipótesis Nula (H₀) y se acepta la hipótesis alternativa.*** Definiendo que existe un efecto significativo como componente de operación de del electrocoagulador con un valor $p < 0.05$. Mientras no tiene un efecto significativo en los demás parámetros de estudio.

6.2. Contrastación de los resultados con estudios similares

Esta investigación presenta una alta remoción de contaminantes en %DQO y experimentalmente se vuelve más pronunciado a medida que aumenta el consumo específico de energía. Esto podría deberse a un aumento en la eficiencia actual (rendimiento faradaico) en los niveles más altos de densidad de corriente y tiempo de residencia que resulta en un mayor consumo de energía específica (Zodi et al., 2013) como la eficiencia actual se mejora al aumentar el consumo de energía específico experimental, lo que lleva a una mejora iónica y una conductividad electrolítica mejoradas y, por lo tanto, a una reducción de la resistencia óhmica. En estas circunstancias, el consumo de energía específico real se vuelve significativamente menor.

De acuerdo a lo reportado en otros estudios como Wang et al. (2023) demostraron que la tasa de eliminación de DQO aumentó casi linealmente con la corriente de salida y el caudal de ERS cuando se usa Ti/Ti_4O_7 ánodo, pero las condiciones de operación excesivas causaron un aumento lento o incluso una disminución de η_{DQO} cuando se usaban ánodos de $Ti/IrO_2 - RuO_2$ o Ti/PbO_2 . De igual forma de lo reportado en esta investigación usando ánodo de aluminio. Karimi et al. (2022) también reportó la remoción de DQO en el primer escenario fue de 88.7% mientras que se redujo a 67.7% cuando se consideraron una eficiencia de energía en indicadores de operación, así también, Li et al. (2021) reportó que el consumo medio unitario de energía en un tratamiento SBR disminuye de 1,71 kWh/kg DQO eliminado a 1,32 kWh/kg DQO eliminado a medida que la tasa de carga de operación y la eliminación de DQO aumentan, mientras que esta investigación ha reportado rangos de consumo 0.16 a 0.94 kWh/m³ siendo óptimo para un sistema de electrocoagulación comparados con el sistema SBR aireado.

La optimización de la teoría respecto de los valores obtenidos experimentalmente se vuelve más pronunciado a medida que el consumo de energía específico aumenta. Esto podría deberse a un aumento en la eficiencia actual (rendimiento faradaico) en los niveles más altos de la densidad de corriente y tiempo de residencia que resulta en un mayor consumo de energía específico. Se sabe que el consumo de energía y electrodos representa principalmente los costos operativos de un proceso de electrocoagulación (Oladipo et al., 2022).

6.3. Responsabilidad ética

La presente tesis titulada "EFICIENCIA ENERGÉTICA MEDIANTE LA OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS DE OPERACIÓN DE UN SISTEMA DE ELECTROCOAGULACIÓN INTERMITENTE PARA EL CO-TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES URBANAS Y AGUAS DE DRENAJE ÁCIDO DE MINA" cumple fielmente con el Código de Ética de Investigación de la Universidad Nacional del Callao, aprobado por Resolución de Consejo Universitario N.º 210-2017-CU, es decir, cumple con los principios éticos:

profesionalismo, transparencia, objetividad, igualdad, compromiso, honestidad y confidencialidad.

CONCLUSIONES

- Se logró evaluar la eficiencia energética mediante la optimización de parámetros de operación de un sistema de electrocoagulación intermitente para el co-tratamiento de aguas residuales urbanas y aguas de drenaje ácido de mina. De acuerdo al método hipotético-deductivo se ha logrado confirmar las hipótesis.
- Se logró determinar el efecto de los parámetros de operación del sistema de electrocoagulación sobre el consumo de energía para el co-tratamiento de aguas residuales urbanas y aguas de drenaje ácido de mina. Los resultados muestran que a una densidad de corriente de 1 A/m^2 se dio una energía consumida de 0.17 kw/m^3 . Se demostró que la significancia fue de $P < 0.05$ donde existe un efecto de los parámetros de operación sobre el consumo de energía
- Se logró determinar el efecto de los parámetros de operación del sistema de electrocoagulación sobre la eficiencia de remoción para el co-tratamiento de aguas residuales urbanas y aguas de drenaje ácido de mina. Los resultados muestran un rango alto que varía entre 90.02% al 91.97% de remoción. Se demostró que la significancia fue de $P < 0.05$ donde existe un efecto de los parámetros de operación sobre la eficiencia de remoción.
- Se logró determinar el efecto de los parámetros de operación del sistema de electrocoagulación sobre el consumo de electrodos para el co-tratamiento de aguas residuales urbanas y aguas de drenaje ácido de mina. Los resultados muestran un consumo máximo de 704.32 mg de los electrodos de Aluminio. Se demostró que la significancia fue de $P < 0.05$ donde existe un efecto de los parámetros de operación sobre la eficiencia de remoción.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda ampliar mejorar la dosificación de ARU y ADAM, para que se conserve la proporción establecida en la prueba de jarras.
- Se recomienda estudiar la eficiencia energética usando como indicador el ión sulfato y el ión de hierro. Estos indicadores influyen significativamente en la calidad de remoción del agua, así también el pH como un indicador de calidad.
- Si bien los electrodos de aluminio desarrollaron un buen experimento, se recomienda hacer cambios en otro tipo de metal como hierro o grafito, esto permitiría mejora la optimización en el tratamiento.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABINANDAN, S., SUBASHCHANDRABOSE, S.R., VENKATESWARLU, K. y MEGHARAJ, M., 2018. Microalgae–bacteria biofilms: a sustainable synergistic approach in remediation of acid mine drainage. *Applied microbiology and biotechnology* [en línea], vol. 102, ISSN 0175-7598. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00253-017-8693-7>.
- ADUVIRE, O., 2006. *Drenaje Ácido de Mina. Generación y Tratamiento*. 2006. S.l.: s.n. ISBN 8450570077.
- AGHAKOUCHAK, A., FELDMAN, D., HOERLING, M., HUXMAN, T. y LUND, J., 2015. Water and climate: Recognize anthropogenic drought. *Nature*, vol. 524, no. 7566, ISSN 0028-0836.
- ALEJO OCHOA, L.R. y SANTOS NAVARRO, G.D., 2021. Efecto de la velocidad de rotación en la eficiencia energética de un oxigenador de agua residual con discos rotativos. ,
- AN, M., HE, W., DEGEFU, D.M., LIAO, Z., ZHANG, Z. y YUAN, L., 2018. Spatial patterns of urban wastewater discharge and treatment plants efficiency in China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 15, no. 9, ISSN 1660-4601.
- ARANGO RUIZ, A., 2011. Electrocoagulación to remove tartrazine from aqueous solutions. *Producción+ Limpia*, vol. 6, no. 2, ISSN 1909-0455.
- ARIAS CHÁVEZ, D., & CANGALAYA SEVILLANO, L. M. (2023). Manual del tesista: Principios para escribir una tesis (1ª ed.). Lima: Fondo Editorial de la Universidad Nacional de Ingeniería (EDUNI).
- BEHAR, D., 2008. *Introducción a la metodología de la investigación. sf: Edición: A*. 2008. S.l.: Rubeira.
- BERMEO MATUTE, N.D. y SALAZAR VALLEJO, F.P., 2013. *Optimización de la planta de tratamiento de aguas residuales Industriales de una empresa Textil*. 2013. S.l.: s.n.
- BERROCAL CCALLASACA, J.I., 2019. *Adsorción de iones de plomo empleando*

- quitosano para el tratamiento de aguas contaminadas de la cuenca baja del Río Chillón* [en línea]. S.I.: Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur. Disponible en: <https://repositorio.untels.edu.pe/jspui/handle/123456789/128>.
- CORDERO FERRERO, J., 2019. Economía circular: El ciclo integral del agua y la eficiencia energética. *Encuentros multidisciplinares*, ISSN 1139-9325.
- DENG, D. y LIN, L.S., 2013. Two-stage combined treatment of acid mine drainage and municipal wastewater. *Water Science and Technology*, vol. 67, no. 5, ISSN 02731223. DOI 10.2166/wst.2013.653.
- FLENSBORG, K.I., 2021. Día Mundial de la Eficiencia Energética: ¿Qué es la eficiencia energética? *Portal Enfoque de Negocios*, vol. 2021,
- GOLDSTEIN, R. y SMITH, W., 2002. *Water & sustainability (volume 4): US electricity consumption for water supply & treatment-the next half century*. S.I.: Electric Power Research Institute.
- HERNÁNDEZ-SAMPIERI, R. y MENDOZA, C., 2018. *Metodología de la investigación. Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. S.I.: McGraw-hill México. ISBN 978-1-4562-6096-5.
- HERNÁNDEZ, R., FERNÁNDEZ, C. y BAPTISTA, P., 2014. *Metodología de la investigación*. S.I.: México: McGraw-Hill. vol. 6.
- IEA, 2022. *World Energy Outlook 2022*. 2022. S.I.: IEA, Paris, France.
- ISLAM, M.M. y HASANUZZAMAN, M., 2020. Chapter 1 - Introduction to energy and sustainable development. En: M.D. HASANUZZAMAN y N.A.B.T.-E. for S.D. RAHIM (eds.). S.I.: Academic Press, pp. 1-18. ISBN 978-0-12-814645-3.
- JIMÉNEZ-RODRÍGUEZ, A.M., DURÁN-BARRANTES, M.M., BORJA, R., SÁNCHEZ, E., COLMENAREJO, M.F. y RAPOSO, F., 2009. Heavy metals removal from acid mine drainage water using biogenic hydrogen sulphide and effluent from anaerobic treatment: Effect of pH. *Journal of Hazardous Materials* [en línea], vol. 165, no. 1-3, ISSN 0304-3894. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.10.053>.

- JOHNSON, D.B., 2003. Chemical and microbiological characteristics of mineral spoils and drainage waters at abandoned coal and metal mines. *Water, Air and Soil Pollution: Focus*, vol. 3, ISSN 1567-7230.
- JOHNSON, K.L. y YOUNGER, P.L., 2006. The co-treatment of sewage and mine waters in aerobic wetlands. *Engineering Geology*, vol. 85, no. 1-2, ISSN 00137952. DOI 10.1016/j.enggeo.2005.09.026.
- JUN, L.Y., KARRI, R.R., YON, L.S., MUBARAK, N.M., BING, C.H., MOHAMMAD, K., JAGADISH, P. y ABDULLAH, E.C., 2020. Modeling and optimization by particle swarm embedded neural network for adsorption of methylene blue by jicama peroxidase immobilized on buckypaper/polyvinyl alcohol membrane. *Environmental research*, vol. 183, ISSN 0013-9351.
- KAYGUSUZ, K., 2021. Energy efficiency and renewable energy sources for industrial sector. *Energy Services Fundamentals and Financing*,
- KEFENI, K.K., MSAGATI, T.A.M. y MAMBA, B.B., 2017. Acid mine drainage: Prevention, treatment options, and resource recovery: A review. *Journal of Cleaner Production*, vol. 151, ISSN 09596526. DOI 10.1016/j.jclepro.2017.03.082.
- KIM, Y., KLING, C.L. y ZHAO, J., 2015. Understanding behavioral explanations of the WTP-WTA divergence through a neoclassical lens: implications for environmental policy. *Annu. Rev. Resour. Econ.*, vol. 7, no. 1, ISSN 1941-1340.
- LLAUCE SIESQUEN, F.D., 2019. Disminución del consumo Energético aplicando una Auditoria Energética en la piladora de arroz San Pedro EIRL-Túcume. ,
- LOMBILLA DEL RÍO, B., 2021. Estudio de la eficiencia energética del edificio de la Escuela Politécnica de Ingeniería de Minas y Energía de Torrelavega realizado con UAV. *Revista Universidad de Cantabria [en línea]*, vol. 1,
- MASINDI, V., FOTEINIS, S. y CHATZISYMEON, E., 2022. Co-treatment of acid mine drainage and municipal wastewater effluents: Emphasis on the fate and partitioning of chemical contaminants. *Journal of Hazardous Materials*, vol. 421, no. June 2021, ISSN 03043894. DOI 10.1016/j.jhazmat.2021.126677.

- MAVHUNGU, A., MASINDI, V., FOTEINIS, S., MBAYA, R., TEKERE, M., KORTIDIS, I. y CHATZISYMEON, E., 2020. Advocating circular economy in wastewater treatment: Struvite formation and drinking water reclamation from real municipal effluents. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 8, no. 4, ISSN 22133437. DOI 10.1016/j.jece.2020.103957.
- MAVHUNGU, A., MBAYA, R., MASINDI, V., FOTEINIS, S., MUEDI, K.L., KORTIDIS, I. y CHATZISYMEON, E., 2019. Wastewater treatment valorisation by simultaneously removing and recovering phosphate and ammonia from municipal effluents using a mechano-thermo activated magnesite technology. *Journal of Environmental Management*, vol. 250, no. September, ISSN 10958630. DOI 10.1016/j.jenvman.2019.109493.
- MAYTA LOVATON, J.Y., 2023. *Análisis del método de electrocoagulación en la eliminación de microplásticos en aguas residuales a nivel de laboratorio* [en línea]. Tesis para optar al título de Ingeniero Ambiental. Perú: Universidad Nacional del Centro del Perú. Disponible en: <http://hdl.handle.net/20.500.12894/10311>.
- MINAM, 2010. *Decreto Supremo N°010-2010-MINAM*. 2010. S.l.: s.n.
- NEPFUMBADA, C., TAVENGWA, N.T., MASINDI, V., FOTEINIS, S. y CHATZISYMEON, E., 2023. Recovery of phosphate from municipal wastewater as calcium phosphate and its subsequent application for the treatment of acid mine drainage. *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 190, ISSN 0921-3449. DOI <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106779>.
- ÑAUPAS PAITÁN, H., MEJÍA ROMÁN, E., TRUJILLO ROMÁN, I. R., ROMERO DELGADO, H. E., MEDINA BÁRCENA, W., & NOVOA RAMÍREZ, E. (2023). *Metodología de la investigación total* (6ª ed.). Bogotá: Ediciones de la U.
- OLADIPO, A.A., MUSTAFA, F.S., EZUGWU, O.N. y GAZI, M., 2022. Efficient removal of antibiotic in single and binary mixture of nickel by electrocoagulation process: Hydrogen generation and cost analysis. *Chemosphere*, vol. 300, ISSN 0045-6535.

- PATTERSON, M.G., 1996. What is energy efficiency?: Concepts, indicators and methodological issues. *Energy policy*, vol. 24, no. 5, ISSN 0301-4215.
- PHILIBERT, C., 2017. Renewable energy for industry. *Paris: International Energy Agency*, vol. 65,
- PULKKA, S., MARTIKAINEN, M., BHATNAGAR, A. y SILLANPÄÄ, M., 2014. Electrochemical methods for the removal of anionic contaminants from water—a review. *Separation and Purification Technology*, vol. 132, ISSN 1383-5866.
- QIN, J., CUI, X., YAN, H., LU, W. y LIN, C., 2019. Active treatment of acidic mine water to minimize environmental impacts in a densely populated downstream area. *Journal of Cleaner Production*, vol. 210, ISSN 09596526. DOI 10.1016/j.jclepro.2018.11.029.
- RAE, 2020. *Diccionario de la lengua española* [en línea]. S.l.: Real academia española Madrid. vol. 22. Disponible en: https://www.academia.edu/download/56359323/Diccionario_de_la_Lengua_Espanola_-_A_Real_Academia_Espanola_v15.2.pdf.
- RODRÍGUEZ VÁSQUEZ, C.M., 2018. *Diseño de planta de tratamiento de aguas ácidas de mina con alto contenido de manganeso y zinc* [en línea]. S.l.: Universidad Nacional de Ingeniería. Disponible en: <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/16395>.
- ROSA BLAS, R.P. y CARRANZA URBINA, J.W., 2015. *Estudio técnico para el tratamiento de aguas ácidas en los drenajes de la industria minera*. S.l.: Universidad Nacional de Trujillo.
- ROUT, P.R., SHAHID, M.K., DASH, R.R., BHUNIA, P., LIU, D., VARJANI, S., ZHANG, T.C. y SURAMPALLI, R.Y., 2021. Nutrient removal from domestic wastewater: A comprehensive review on conventional and advanced technologies. *Journal of Environmental Management*, vol. 296, no. July, ISSN 10958630. DOI 10.1016/j.jenvman.2021.113246.
- RUIHUA, L., LIN, Z., TAO, T. y BO, L., 2011. Phosphorus removal performance of acid mine drainage from wastewater. *Journal of Hazardous Materials* [en

línea], vol. 190, no. 1-3, ISSN 03043894. DOI 10.1016/j.jhazmat.2011.03.097. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.03.097>.

SAHU, J.N., KARRI, R.R., ZABED, H.M., SHAMS, S. y QI, X., 2021. Current perspectives and future prospects of nano-biotechnology in wastewater treatment. *Separation & Purification Reviews*, vol. 50, no. 2, ISSN 1542-2119.

SHOJAEI, Saeed y SHOJAEI, Siroos, 2021. Chapter 23 - Optimization of Process Conditions in Wastewater Degradation Process. En: R.R. KARRI, G. RAVINDRAN y M.H.B.T.-S.C.T. in S.W. and W.M. DEHGHANI (eds.). S.I.: Elsevier, pp. 381-392. ISBN 978-0-12-824463-0.

SKOUSEN, J.G., 2002. A brief overview of control and treatment technologies for acid mine drainage. *Proc. National Meeting of the American Society of Mining and Reclamation, Lexington* [en línea], Disponible en: <https://www.asrs.us/Publications/Conference-Proceedings/2002/0879-Skousen.pdf>.

SONUNE, A. y GHATE, R., 2004. Developments in wastewater treatment methods. *Desalination* [en línea], vol. 167, ISSN 0011-9164. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2004.06.113>.

STROSNIDER, W.H. y NAIRN, R.W., 2010. Effective passive treatment of high-strength acid mine drainage and raw municipal wastewater in Potosí, Bolivia using simple mutual incubations and limestone. *Journal of Geochemical Exploration* [en línea], vol. 105, no. 1-2, ISSN 0375-6742. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2010.02.007>.

WANG, S., WU, X., XU, S., LENG, Q., JIN, D., WANG, P., DONG, F. y WU, D., 2023. Energetic evaluation of phenol wastewater treatment by reverse electrodialysis reactor using different anodes. *Journal of Environmental Management*, vol. 329, ISSN 0301-4797. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.117089>.

XU, L., CAO, G., XU, X., HE, C., WANG, Y., HUANG, Q. y YANG, M., 2018. Sulfite

assisted rotating disc electrocoagulation on cadmium removal: parameter optimization and response surface methodology. *Separation and Purification Technology* [en línea], vol. 195, ISSN 1383-5866. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.12.010>.

YANG, C., NAN, J., YU, H. y LI, J., 2020. Embedded reservoir and constructed wetland for drinking water source protection: Effects on nutrient removal and phytoplankton succession. *Journal of Environmental Sciences (China)*, vol. 87, no. Jianhua Li, ISSN 18787320. DOI 10.1016/j.jes.2019.07.005.

ZODI, S., MERZOUK, B., POTIER, O., LAPICQUE, F. y LECLERC, J.-P., 2013. Direct red 81 dye removal by a continuous flow electrocoagulation/flotation reactor. *Separation and Purification Technology* [en línea], vol. 108, ISSN 1383-5866. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2013.01.052>.

ANEXOS

Anexo 1: Matriz de consistencia

EFICIENCIA ENERGÉTICA MEDIANTE LA OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS DE OPERACIÓN DE UN SISTEMA DE ELECTROCOAGULACIÓN INTERMITENTE PARA EL CO-TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES URBANAS Y AGUAS DE DRENAJE ÁCIDO DE MINA												
PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL	VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIÓN	INDICADORES	INDICE	POBLACIÓN	MUESTRA	MÉTODO	TÉCNICA
¿Cuál será la eficiencia energética obtenida a partir de la optimización de parámetros de operación de un sistema de electrocoagulación intermitente para el co-tratamiento de aguas residuales urbanas y aguas de drenaje ácido de mina?	Evaluar la eficiencia energética mediante la optimización de parámetros de operación de un sistema de electrocoagulación intermitente para el co-tratamiento de aguas residuales urbanas y aguas de drenaje ácido de mina.	La eficiencia energética será alta mediante la optimización de parámetros de operación de un sistema de electrocoagulación intermitente para el co-tratamiento de aguas residuales urbanas y aguas de drenaje ácido de mina.	Independiente: Optimización de parámetros de operación	La optimización de los parámetros de operación se puede dar en función de los diseños experimentales y los resultados de medición (respuestas) o las condiciones bajo las cuales las respuestas múltiples se combinen (Jun et al. 2020).	La optimización de los parámetros de operación del sistema de co-tratamiento estará delimitado por los factores físicos y el tiempo de operación del sistema	Parámetros de operación	Densidad de corriente	A/m ²				
							Relación área de ánodo/volumen del reactor	m ² /m ³				
PROBLEMA ESPECÍFICOS	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	HIPÓTESIS ESPECÍFICOS	VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	INDICE	Combinación del agua residual urbana (ARU) y agua de drenaje ácido de mina (ADAM). La cantidad de volumen de la alícuota fue de 50 L.	Combinación del agua residual urbana (ARU) y agua de drenaje ácido de mina (ADAM). La cantidad de volumen de la alícuota fue de 1 L.	Hipotético - Deductivo	Observación experimental
¿Cuál será el efecto de los parámetros de operación del sistema de electrocoagulación sobre el consumo de energía en el co-tratamiento de aguas residuales urbanas y aguas de drenaje ácido de mina?	Determinar el efecto de los parámetros de operación del sistema de electrocoagulación sobre el consumo de energía en el co-tratamiento de aguas residuales urbanas y aguas de drenaje ácido de mina.	Los parámetros de operación del sistema de electrocoagulación tienen un efecto significativo sobre el consumo de energía en el co-tratamiento de aguas residuales urbanas y aguas de drenaje ácido de mina.		"La eficiencia energética es la parte de la entrada total de energía a la máquina o sistema que se consume en trabajo útil y no se desperdicia como calor inútil o de otra manera. Mide cuánta energía utiliza cualquier sistema o equipo para proporcionar el nivel de rendimiento deseado (Islam y Hasanuzzaman 2020)".	La eficiencia energética se medirá en función del consumo de energía del sistema de co-tratamiento	Consumo de energía	Cantidad de energía por volumen de agua tratada	(kWh/m ³)				
¿Cuál será el efecto de los parámetros de operación del sistema de electrocoagulación sobre la eficiencia de remoción en el co-tratamiento de aguas residuales urbanas y aguas de drenaje ácido de mina?	Determinar el efecto de los parámetros de operación del sistema de electrocoagulación sobre la eficiencia de remoción en el co-tratamiento de aguas residuales urbanas y aguas de drenaje ácido de mina.	Los parámetros de operación del sistema de electrocoagulación tienen un efecto significativo sobre la eficiencia de remoción en el co-tratamiento de aguas residuales urbanas y aguas de drenaje ácido de mina.	Dependiente: Eficiencia energética			Eficiencia de remoción	Cantidad de DQO removido	%				
¿Cuál será el efecto de los parámetros de operación del sistema de electrocoagulación sobre el consumo de electrodos en el co-tratamiento de aguas residuales urbanas y aguas de drenaje ácido de mina?	Determinar el efecto de los parámetros de operación del sistema de electrocoagulación sobre el consumo de electrodos en el co-tratamiento de aguas residuales urbanas y aguas de drenaje ácido de mina.	Los parámetros de operación del sistema de electrocoagulación tienen un efecto significativo sobre el consumo de electrodos en el co-tratamiento de aguas residuales urbanas y aguas de drenaje ácido de mina.				Consumo de electrodos	Cantidad de masa disminuida de electrodos	mg/L				

Anexo 2: Validación de la Ficha de Recolección de Datos

	VALIDACIÓN DE INSTRUMENTO	INSTRUMENTO N° 01
	FICHA DE RECOLECCION DE DATOS	
TÍTULO	*EFICIENCIA ENERGÉTICA MEDIANTE LA OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS DE OPERACIÓN DE UN SISTEMA DE ELECTROCOAGULACIÓN INTERMITENTE PARA EL CO-TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES URBANAS Y AGUAS DE DRENAJE ÁCIDO DE MINA*	
LÍNEA DE INVESTIGACIÓN	Ciencias de la tierra y del ambiente	
FACULTAD	Facultad de Ingeniería ambiental y de recursos naturales	
REALIZADO POR	Edilberto Ronald Melgar Izaguirre, Katherin Liz Quispe Ramos	

FICHA DE RECOLECCIÓN DE DATOS								
Tratamiento	PARAMETROS		Pre-tratamiento	Pos-tratamiento	Eficiencia			
	A.Densidad de corriente	B.relación SV	DQO inicial	DQO final	Consumo de energía	Eficiencia de remoción	Consumo de electrodos	
N°	A/m2	m2/m3	mg/L	mg/L	kWh/m3	%	mg/l	
1	20	20						
2	40	10						
3	20	10						
4	40	10						
5	20	20						
6	30	15						
7	40	20						
8	30	24.31						
9	40	20						
10	11.39	15						
11	40	20						
12	30	15						
13	30	5.69						
14	20	20						
15	20	10						
16	40	10						
17	48.61	15						
18	20	10						



VALIDACION DE INSTRUMENTO DE INVESTIGACION

I. DATOS GENERALES

- 1.1. Apellidos y Nombres: *Carlos Tome Ramos*
- 1.2. Cargo e institución donde labora: *Jefe de Laboratorio UNAC-FIARN*
- 1.3. Especialidad o línea de investigación: *Biología*
- 1.4. Nombre del instrumento motivo de evaluación: *Ficha de recolección de datos*
- 1.5. Autora de Instrumento: *Edilberto Ronald Melgar Izaguirre, Katherin Liz Quispe Ramos*

ASPECTOS DE VALIDACIÓN

CRITERIOS	INDICADORES	INACEPTABLE					MINIMAMENTE ACEPTABLE			ACEPTABLE				
		40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
1. CLARIDAD	Está formulado con lenguaje comprensible.												X	
2. OBJETIVIDAD	Está adecuado a las leyes y principios científicos.												X	
3. ACTUALIDAD	Está adecuado a los objetivos y las necesidades reales de la investigación.												X	
4. ORGANIZACIÓN	Existe una organización lógica.												X	
5. SUFICIENCIA	Toma en cuenta los aspectos metodológicos esenciales												X	
6. INTENCIONALIDAD	Esta adecuado para valorar las variables de la Hipótesis.												X	
7. CONSISTENCIA	Se respalda en fundamentos técnicos y/o científicos.												X	
8. COHERENCIA	Existe coherencia entre los problemas objetivos, hipótesis, variables e indicadores.												X	
9. METODOLOGÍA	La estrategia responde a una metodología y diseño aplicados para lograr probar las hipótesis.												X	
10. PERTINENCIA	El instrumento muestra la relación entre los componentes de la investigación y su adecuación al Método Científico.												X	

II. OPINIÓN DE APLICABILIDAD

- El Instrumento cumple con los Requisitos para su aplicación
- El Instrumento no cumple con Los requisitos para su aplicación

SI

PROMEDIO DE VALORACIÓN

95%

Firma:



VALIDACION DE INSTRUMENTO DE INVESTIGACION

I. DATOS GENERALES

- 1.1. Apellidos y Nombres: *Isla Machica, Matin*
 1.2. Cargo e institución donde labora: *Docente FID en UNLJ*
 1.3. Especialidad o línea de investigación: *Toxicología ambiental*
 1.4. Nombre del instrumento motivo de evaluación: *Ficha de recolección de datos*
 1.5. Autora de Instrumento: *Edilberto Ronald Meigar Izaguirre, Katherin Liz Quispe Ramos*

ASPECTOS DE VALIDACIÓN

CRITERIOS	INDICADORES	INACEPTABLE					MINIMAMENTE ACEPTABLE			ACEPTABLE				
		40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
1. CLARIDAD	Está formulado con lenguaje comprensible.													X
2. OBJETIVIDAD	Está adecuado a las leyes y principios científicos.													X
3. ACTUALIDAD	Está adecuado a los objetivos y las necesidades reales de la investigación.													X
4. ORGANIZACIÓN	Existe una organización lógica.													X
5. SUFICIENCIA	Toma en cuenta los aspectos metodológicos esenciales													X
6. INTENCIONALIDAD	Esta adecuado para valorar las variables de la Hipótesis.													X
7. CONSISTENCIA	Se respalda en fundamentos técnicos y/o científicos.													X
8. COHERENCIA	Existe coherencia entre los problemas objetivos, hipótesis, variables e indicadores.													X
9. METODOLOGÍA	La estrategia responde a una metodología y diseño aplicados para lograr probar las hipótesis.													X
10. PERTINENCIA	El instrumento muestra la relación entre los componentes de la investigación y su adecuación al Método Científico.													X

II. OPINIÓN DE APLICABILIDAD

- El Instrumento cumple con los Requisitos para su aplicación
- El Instrumento no cumple con Los requisitos para su aplicación

Si

PROMEDIO DE VALORACIÓN

100

Firma: *[Handwritten Signature]*



VALIDACION DE INSTRUMENTO DE INVESTIGACION

I. DATOS GENERALES

- 1.1. Apellidos y Nombres: LUIGUI BRAVO TOLEDO
- 1.2. Cargo e institución donde labora: EMERGY GROUP
- 1.3. Especialidad o línea de investigación: INVESTIGADOR DE INGENIERIA AMBIENTAL Y RECURSOS NATURALES
- 1.4. Nombre del instrumento motivo de evaluación: **Ficha de recolección de datos**
- 1.5. Autora de Instrumento: Edilberto Ronald Melgar Izaguirre, Katherin Liz Quispe Ramos

ASPECTOS DE VALIDACIÓN

CRITERIOS	INDICADORES	INACEPTABLE					MINIMAMENTE ACEPTABLE			ACEPTABLE				
		40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
1. CLARIDAD	Está formulado con lenguaje comprensible.													X
2. OBJETIVIDAD	Está adecuado a las leyes y principios científicos.													X
3. ACTUALIDAD	Está adecuado a los objetivos y las necesidades reales de la investigación.													X
4. ORGANIZACIÓN	Existe una organización lógica.													X
5. SUFICIENCIA	Toma en cuenta los aspectos metodológicos esenciales													X
6. INTENCIONALIDAD	Esta adecuado para valorar las variables de la Hipótesis.													X
7. CONSISTENCIA	Se respalda en fundamentos técnicos y/o científicos.													X
8. COHERENCIA	Existe coherencia entre los problemas objetivos, hipótesis, variables e indicadores.													X
9. METODOLOGÍA	La estrategia responde a una metodología y diseño aplicados para lograr probar las hipótesis.													X
10. PERTINENCIA	El instrumento muestra la relación entre los componentes de la investigación y su adecuación al Método Científico.													X

II. OPINIÓN DE APLICABILIDAD

- El Instrumento cumple con los Requisitos para su aplicación
- El Instrumento no cumple con Los requisitos para su aplicación

SI

PROMEDIO DE VALORACIÓN

100%

Firma:

Anexo 3: Caracterización de Agua Residual Urbana



LABORATORIO DE ENSAYO
ACREDITADO POR EL
ORGANISMO DE
ACREDITACION INACAL-DA
CON REGISTRO N° LE - 098



Registro N° LE - 096

INFORME DE ENSAYO N°: IE-21-6417

IV. RESULTADOS

ITEM		1		
CÓDIGO DE LABORATORIO:		M-21-22584		
CÓDIGO DEL CLIENTE:		AB-01		
COORDENADAS:		NO APLICA		
UTM WGS 84:		NO APLICA		
PRODUCTO:		Agua Residual		
SUB PRODUCTO:		Residual Industrial		
INSTRUCTIVO DE MUESTREO:		NO APLICA		
FECHA y HORA DE MUESTREO :		15-06-2021 13:00		
ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS
Conductividad (*)	µS/cm	NA	0,01	2 730,00
Demanda Bioquímica de Oxígeno (*)	mg BOD5/L	0,4	2,0	151,2
Demanda Química de Oxígeno (*)	(mg O2/L)	2,0	5,0	255,5
pH (**)	Unidad de pH	NA	0,01	5,70
Turbidez (*)	NTU	NA	0,01	3,60
Aniones ²				
Nitrato	mg/L	0,02	0,05	20,95
Sulfato	mg/L	0,2	0,5	1 542,8
Metales Totales ICPOES ²				
Fosforo	mg/L	0,01	0,04	0,30
Hierro	mg/L	0,001	0,004	35,793

(*) Los resultados obtenidos corresponde a métodos que han sido acreditados por el INACAL - DA

(**) El Ensayo indicado no ha sido acreditado

² Ensayo acreditado por el IAS

L.C.M.: Límite de cuantificación del método, *"- Menor que el L.C.M.

L.D.M.: Límite de detección del método, *"- Menor que el L.D.M.

*"-: No ensayado

NA: No Aplica

V. OBSERVACIONES

Los resultados se aplican a la muestra cómo se recibió.

"FIN DE DOCUMENTO"

Anexo 4: Caracterización de Agua ácida



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL
ORGANISMO DE ACREDITACION INACAL-DA
CON REGISTRO N° LE-056



Registro N° LE-056

INFORME DE ENSAYO N° 241095 CON VALOR OFICIAL

Razón Social : RONALD MELGAR IZAGUIRRE / KATHERIN QUISPE RAMOS
Domicilio Legal : Av. Diamantes - Manzana R - Lote 1 - San Martín de Porres
Solicitado por : RONALD MELGAR IZAGUIRRE / KATHERIN QUISPE RAMOS
Referencia : Cotización N°0819-24
Proyecto : EFICIENCIA ENERGÉTICA MEDIANTE OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS DE OPERACIÓN DE UN SISTEMA DE ELECTROREGULADOR INTERMITENTE PARA EL CO-TRATAMIENTO DE AGUA (ADAM Y ARU)
Procedencia : LAGUNA QUIULACOCHA / CERRO DE PASCO
Muestreo Realizado por : EL CLIENTE
Cantidad de Muestras : 1
Producto : Agua Natural
Fecha de Recepción : 12/03/2024
Fecha de Ensayo : 12/03/2024 al 22/03/2024
Fecha de Emisión : 22/03/2024

I. Resultados

Código de Laboratorio	241095-01			
Código del Cliente	ADAM-01			
Fecha de Muestreo	11/03/2024			
Hora de Muestreo (h)	08:00			
Ubicación Geográfica (WGS 84)	E:0359452 N:8816584			
Tipo de Producto	Agua Superficial			
Tipo de Ensayo	Unidad	L.D.M.	L.C.M.	Resultados
Laboratorio Instrumental				
Metales Totales				
Aluminio	mg/L	0,0077	0,0084	10,13
Antimonio	mg/L	0,0015	0,0050	<0,0050
Arsénico	mg/L	0,001	0,004	<0,004
Bario	mg/L	0,0004	0,0008	<0,0008
Berilio	mg/L	0,0002	0,0003	<0,0003
Boro	mg/L	0,0012	0,0022	<0,0022
Cadmio	mg/L	0,00005	0,00020	0,28450
Calcio	mg/L	0,0035	0,0050	254,5
Cerio	mg/L	0,0096	0,0224	<0,0224
Cobalto	mg/L	0,0007	0,0018	214,1
Cobre	mg/L	0,0005	0,0012	2,076

Legenda: L.C.M. = Límite de cuantificación del método. L.D.M. = Límite de detección del método. **= Menor que el L.C.M. o L.D.M. indicado.

**INFORME DE ENSAYO N° 241095
CON VALOR OFICIAL**

Código de Laboratorio				241095-01
Código del Cliente				ADAM-01
Fecha de Muestreo				11/03/2024
Hora de Muestreo (h)				08:00
Ubicación Geográfica (WGS 84)				E:0359452 N:8816584
Tipo de Producto				Agua Superficial
Tipo de Ensayo	Unidad	L.D.M.	L.C.M.	Resultados
Cromo	mg/L	0,0023	0,0040	<0,0040
Estaño	mg/L	0,0026	0,0075	<0,0075
Estroncio	mg/L	0,0002	0,0004	0,7513
Fosforo	mg/L	0,0237	0,0420	15,07
Hierro	mg/L	0,0052	0,0064	984,8
Litio	mg/L	0,0006	0,0010	0,1672
Magnesio	mg/L	0,0107	0,0141	465,4
Manganeso	mg/L	0,0004	0,0005	307,2
Molibdeno	mg/L	0,0018	0,0023	<0,0023
Niquel	mg/L	0,0015	0,0027	0,2075
Plata	mg/L	0,0014	0,0027	<0,0027
Plomo	mg/L	0,0004	0,0010	<0,0010
Potasio	mg/L	0,0463	0,0977	<0,0977
Selenio	mg/L	0,001	0,004	<0,004
Silicio	mg/L	0,0051	0,0120	6,136
Sodio	mg/L	0,0074	0,0127	3,719
Talio	mg/L	0,0002	0,0006	<0,0006
Titanio	mg/L	0,0021	0,0026	<0,0026
Vanadio	mg/L	0,0005	0,0007	<0,0007
Zinc	mg/L	0,0009	0,0012	195,8

Nota: L.C.M. = Límite de cuantificación del método, L.D.M. = Límite de detección del método, <= Menor que el L.C.M. o L.D.M. indicado.

II. Métodos y Referencias

Tipo de Ensayo	Norma Referencia	Título
Laboratorio Instrumental		
Metales Totales	EPA Method 200.7 Rev.4.4 1994	Determination of Metals and Trace Elements in Water and Wastes by Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry

EPA: U. S. Environmental Protection Agency, Methods for Chemicals Analysis

III. Observaciones

Los resultados se aplican a la muestra como se recibió.

Firmado

digitalmente por:
Rocio Marcelo
Chumbirayco
Cargo: Director
Técnico
C.Q.P. 1415
Fecha: 2024.05.29
09:28:41 -05'00'



Los resultados presentados corresponden sólo a la muestra indicada, según la cadena de custodia correspondiente. Estos resultados no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas del producto. El tiempo de custodia de la muestra es de un mes calendario desde el ingreso de la muestra al Laboratorio. El tiempo de custodia del informe de ensayo, tanto en digital como en físico es de 4 años. El tiempo de preservación de la muestra está en función a lo declarado en los métodos no realizados de ensayo y desde la toma de muestra. Esta prohibido la reproducción parcial del presente documento, salvo autorización de Envirotest S.A.C. Los resultados se elaboran únicamente con los datos de ensayo, bajo las condiciones de las muestras como se recibieron. Para verificar la autenticidad del presente informe de ensayo solicite información a correo: info@envirotest.com.pe

****FIN DEL INFORME****

Anexo 5: Autorización de uso de Laboratorio FIARN

Solicitud de uso de Laboratorio ▶ Recibidos x ✕ 📎 🔍


katherin quispe <katherin.fiam.19@gmail.com>
para fiam.laboratorio.talleres, fiam.mesa, Ronald ▼ 📧 15:32 (hace 1 hora) ★ 😊 ↩ ⋮

Estimado(a) buen día



Se presenta la regularización de la solicitud de uso de laboratorio para el desarrollo de la tesis "EFICIENCIA ENERGÉTICA MEDIANTE LA OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS DE OPERACIÓN DE UN SISTEMA DE ELECTROCOAGULACIÓN INTERMITENTE PARA EL CO-TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES URBANAS Y AGUAS DE DRENAJE ÁCIDO DE MINA" de los bachilleres BACH. KATHERIN LIZ QUISPE RAMOS, BACH. EDILBERTO RONALD MELGAR IZAGUIRRE y asesor M.Sc. ALEX WYLLY PILCO NUÑEZ.

--

Quedo atenta a cualquier requerimiento. Buen día.
Saludos Cordiales



2 archivos adjuntos • Analizado por Gmail 📎 🔍

Solicitud de uso de Laboratorio ▶ Recibidos x 🔍 📎 🔍

katherin quispe
Estimado(a) buen día Se presenta la regularización de la solicitud de uso de laboratorio para el desarrollo de la tesis "EFICIENCIA ENERGÉTICA MEDIANTE LA OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS DE OPERACIÓN DE UN SISTEMA DE ELECTROCOAGULACIÓN INTERMITENTE PARA EL CO-TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES URBANAS Y AGUAS DE DRENAJE ÁCIDO DE MINA" de los bachilleres BACH. KATHERIN LIZ QUISPE RAMOS, BACH. EDILBERTO RONALD MELGAR IZAGUIRRE y asesor M.Sc. ALEX WYLLY PILCO NUÑEZ. 📧 15:32 (hace 1 hora) ★

katherin quispe
Adjunto dictamen de aprobación de informe de tesis. 📧 15:42 (hace 1 hora) ★

katherin quispe
Adjunto dictamen de aprobación. 📧 16:02 (hace 1 hora) ★

JEFATURA DEL LABORATORIO Y TALLERES, FIARN
para mí ▼ 📧 16:12 (hace 53 minutos) ★ 😊 ↩ ⋮

Buenas tardes estimada Srta. Katherin Q.

Por encargo del Jefe de Laboratorio y Talleres, se da por regularizado el uso de los Laboratorios y Talleres-FIARN.

Saludos.

Atentamente,
Asist.(s) Laboratorios
FIARN-UNAC

Anexo 6: Autorización de uso de agua residual urbana

SOLICITUD DE AGUA RESIDUAL URBANA PARA INVESTIGACIÓN Recibidos

katherin quispe
para wilson, mi

mié, 22 may, 3:41 p.m. ☆ 🗨️ ↶ ⓘ

Estimado **Wilson**, buen día

De acuerdo a lo conversado, adjunto solicitud para la dotación de 500 litros de agua residual urbana para investigación de la tesis EFICIENCIA ENERGÉTICA MEDIANTE LA OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS DE OPERACIÓN DE UN SISTEMA DE ELECTROCOAGULACIÓN INTERMITENTE PARA EL CO-TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES URBANAS Y AGUAS DE DRENAJE ÁCIDO DE MINA de los bachilleres BACH. KATHERIN LIZ QUISPE RAMOS, BACH. EDILBERTO RONALD MELGAR IZAGUIRRE y asesor M.Sc. ALEX WYLLY PILCO NUÑEZ.

Quedo atenta a tu amable respuesta.

Quedo atenta a cualquier requerimiento. Buen día.
Saludos Cordiales

Katherin Liz Quispe Ramos
Bach. Ing. Ambiental y Recursos Naturales
906 - 188 - 888
katherinliz@gmail.com
Conosq, Lima, Perú

Un archivo adjunto • Analizado por Gmail

Wilson Robles Kqueraro <wrobles@flowen.com.pe>
para katherin, mi

mié, 29 may, 5:20 a.m. (hace 8 días) ☆ 🗨️ ↶ ⓘ

Hola Katherin.
Confirme la cantidad solicitada de aguas residuales.

Saludos cordiales.

FLOWEN

Wilson Robles Kqueere
Jefe de Operación y Mantenimiento de PTARs | Flowen
Email: wrobles@flowen.com.pe | T: (01) 682 1967 | F: (+51) 986821246
Ca. Huaca de la Luna 408, Urb. Portada del sol, La Molina - Lima
Web: <https://flowen.com.pe/>
Linkedin: www.linkedin.com/in/wilson-robles-kqueraro

Anexo 7: Panel Fotográfico



Previo al uso de equipos, análisis de aguas, se realizó la inspección del sistema de electrocoagulación intermitente con el fin de detectar áreas que requieran mantenimiento para dejar operativo el sistema.



Prueba de jarras, para identificar dosis óptima de relación de ARU y ADAM. Realizado en el Laboratorio de la FIARN, 5to piso.



Análisis de pH de la muestra de dosis optima de ARU y ADAM. Prueba de jarras, para identificar dosis optima de relación de ARU y ADAM. Realizado en el Laboratorio de la FIARN, 5to piso.



Preparación de agua co-tratada para análisis preliminares del sistema. Realizado en el Laboratorio de la FIARN, 5to piso.



Q

Se realizó el aforo del agua residual urbana y del agua de drenaje ácido de mina, con el fin de que, al abrir la llave de paso, estas aguas corrieran en la misma proporción,



Se realizó el ajuste de las RPM del agitador, para que el agua co-tratada se mantenga en movimiento y los electrodos puedan captar una mayor cantidad de metales



Se realizo el ajuste de la cantidad de energía que ingresaba al sistema con un estabilizador de corriente. En la tesis se varió la cantidad de energía que se ingresaba al sistema.



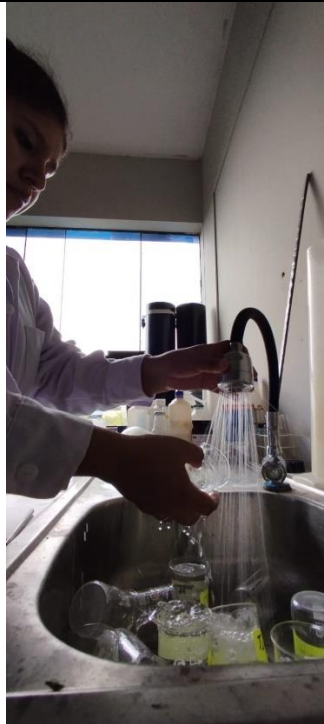
Una vez realizado el tratamiento o prueba se procedía a desinstalar el electrocoagulador para retirar los electrodos de aluminio, lo que serían pesados. Asimismo, luego se procedía a una limpieza para eliminar la espuma generada por el tratamiento.



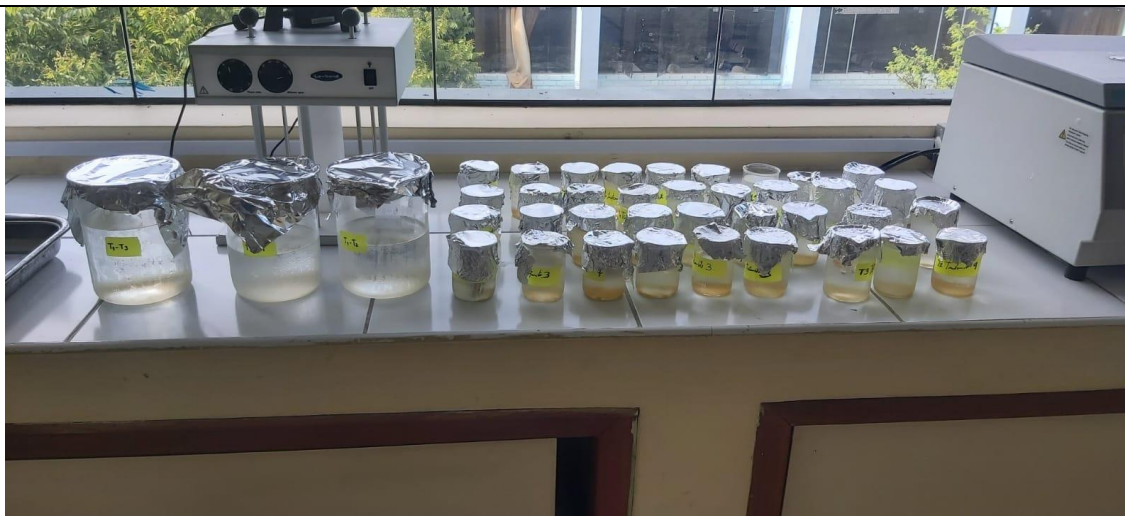
Luego del tratamiento se procede a la limpieza del electrocoagulador.



Cada vez que se realizaba un tratamiento se procedía a tomar el peso final del tubo electrodo con el fin de calcular el cambio de masa.



Una vez concluida todas las pruebas se procede a realizar la limpieza de los materiales utilizados.



Se tomo 4 muestras por cada tratamiento, a las que se analizó la concentración de DQO.
