



FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de Ingeniería Ambiental

“REDUCCIÓN DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO DE LAS
AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DE LAVADORAS
MEDIANTE EL MÉTODO DE ELECTROCOAGULACIÓN CON
ELECTRODOS DE ALUMINIO Y ACERO INOXIDABLE EN EL
DISTRITO DE SAN JUAN DE LURIGANCHO EN EL AÑO 2023 “.

Tesis para optar el título profesional de:

Ingeniera Ambiental

Autor:

Maria Belen Vera Solis

Asesor:

Mg. Ing. Margeo Javier Chumán López

<https://orcid.org/0000-0002-4038-7591>

Lima - Perú

2023

JURADO EVALUADOR

Jurado 1	Carlos Alberto Alva Huapaya	06672420
Presidente(a)	Nombre y Apellidos	Nº DNI

Jurado 2	Wilberto Effio Quezada	42298402
	Nombre y Apellidos	Nº DNI

Jurado 3	Elifio Gustavo Castillo Gomero	07594283
	Nombre y Apellidos	Nº DNI

Reducción de la Demanda Química de Oxígeno de las aguas residuales provenientes de lavadoras mediante el método de electrocoagulación con electrodos de aluminio y acero inoxidable en el distrito de San Juan de Lurigancho en el año 2023.

INFORME DE SIMILITUD

Tesis 2

ORIGINALITY REPORT

19%	19%	17%	7%
SIMILARITY INDEX	INTERNET SOURCES	PUBLICATIONS	STUDENT PAPERS

PRIMARY SOURCES

1	repositorio.upn.edu.pe Internet Source	7%
2	repositorio.unh.edu.pe Internet Source	7%
3	hdl.handle.net Internet Source	5%

DEDICATORIA

A Dios por brindarme la confianza y la fuerza de voluntad para concluir mi trabajo de investigación; asimismo, por guiar mis pasos hasta alcanzar la meta anhelada.

A mis padres, por su amor incondicional y por creer en mí desde el primer día. Por sus sacrificios y su apoyo constante que han sido clave de mi éxito.

A todos aquellos que han sido una parte integral de mi trayectoria académico y personal.

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, te agradezco a ti Dios por ayudarme a terminar este proyecto, gracias por darme el valor y la fuerza para poder hacer de este sueño realidad.

A mis padres Cipriano y Pilar quienes, con su amor, y esfuerzo me han permitido llegar a cumplir hoy un sueño más, gracias por inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo y constancia de no temer las adversidades.

De manera especial a los docentes de la carrera de Ingeniería Ambiental, por la formación educativa, ética y moral brindada desde mi incorporación en la carrera de Ingeniería Ambiental, así mismo, a los especialistas por su aporte de sus conocimientos brindados para el desarrollo de la investigación.

Finalmente quiero dedicar esta tesis a todas mis amistades, por apoyarme cuando más lo necesitaba, ya que cada granito fue de mucha ayuda en esta investigación.

ÍNDICE

JURADO EVALUADOR	2
INFORME DE SIMILITUD.....	3
DEDICATORIA	4
AGRADECIMIENTO	5
ÍNDICE	6
ÍNDICE DE TABLAS	8
ÍNDICE DE FIGURAS.....	9
RESUMEN	10
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	11
1.1. Realidad problemática.....	11
1.2. Antecedentes.....	12
1.3. Bases teóricas	20
1.4. Formulación del problema.....	25
1.5. Objetivos.....	25
1.6. Hipótesis.....	26
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA	28
2.1. Tipo de investigación.....	28
2.2. Población y muestra.....	28
2.3. Unidad de análisis	30
2.4. Tipo de muestreo.....	30
2.5. Diseño de investigación	30
2.6. Materiales, instrumentos y métodos.....	31
2.7. Técnicas	34
2.8. Validez y confiabilidad de datos	35
2.9. Procedimiento.....	35
CAPÍTULO III. RESULTADOS.....	43
3.1. Caracterización del efluente.....	43
3.2. Resultados descriptivos	44
3.3. Resultados Inferenciales	55
CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....	61
4.1. Discusión	61
4.2. Conclusiones	63
4.3. Recomendaciones.....	64



Reducción de la Demanda Química de Oxígeno de las aguas residuales provenientes de lavadoras mediante el método de electrocoagulación con electrodos de aluminio y acero inoxidable en el distrito de San Juan de Lurigancho en el año 2023.

REFERENCIAS	65
ANEXOS	67

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Equipos y metodología empleador por SQA laboratorio.	33
Tabla 2 Validación de instrumentos.	35
Tabla 3 VMA para descargas al sistema de alcantarillado D.S. N° 010-2019-VIVIENDA	38
Tabla 4 Condiciones de operación.....	41
Tabla 5 Especificaciones de los tratamientos.	42
Tabla 6 Caracterización inicial del efluente de aguas residuales procedente de lavadora. .	43
Tabla 7 Base de datos analizados aguas residuales.	44
Tabla 8 Promedio de medición de la DQO.....	45
Tabla 9 Estadística descriptiva de los datos de los tratamientos.	46
Tabla 10 Promedio de medición de pH.	48
Tabla 11 Promedio de medición de la conductividad.....	49
Tabla 12 Promedio de medición de la turbiedad.	51
Tabla 13 Promedio de medición de los SST.....	52
Tabla 14 Promedio de medición de color.	54
Tabla 15 Análisis de varianza ANOVA.	57
Tabla 16 Resumen de las estadísticas de Bondad.....	58
Tabla 17 Matriz de consistencia	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Instalación de los electrodos de aluminio y acero inoxidable de una celda de electrocoagulación.....	36
Figura 2 Proceso de electrocoagulación con formación de gases y sedimentación.	37
Figura 3 Resultados obtenidos caracterización inicial de agua residual de lavadora.....	43
Figura 4 Gráfica de dispersión de la DQO.	46
Figura 5 Gráfica de de caja de remoción de la DQO.....	47
Figura 6 Gráfica de dispersión del pH.....	48
Figura 7 Gráfica de dispersión de la conductividad.	50
Figura 8 Gráfica de dispersión de la turbiedad.....	51
Figura 9 Gráfica de dispersión de los SST.	53
Figura 10 Gráfica de dispersión de color.....	54
Figura 11 Gráfica de probabilidad normal de residuos.	56
Figura 12 Diagrama de Pareto.	58
Figura 13 Gráfica de efectos principales para la remoción de la DQO.....	60

RESUMEN

Las aguas residuales no tratadas causan efectos negativos en el medio ambiente y en la salud de las personas; en esta presente investigación tiene como objetivo reducir las concentraciones DQO mediante de las aguas residuales provenientes de lavadoras mediante el método de electrocoagulación con electrodos de aluminio y acero inoxidable como una alternativa en los procesos químicos convencionales. Para lograr esta reducción se determinó las condiciones óptimas de operación en una celda de electrocoagulación de las cuales fueron: intensidad de corriente y distancia entre electrodos y la variable constante el tiempo en un rango de 15 minutos en esta investigación a fin de evaluar la mejor condición de operación para ello; se realizó 6 tratamientos con 2 repeticiones por cada tratamiento, se recolecto 24 litros de agua residual proveniente de lavadoras por ende, se caracterizaron las condiciones iniciales y post- tratamiento. Los resultados arrojaron que las concentraciones de la caracterización inicial de las aguas residuales fueron: pH de 7.26; Conductividad eléctrica de 1225 $\mu\text{S}/\text{cm}$; DQO de 705.30 mg/L; Turbidez de 206 NTU; Solidos Totales Suspendidos de 195 mg/L y color de 1095 Pt-Co. Después del tratamiento más eficiente se llegó a una máxima reducción de la DQO con el tratamiento con el T-05 del 63.94% las condiciones óptimas de las variables de operación a una intensidad de 4 Amperios, distancia de electrodos de 0.8 mm a un tiempo de retención de 15 min.

Palabras clave: Aguas residuales de lavadoras, electrocoagulación, DQO, electrodos de aluminio y acero inoxidable.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad problemática

El agua es un recurso vital e insustituible esencial, para la vida, la sociedad y la economía, y como tal un derecho humano; sin embargo, mencionó que el mal uso actual de este recurso ha llevado a la escasez de recursos, que incluyen el crecimiento de la población, la contaminación del agua y su uso inadecuado (Organización de las Naciones Unidas, 2021). Por lo tanto, se deben realizar diversos procesos de tratamiento, así como la contaminación de los recursos hídricos.

La degradación de la calidad del agua es un problema grande y creciente, se considera uno de los mayores problema ambientales, la causa principal son las aguas residuales urbanas e industriales sin control, muchas veces sin tratar, y las malas prácticas agrícolas que afectan al medio ambiente. (Fernández, 2012),

El deterioro de la calidad del agua es un gran problema que va en aumento, y es considerado uno de los principales problemas ambientales las principales causas, tanto para el agua dulce como la salada, son los vertidos incontrolados de las aguas residuales urbanas e industriales, muchas veces sin tratamiento, así como las prácticas agrícolas deficientes causando así impactos ambientales.

En el empleo de artículos en el hogar como las lavadoras, en nuestros tiempos es de la vida cotidiana, donde poseen cada familia y la utilización del agua por lavado está entre los 42 a 62 litros de agua (una lavadora de 7 kilos de ropa, no obstante, el uso de las lavadoras es esencial debido a su rapidez y menor tiempo, son empleados para lavar en abundancia, las ropas de cada familia que son como conocidas como lavadoras domésticas, pero el inconveniente es el uso excesivo del agua. (La casa del electrodoméstico, 2021)

Hoy en día las diversas industrias de tratamientos de aguas residuales utilizan métodos que están basados en tecnologías convencionales como los tratamientos químicos y biológicos. Los tratamientos químicos utilizan coagulantes primarios como el sulfato de aluminio, sales de hierro y polímeros sintéticos los cuales pueden ser contaminados durante su proceso de fabricación con monómeros u otras sustancias tóxicas.

Ante esta problemática, la electrocoagulación es una nueva tecnología que se propone alternativa para el tratamiento de aguas residuales por su gran, efectividad para remover contaminantes disueltos en suspensión en el agua. La tecnología mencionada consiste en las placas metálicas de hierro y aluminio paralelas más utilizadas, las cuales provocan una reacción química que desestabiliza la contaminación, tal como se describe. (Arango, 2005)

Este estudio analiza el proceso del método de electrocoagulación utilizando los electrodos de aluminio (Al) y acero inoxidable, con la finalidad de eliminar la Demanda Química de Oxígeno que se convierte en un contaminante en el agua de las lavadoras, a través de algunos tratamientos experimentales, para evaluar las condiciones óptimas, de acuerdo al D.S. N° 010-2019-VIVIENDA.-Valores Máximos Admisibles.

1.2. Antecedentes

1.2.1. Antecedentes internacionales

Según Villabona et al. (2021), indica que la contaminación del agua por el vertimiento de aguas residuales contaminadas con cromo hexavalente es un problema ambiental ampliamente estudiado por los efectos tóxicos en la salud humana y el medio ambiente. El objetivo de este trabajo fue investigar la eliminación de cromo hexavalente por electrocoagulación utilizando electrodos de hierro y aluminio en

configuración monopolar. Los efectos del tiempo de residencia, el voltaje y el número de electrodos sobre la eficiencia de eliminación se evaluaron mediante el siguiente método: el experimento se realizó en una celda de electrocoagulación por lotes de 3 L con 10 y 6 placas de aluminio y electrodos de acero inoxidable, respectivamente conectado a 1.5 cm en configuración unipolar, en paralelo con la fuente de alimentación. Las soluciones contaminadas con Cr (VI) se trataron a una concentración de 50 mg/L y se evaluaron dos niveles de tiempo de residencia (20 y 30 min), voltaje (20 y 30 V) y número de electrodos (6 y 10 electrodos). Las tasas de eliminación resultantes oscilaron entre 60.15 y 92.9%. La variable que tuvo mayor efecto positivo en el proceso fue el aumento del tiempo de retención. Se puede concluir que la electrocoagulación funciona mejor a voltajes más bajos y tiempos de residencia más prolongados, y que el efecto combinado de aumentar el número de electrodos y el tiempo de contacto aumenta la productividad del proceso, lo que resulta en una mayor remoción.

De acuerdo a los autores Olmos y Moncaleano (2021), la industria textil es la segunda industria más contaminante del mundo, la cantidad de agua utilizada en el proceso de teñido de fibras naturales o sintéticas supera los 200 litros/kg de producto procesado, por lo que se deben investigar tecnologías adecuadas que aseguren el tratamiento y reutilización de estas aguas residuales. Para determinar la eficiencia de la electrocoagulación en aguas residuales textiles utilizaron aluminio como electrodo de sacrificio, se realizaron un diseño de cuadrado latino 3x3x3 con la intensidad de corriente (I), el tiempo (t) y el tiempo como variables experimentales. Área o superficie de contacto y variables de respuesta conductividad, turbidez, pH y DQO. Se encontró que la variable experimental era directamente proporcional al pH

e inversamente relacionada con otras variables de respuesta. La eficiencia de eliminación de contaminantes también fue más alta con un tiempo de retención de 30 min, 5 A y 600 cm², con una turbidez del 97.94 % y una eliminación de DQO del 88.67 %. El tratamiento de aguas residuales de la industria textil mediante celdas de electrocoagulación, además de la normativa nacional vigente sobre descargas de aguas superficiales (Resolución N° 631 de 2015), también cumple con la Resolución N° 631 de 2015 de características para la reutilización industrial.

1.2.2. Antecedentes nacionales

Según Cuba (2020), afirmó que la electrocoagulación (EC) ha recibido una atención creciente en los últimos años para eliminar diversos contaminantes que se encuentran en diversas aguas residuales. Este trabajo examinó la posibilidad de utilizar la tecnología de electrocoagulación como alternativa a los procesos químicos tradicionales para tratar el agua residual de las lavadoras para su reutilización en el riego de hortalizas. Se analizaron cuatro factores: intensidad, tiempo, distancia y pH; cada factor tenía tres niveles. Con el fin de mejorar el proceso de electrocoagulación en términos de factores de diseño, los experimentos se diseñaron según el método de Taguchi. Realizó un análisis de varianza (ANOVA) para ver el efecto de las variables en la eliminación de la turbidez y otros parámetros fisicoquímicos. A diferencia de otros parámetros, los parámetros que más inciden en la eliminación de los resultados de turbidez son el tiempo y la intensidad. Cuando la intensidad es de 5 amperios, el tiempo es de 15 minutos, la distancia es de 2 cm y el valor de pH es de 7.5, los resultados de optimización del factor se logran con una alta tasa de eliminación de parámetros físicos y químicos, y la tasa de eliminación de turbidez es 99.02%. la tasa de eliminación química es del 90.83%, y

el consumo de oxígeno y el 95.93% del volumen total de aguas residuales suspendidas es inferior al D.S. el valor especificado. N° 004-2017-MINAM Categoría 3: riego de hortalizas y agua potable para animales (norma de calidad ambiental) y D.S. N° 021-2009 BOLIG (valor máximo permitido) para riego de hortalizas.

Conforme a los autores Acuña y Pujaico (2019), realizaron una investigación demuestra la efectividad de una nueva tecnología para la reducción de contaminantes de las aguas residuales domésticas causadas por las actividades diarias del ser humano, esta nueva tecnología es la electrocoagulación. Dicha investigación se plantearon reducir la demanda química de oxígeno (DQO) de las aguas residuales domésticas provenientes del EBAR N° 085, ubicada en el sector II de Lurín, para lograr esta reducción para lo cual; se determinó las condiciones óptimas de operación en una celda de electrocoagulación mediante la variación del pH, intensidad de corriente y tiempo de reacción como resultado positivo, se obtuvieron los siguientes resultados de porcentaje de reducción de 63.3%. Este valor óptimo de operación se obtuvo con un medio ácido del efluente con valor de 5.60, intensidad de corriente de 5,0 amperios y un tiempo de reacción de 42 minutos, con lo cual se cumple según indica los límites máximos permisibles para los efluentes de la normativa del decreto supremo N° 003-2010-MINAM vigente en el territorio peruano.

Según Vasquez (2020), sostiene en su investigación tiene como objetivo evaluar el Sistema de Electrocoagulación a nivel de laboratorio con electrodos de aluminio y hierro para la reducción de la concentración de los parámetros fisicoquímicos de las aguas residuales del camal SAGEISA que permita su

acondicionamiento antes de su disposición final. Se consideró una población de 1.36 m³ /h y una muestra 3 litros por tratamiento. El diseño de la investigación que empleo fue cuasi experimental del tipo aplicada con un enfoque cuantitativo de alcance explicativo. El sistema que empleó electrodos de aluminio y fierro para las reacciones de reducción (cátodo) y oxidación (ánodo) con un suministro de voltaje de 20 y 30 voltios (V), con una concentración de Cloruro de Sodio (NaCl) de 10 y 15 g/L y tiempo de retención de 15 y 30 minutos. Se determinaron al T6 como el tratamiento óptimo con una reducción en demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) de 97.20%, sólidos suspendidos totales (SST) de 94.55% y un 97.00 % de demanda química de oxígeno (DQO) bajo el empleo de 30 V, 15 g/L de NaCl y un tiempo de 30 minutos. Finalmente se concluyó que los valores obtenidos se encuentran dentro de los rangos expuestos en investigaciones sobre el tema en evaluación.

De acuerdo a Rea (2016), en la tesis de investigación “Reducción de la demanda química (DQO) de las aguas residuales industriales de las balsas de tratamiento de una planta de disposición final de residuos aplicando electrocoagulación con electrodos de Fe/Al₂” explicaron que el efluente industrial tratado procede de las balsas de tratamiento de una planta de disposición final de residuos. Su principal contaminante es la demanda química de oxígeno. Para su tratamiento se aplicó la técnica electroquímica de Electrocoagulación (EC). Se determinó la factibilidad y el grado de reducción de la DQO. No se encontró estudios relacionados de esta técnica sobre efluentes industriales en el Perú. Los resultados obtenidos, indican que si es posible aplicar la técnica de EC a efluentes contaminados con una alta carga de DQO y llevarlos a concentraciones por debajo de la mitad; promoviendo de esta manera una producción limpia con cuidado del medio ambiente.

Se evaluó la remoción en un sistema por lotes y en un sistema continuo, para diferentes densidades de corriente con electrodos de hierro y aluminio por separado. La misma concluyó, que la mejor reducción de la DQO con el menor consumo de energía y hierro se obtuvo para un sistema de flujo continuo de 0.75 L/min y 1.2 A/dm², con una reducción de más del 57.7% de la DQO. Se concluye que el sistema de EC se puede aplicar como una técnica complementaria al tratamiento que se desarrolla en planta de disposición final de residuos, minimizando el impacto ambiental de estos efluentes cuando sean reutilizados en las operaciones dentro de planta. Los ensayos de las muestras obtenidas se realizaron aplicando métodos estandarizados tanto en el laboratorio de planta como en un laboratorio externo. La formación de flóculos generó dos tipos de residuos, una flotante, que puede ser separado por la parte superior de la celda electrolítica de manera mecánica y un residuo pesado, parte del cual sale con el flujo y otra es acumulada y drenada por el fondo del reactor electroquímico.

De acuerdo Cangalaya y Nuñez (2019), a un voltaje de 15 voltios reduce la DQO de 455.4 mg/L a 80.2 mg/L DQO, mientras que a 25 voltios reduce a DQO 41.1 mg/L, se determinó que, a mayor tensión de corriente, mayor reducción de la DQO, a partir de lo cual se estimó igualmente el tiempo de exposición, por lo que la mayor carga orgánica disminuyó en los primeros 30 minutos y alcanzó los 234 mg/L, 90.8 mg/L, 184.4 mg/L y 36.8 mg/L. Los valores de DQO en los diferentes tratamientos alcanzaron valores de DQO de 208.1 mg/L, 74.4 mg/L, 151.1 mg/L y 36.8 mg/L a los 40 min, respectivamente, y la DQO disminuyó en los siguientes 10 min. El último parámetro en el diseño es la distancia entre electrodos, que es uno de los factores más influyentes en la reducción de

materia orgánica. Cuando el espacio entre electrodos es de 5 mm, la tasa de eliminación de DQO más baja es del 80.06 %, la más alta es de 91, la DQO es del 93 % y para un espacio de 15 mm, la tasa de eliminación de DQO más baja es del 48.61% y la más alta del 66.84%, por lo que se confirmó que, a mayor distancia entre electrodos, mayor tasa de eliminación de DQO. El Tratamiento Óptimo del Agua del Canal de Riego (CIMIRM) se caracterizó por electrocoagulación y se comparó con la caracterización de línea de base, produciendo materia orgánica asociada con DQO y DBO que van desde 461,7 mg/L y 239 mg/L hasta 32.8 mg/L y 9.9 mg/L, por debajo de los estándares de calidad del riego definidos en el Decreto Supremo n. 004-2017-MINAM, que especifica DQO de 50 mg/L y demanda bioquímica de oxígeno de 10 mg/L.

De acuerdo al autor Gerra (2022), en su tesis de investigación, “Electrocoagulación de efluentes con colorantes sintéticos de industria textil para la disminución de la Demanda Química”. Tuvo como objetivo principal evaluar la reducción del consumo de oxígeno químico (DQO) en las aguas residuales de los tintes sintéticos de la industria textil con ayuda de la electrocoagulación, el procedimiento estaba conformado en varias combinaciones El voltaje y el tiempo de acuerdo al factor 2k con puntos centrales. en tratamiento. En el tratamiento estadístico se utilizó el ANOVA y superficie de respuesta Comportamiento de reducción de DQO (%) vs. tensión y tiempo Electrocoagulación (CE). Los resultados arrojaron una reducción máxima del 95% Demanda química de oxígeno (DQO) Tratamiento de aguas residuales de tintes sintéticos EC-11 en 20 minutos y 10 V con muestras limpias y 87%. En el tratamiento EC10, la reducción de DQO estuvo asociada con un 75% v/v de efluente disuelto a los 20 minutos y 10 voltios; esto

indica. Se concluyó que el uso de la electrocoagulación en el tratamiento de aguas residuales es muy eficaz Tintes sintéticos.

Por otro Rojas (2022), en el tratamiento de aguas residuales de lavadoras tuvo como objetivo principal evaluar el efecto de la electrocoagulación en el tratamiento de aguas. La unidad de estudio fue en la ciudad de Huancavelica .El diseño que emplearon: fue de tipo aplicada, nivel explicativo, el método de investigación fue científico, diseño pretest y postest con un solo grupo, la técnica fue la observación experimental y el instrumento utilizado fue la ficha de registro de datos, la población fue las aguas residuales de las lavanderías ASOCIACION TAKSANA WASI y RAYSA NALINY QUISPALAYA ENRIQUEZ de la ciudad de Huancavelica, la muestra se conformó por 3 litros de agua residual por tratamiento por cada lavandería, en donde el muestreo fue muestreo no probabilístico (no aleatoria) de tipo intencional, según los resultados el tiempo de retención y la intensidad de corriente en la cámara de electrocoagulación influyen significativamente en la reducción de la demanda química de oxígeno, teniendo un valor inicial de DQO de 1308.00 mg/l y se redujo hasta 366.50 mg/l en la lavandería 1 mientras que en la lavandería 2 se obtuvo un valor inicial de DQO de 1333.50 mg/l reduciendo hasta 348.50 mg/l cumpliendo con los VMA acorde al Decreto Supremo N° 010-2019-VIVIENDA establecido . En los parámetros pH y temperatura las variables tiempo de retención e intensidad de corriente no tienen un nivel de significancia relevante.

1.3. Bases teóricas

1.3.1. Aguas residuales

“Son cuyas aguas cuyas propiedades originales han sido alteradas por la actividad humana y que, por su calidad, debe ser pre-tratada antes de ser utilizada, vertida a cuerpos de agua naturales o sistemas de alcantarillado” (Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental, 2014).

1.3.2. Demanda Química de Oxígeno

“Es la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar la materia orgánica por medios químicos y convertirla en CO₂ y H₂O. Cuanto mayor es la DQO, más contaminada está el agua” (INDINUALISIS Laboratorio Ambiental, 2019).

La DQO se ha convertido en un parámetro utilizado habitualmente en el análisis de la calidad de las aguas residuales en el día a día. Se utiliza para la planificación en las depuradoras de tratamiento de aguas residuales, para el control de la eficacia de los sistemas de descontaminación de las aguas y para el establecimiento de las facturas relativas a las aguas residuales.

1.3.3. Proceso de electrocoagulación

La electrocoagulación es un método de eliminación eléctrica de contaminantes agua disuelta suspendida o emulsionado dicha técnica consiste en la inducción de la corriente de aguas residuales pasa a través de placas metálicas paralelas de diferentes materiales, siendo los más comunes el hierro y el aluminio. (Arango Ruiz, 2005)

En el proceso de la electrocoagulación, el coagulante se genera in situ por disolución Iones de aluminio o hierro de los electrodos aluminio o hierro respectivamente por una generación, los iones metálicos se producen en el ánodo y el cátodo emite burbujas de hidrogeno gas para ayudar en la flotación de partículas, las mismas que son eliminadas. En adición, la electrocoagulación se utiliza para eliminar contaminantes de varios tipos de agua, por ejemplo: industria de pieles, aguas residuales que contengan cromo, plomo o mercurio. Finalmente, lavanderías y textiles para la eliminación de contaminantes. (Arango Ruiz, 2005)

El lado positivo sufre reacciones anódicas, mientras que el negativo sufre reacciones catódicas. las placas de metal, tales como hierro o aluminio son utilizadas como electrodo de sacrificio o placa consumible que aporta iones al sistema. Estos iones liberados neutralizan las cargas de las partículas desestabilizando los sistemas de suspensión de los contaminantes dando inicio a la coagulación. (Andaluz, 2016)

Los iones liberados remueven cualquier contaminante, bien sea por reacción química y precipitación o agregando materiales coloidales que bien pueden flotar o precipitarse. Además, como el agua contiene partículas coloidales, aceites u otros contaminantes, éstos se mueven a través del campo eléctrico aplicado y pueden ionizarse, sufrir reacciones de electrólisis o de hidrólisis o formar radicales libres que alteran las propiedades físicas y químicas del agua y de los contaminantes, resultando en un estado reactivo y excitado lo cual es causa de la liberación, destrucción o insolubilidad de los contaminantes. Para aumentar la eficiencia de remoción de los iones indeseables, se puede hacer pasar el agua residual a través de una serie de celdas que tienen electrodos compuestos de varios metales. Los parámetros como pH,

conductividad y potencial de óxido-reducción deben ser ajustados de acuerdo con el tipo de contaminante. (Morales, 2021)

1.3.4. Factores que afectan el proceso de Electrocoagulación

Existen muchos factores que intervienen en el proceso de electrocoagulación, entre los más importantes podemos indicar: pH, intensidad de corriente, conductividad y temperatura, de los cuales depende en mucha medida la eficiencia del tratamiento:

a) Intensidad de corriente:

Al aumentar la corriente eléctrica para el tratamiento de electrocoagulación, esto hace que también se eleve el consumo de energía eléctrica. Muchos de los proyectos presentados sustentan que, el consumo de energía es proporcional cuando nos encontramos frente a un medio acuoso con una conductividad eléctrica elevada. La principal función del suministro de corriente eléctrica al proceso electroquímico es que va a determinar la dosis de iones Al^{+3} así como también iones de hierro Fe^{+2} , ya que en el proceso van a ser liberados por los electrodos. (Cueva & Pereda, 2020)

b) Distancia entre electrodos:

La distancia entre los electrodos es un factor que afecta al proceso de electrocoagulación, porque que a una distancia mínima se produzca una colisión entre los grumos formados por hidróxido y contaminantes, debido a la alta atracción electrostática y cuanto mayor sea la distancia entre electrodo, hay una caída en la gota electrostática resultando en un movimiento más lento de los iones producidos. (Chen, Chen, & Yue, 2002)

d) Tiempo:

Otro factor que se considera importante para el proceso de electrocoagulación es el tiempo en donde de acuerdo a la práctica se muestra que, mientras más sea el tiempo se tendrá gran cantidad de sólidos formados, así como también una elevada liberación de gases, por la cual dichos gases van arrastrando en forma de espuma partículas de sólidos donde favorece el crecimiento de flóculos. (Cueva & Pereda, 2020).

1.3.5. Reacciones presentes en el proceso de Electrocoagulación

a) Fase de coagulación:

Consiste en la formación de partículas suspendidas de mayor tamaño a partir de las micropartículas desestabilizadas.

Fase de floculación: consiste en el fenómeno de adsorción de pequeños flóculos presentes dentro de la solución, formando en la fase de coagulación. Esta fase da lugar a la formación de partículas con un mayor tamaño.

b) Fase de flotación/sedimentación:

Los gases liberados en el cátodo y en el ánodo (oxígeno e hidrogeno respectivamente) promueven la aglomeración y migración a la superficie de los flóculos de baja densidad.

1.3.6. Ventajas y desventajas de la electrocoagulación

Según los trabajos de Arango (2005), la electrocoagulación tiene las siguientes ventajas:

a) Ventajas:

- Requiere de equipos simples y fáciles de operar, con la suficiente libertad operacional para manejar los problemas encontrados en su funcionamiento.
- Puede generar aguas potables, incoloras e inodoras.
- Elimina requerimientos de almacenamiento y uso de productos químicos.
- Genera lodos más compactos y en menor cantidad, que involucra menor problemática de disposición de estos lodos.
- Los flóculos formados por la electrocoagulación son similares a los producidos químicamente, pero más grandes, contienen menos agua ligada, son antiácidos y más estables y pueden ser separados rápidamente por filtración.
- Ausencia de magnesio en los lodos por la no utilización de éste en el proceso.
- Alta efectividad en la remoción de un amplio rango de contaminantes.
- Reduce la contaminación en los cuerpos de agua.

b) Desventajas:

Para Arango (2005), las desventajas en el proceso de la electrocoagulación son las siguientes:

- Reposición de los electrodos de sacrificio.
- Los lodos contienen altas concentraciones de hierro y aluminio, dependiendo del material del electrodo utilizado.
- No es efectivo en la remoción de DBO soluble, proveniente de solventes y anticongelantes.
- El uso de electricidad puede ser costoso en muchos lugares.

1.4. Formulación del problema

1.4.1. Problema general

¿En qué medida el método de electrocoagulación a nivel de laboratorio con electrodos de aluminio y acero inoxidable permite la reducción de la Demanda Química de Oxígeno de las aguas residuales provenientes de lavadoras en el distrito de San Juan de Lurigancho en el año 2023?

1.4.2. Problemas específicos

- ¿Cuál es la caracterización de las residuales provenientes de lavadoras en el distrito de San Juan de Lurigancho antes de aplicar el método de electrocoagulación con electrodos de aluminio y acero inoxidable?
- ¿Cuáles son las condiciones óptimas de la intensidad y distancia entre electrodos para llegar a la máxima reducción de la concentración de la Demanda Química de Oxígeno de las aguas residuales provenientes de lavadoras en el distrito de San Juan de Lurigancho?
- ¿Cuál será el porcentaje de reducción de la Demanda Química de Oxígeno de las aguas provenientes de lavadoras mediante el método de electrocoagulación con electrodos de aluminio y acero inoxidable en el distrito de San Juan de Lurigancho?

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Reducir la concentración de la Demanda Química de Oxígeno en las aguas residuales provenientes de lavadoras mediante el método electrocoagulación a nivel

de laboratorio con electrodos de aluminio y acero inoxidable en el distrito de San Juan de Lurigancho en el año 2023.

1.5.2. Objetivos específicos

- Realizar la caracterización de las aguas residuales provenientes de lavadoras en el distrito de San Juan de Lurigancho antes de aplicar el método de electrocoagulación con electrodos de aluminio y acero inoxidable.
- Determinar las condiciones óptimas de la intensidad y distancia entre electrodos para llegar a la máxima reducción de la concentración de la Demanda Química de Oxígeno de las aguas residuales provenientes de lavadoras en el distrito de San Juan de Lurigancho.
- Determinar el porcentaje de reducción de la Demanda Química de Oxígeno de las aguas provenientes de lavadoras mediante el método de electrocoagulación con electrodos de aluminio y acero inoxidable en el distrito de San Juan de Lurigancho.

1.6. Hipótesis

1.6.1. Hipótesis general

Al aplicar el método de electrocoagulación a nivel de laboratorio con electrodos de aluminio y acero inoxidable reducirá significativamente la Demanda Química de Oxígeno de las aguas residuales provenientes de lavadoras en el distrito de San Juan de Lurigancho en el año 2023.

1.6.2. Hipótesis específicas

- Las concentraciones de los parámetros de la caracterización de las aguas residuales provenientes de lavadoras supera a los valores Máximos Admisibles del D.S. N° 010-2019-VIVIENDA.
- Las condiciones óptimas de la intensidad y distancia entre electrodos influirán significativamente en la reducción de la concentración de la Demanda Química de Oxígeno de las aguas residuales provenientes de lavadoras en el distrito de San Juan de Lurigancho.
- Mediante el método de electrocoagulación con los electrodos de aluminio y acero inoxidable se reducirá más del 60% de la Demanda Química de Oxígeno de las aguas residuales provenientes de lavadora mediante en el distrito de San Juan de Lurigancho en el año 2023.

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

2.1. Tipo de investigación

El proyecto de investigación tiene un propósito aplicado porque pretende dar solución a un problema específico o un método específico, para este trabajo de investigación se relaciona con el agua doméstica descargada de lavadoras sin pretratamiento. Utiliza un enfoque cuantitativo ya que recopila datos de laboratorio para probar hipótesis basadas en mediciones numéricas y análisis estadístico para modelar el comportamiento y probar teorías. (Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2006)

2.2. Población y muestra

2.2.1. Población

La población está determinada por todas las aguas residuales de las lavadoras domésticas, que corresponde al consumo de 42-62 litros de agua de lavado y una lavadora con una capacidad de carga de 7 kg, ubicado en Mz Lote 5, Grupo 6 calle 70, Lima, Perú.

2.2.2. Muestra

El método de muestreo para este estudio es de tipo no probabilístico (no aleatorio), ya que las muestras se recolectaron al azar, es decir, que se tomaron de diferentes muestras compuestas considerando las horas de operación de uso de la lavadoras, de las cuales se preparó 24 litros para su respectivo análisis antes, durante y después del proceso del método de electrocoagulación de las cuales, se determinó una muestra representativa de 4 litros por cada tratamiento, los cuales fueron posteriormente analizadas en el laboratorio.

Para la determinación del tamaño de la muestra compuesta se aplicó la siguiente formula según la expresión (Instituto de Toxicología de la Defensa, 2016):

$$V_i = V \times \left(\frac{Q_i}{n}\right) \times Q_p$$

Donde:

V_i = Volumen de cada alícuota o porción de muestra,

V = Volumen total a componer (pueden ser 2 L).

Q_i = Caudal instantáneo de cada muestra

Q_p = Caudal promedio durante el muestreo

n = número de muestras tomadas

La muestra compuesta se conformó tomando en consideración en la demanda del lavado de ropa el horario, se tomó los fines de semana la cual opera 5 horas diarias sábados y domingo.

Estableciendo así seis muestras simples para obtener la muestra compuesta en intervalos mínimos de 1 hora aproximadamente.

Para determinar el volumen de la muestra simple a coleccionar (V_i), se utilizó la siguiente información: el volumen total requerido de la muestra fue de 24 L, que resulta de la utilización de 4 L de agua residual por cada tratamiento y 1 litro de agua adicional para la caracterización inicial del agua domésticas. El caudal promedio de 0.38 L/s otorgado por el personal propio de la empresa.

2.3. Unidad de análisis

En cuento a, al proyecto de investigación se define a las aguas residuales proveniente de lavadoras, como producto de actividades domésticas, por ende; esta unidad de análisis, se determinaron antes, durante y después de la aplicación del tratamiento mediante la celda de electrocoagulación, de las cuales en el desarrollo se analizará las variables.

2.4. Tipo de muestreo

Dado el trabajo de investigación es de tipo de muestreo no probabilístico, sobre lo que en la cual se selecciona el número de muestras acorde al criterio y se selecciona con base en la conveniencia del investigador. Por esta razón, se empleó 4 litros, que fue la cantidad requerida por cada tratamiento. De acuerdo a Kimear y Taylor (1998), estas también son conocidas como muestras dirigidas, ya que están orientadas por las características de la investigación, esta no se busca la representatividad de la población, sino el cuidado y el control de las dimensiones específicas de la materia de estudio, que permitan la recolección y el análisis de datos. Debido a ello, el muestreo se realizó en una sola fecha, tomando en consideración el día de generación de mayor producción de aguas domésticas provenientes del lavado de ropa.

2.5. Diseño de investigación

Se empleó el diseño experimental acorde al método específico empleado, así como se complementó con el corte pre-experimental (26), es decir, se manipuló a la variable independiente de estudio (electrocoagulación) con la finalidad de alcanzar un punto donde la eficiencia del tratamiento refleje un mayor porcentaje de remoción, tomando en cuenta un contexto de experimentación en laboratorio, de modo que la hipótesis validada se encuentre

asociada con una potencial aplicación en un segundo momento (independiente) que son: intensidad, tiempo de retención, distancia entre electrodos. Por otro lado, este diseño requiere un grupo control experimental, con tal fin, determinar si el tratamiento ha generado alguna diferencia entre los resultados del grupo T0, por ello, se empleó 12 tratamiento y un control en la cual no se aplicó el tratamiento, solo se analizó con las características de los parámetros. El esquema del diseño de investigación es el siguiente:

$$X_1 \rightarrow O_1 \rightarrow Y_1$$

$$X_2 \rightarrow O_2 \rightarrow Y_2$$

$$X_3 \rightarrow O_3 \rightarrow Y_3$$

Donde:

O = observación (1, 2 y 3 para cada experimento).

$X_{1, 2 \text{ y } 3}$ = Electrocoagulación a distintas intensidades de corriente y distancia de los electrodos.

$Y_{1, 2 \text{ y } 3}$ = Reducción de la Demanda Química de Oxígeno.

2.6. Materiales, instrumentos y métodos

2.3.1. Materiales

Los materiales utilizados en este proyecto son:

- Combinación de electrodos de aluminio (2) y acero inoxidable (2) por cada tratamiento.
- Fuente de poder Sunshine P-3005A

- 4 cables cocodrilo
- Cubeta de vidrio de 15 x 20 cm
- 1 recipiente con una capacidad de 24 litros

2.3.2. Instrumentos

- Ficha de identificación del punto de muestreo (ANEXO n° 4)

Los instrumentos descritos sirvieron para recolectar información del sitio de muestreo; de esta forma se obtuvo información de la ubicación exacta mediante el software ArcGIS evidencia fotográfica, coordenadas y una breve descripción.

- Informe General Laboratorio SQA.
- La cadena de custodia es un instrumento que permitió llevar a cabo el control y vigilancia del muestreo, incluyendo los métodos de la toma de muestra, codificación, transporte y la definición de los parámetros a analizar, el informe de ensayo es un instrumento que evidencia el valor de la concentración de la muestra de caracterización analizada bajo los 3 parámetros en evaluación del efluente previo tratamiento.
- Informe de Ensayo y Cadena de Custodia – Post tratamiento (ANEXO n° 6).
- La cadena de suministro es una herramienta para controlar y monitorear el muestreo, incluido el método de muestreo, la codificación, el transporte y la definición de los parámetros a evaluar, y el informe de prueba es una herramienta para mostrar el valor de la caracterización analítica de la muestra analizada en el laboratorio de acuerdo al parámetro

DQO en la evaluación de aguas residuales después de la concentración del tratamiento.

- Ficha de la descripción de la celda (ANEXO n° 7).
- La herramienta detalló información relevante para la creación del prototipo, incluidas características como el tipo de material, los valores medidos, el equipo representativo e instrucciones específicas de uso.

Tabla 1

Equipos y metodología empleador por SQA laboratorio.

Ensayo	Método	Año	Unidad
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5220 D, 23 rd Ed. Chemical Demand (COD). Closed Reflux, Colorimetric Method COD Reactor CR25	2023	O ₂ mg/L
Color	Medidor de Colorimetría CR-400	2023	Pt-Co
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540 D, 23 rd Ed. Solids. Total Suspended Solids Dried at 103-105°C	2023	mg/L
pH	HQ 40 d	2023	pH

Nota: Se expone las metodologías aplicada por el laboratorio para la determinación de la concentración de los parámetros evaluados

2.3.3. Métodos

Para el análisis de los datos se utilizaron los siguientes métodos:

- Programa de Microsoft Excel: se utilizó para llevar a cabo la organización de los datos y tabulación de datos obtenidos en los tratamientos y a su vez calcular hallar el porcentaje de remoción.
- Software estadístico Minitab 19: se utilizó para procesar los resultados obtenidos al aplicar y analizar pruebas estadísticas tales como:
 - Prueba de Hipótesis Estadística
 - si se puede aceptar o rechazar una afirmación acerca de una población dependiendo de la evidencia proporcionada por una muestra de datos obtenidos en los tratamientos obtenidos.
 - Análisis de Varianza (ANOVA), se desarrolló la estadística que compara la varianza entre la media (o media) de diferentes grupos en los diferentes tratamientos. Se utiliza en diferentes contextos para determinar si existen diferencias entre diferentes grupos de métodos.

2.7. Técnicas

Las técnicas de recolección de datos empleadas en la presente investigación fueron:

Observación directa: se recopiló información sobre la pregunta de investigación, conocer la realidad de la población y lo que se está haciendo para satisfacer las necesidades durante el muestreo y tratamiento general.

Revisión Bibliográfica: Se utilizan como documentos tales como libros, artículos científicos, tesis y revistas relacionadas con el tema de investigación; tales como, Redalyc y Scielo.

Análisis fisicoquímico: Para determinar la eficiencia de remoción de los parámetros físico-químicos procesados en la celda de electrocoagulación, se deben utilizar instrumentos que permitan obtener resultados.

Estadística: para este propósito se utilizó Microsoft Excel y Minitab Statistical Software19.

2.8. Validez y confiabilidad de datos

La validez y confiabilidad del proyecto de investigación está sujeta a la aprobación de los instrumentos de aplicación por el asesor, según el formato de solicitud de validación de instrumento de recojo de información (ANEXO n° 3).

Tabla 2

Validación de instrumentos.

Especialista	Especialidad	CIP	Promedio de valoración (%)
Ing. Margeo Chuman	Ingeniero Químico	205631	80%

Nota: Se precisa el Especialista Margeo Chuman, el asesor a cargo de evaluar y brindar el promedio de valoración de validez y confiabilidad e los instrumentos de recolección de datos.

2.9. Procedimiento

2.9.1. Procedimiento para la construcción de la celda electrocoagulación

Para el diseño y construcción de la celda de electrocoagulación se utilizó aguas residuales domesticas proveniente de lavadoras. Los materiales usados para la fabricación fueron: cubeta de vidrio, una fuente de poder, electrodos de aluminio y acero inoxidable, conector cocodrilo polo positivo y negativo.

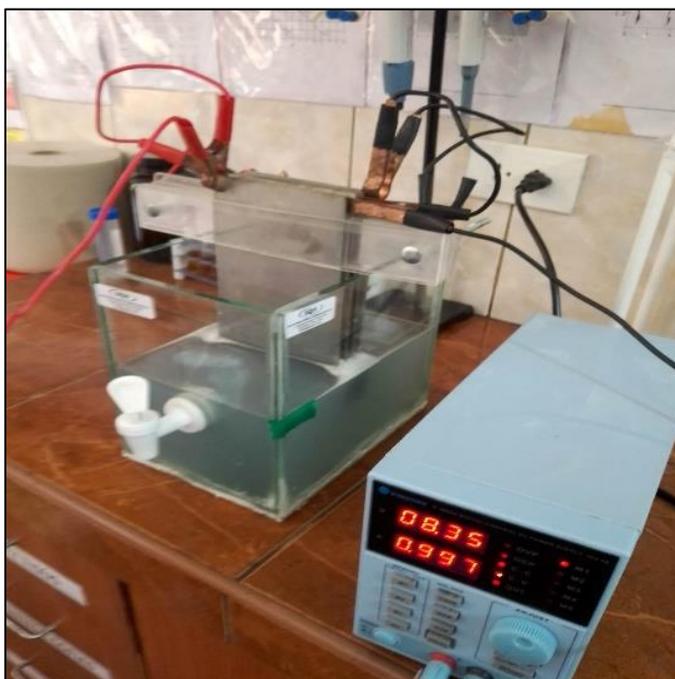
Dimensiones de la celda de electrocoagulación: medidas: altura (h)= 20 cm, ancho (a)=15 cm y largo=20 cm; los electrodos tienen un espesor de las placas de 3 mm.

La celda de electrocoagulación tiene forma cuadrada dimensiones mencionadas. La celda está compuesta por 3 zonas:

- a) Sector de la flotación, se aglomeran los productos que fueron arrastrados por los gases generados H_2 y O_2 de la reacción electroquímica.
- b) Zona de sedimentación, acumulación de sustancias sedimentables, se precipitan.
- c) Zona de reacción, se ubica los electrodos a una distancia entre ellos, en forma de monopares en paralelo (Aluminio-Acero-Aluminio, etc).

Figura 1

Instalación de los electrodos de aluminio y acero inoxidable de una celda de electrocoagulación.



Nota: Elaboración propia.

Esta fuente sirve para alimentar corriente continua, para producir reacciones electroquímicas en la celda, en este caso la fuente varía de acuerdo a las condiciones de operación, que se utilizó medidores digitales para el amperaje y voltaje, la fuente usada tiene una capacidad de Amperaje de 0 a 5 amperios en el proceso no se usó ningún tipo de reactivo adicional.

Para el buen funcionamiento de la celda, se requirió hacer algunos ensayos preliminares, para ver una buena eficiencia, fue necesario hacer la prueba con agua de caño. Una vez instalado el sistema, se procedió a verificar las correctas conexiones mediante el funcionamiento con muestra de agua de caño, para eso se ve si existe fugas en el pegado del vidrio, en la llave para las muestras, otro aspecto importante es la transferencia de electrones, que se refleja en la formación de burbujas (H_2 y O_2) en los electrodos, de aluminio y acero inoxidable se obtiene de iones de aluminio.

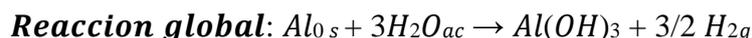
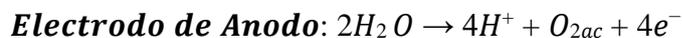
Figura 2

Proceso de electrocoagulación con formación de gases y sedimentación.



Nota: Elaboración propia

2.9.2. Las Reacciones Químicas que se muestra en una cámara electroquímica:



Los efluentes procedentes de lavadoras son analizados antes y después de su tratamiento, para después ser comparada con los parámetros establecidos según la norma. Los análisis de los parámetros fisicoquímicos y orgánicos del efluente antes de su tratamiento se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 3

VMA para descargas al sistema de alcantarillado D.S. N° 010-2019-VIVIENDA.

Parámetros Fisicoquímicos	Unidad	Resultados
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/l	500
Demanda Química de Oxígeno	mg/l	1000
Sólidos Suspendidos Totales	mg/l	500
Aceites y Grasas	mg/l	100

Nota: El diario Oficial el Peruano.

Se desarrolló con las pruebas con temperatura ambiente y presión de ambiente, con las condiciones normales del condominio. Para ello se realizaron diferentes experimentos, y una repetición uno de ellos es manteniendo algunos factores constantes en este caso, se mantuvo constante los números de electrodos y tiempo constante. Los demás factores se alteraron en tres niveles entre ellos (distancia entre

electrodos e intensidad), los niveles de cada factor se muestran en el diseño de investigación para lo cual se evaluó DQO de acuerdo a los objetivos mencionados.

Por ser un efluente doméstico, se trató de cumplir con el objetivo planteado de esta investigación, lo cual es tratar de llegar a los parámetros establecidos para la descarga aguas domésticas procedente de lavadoras Valores Máximo Admisible (VMA), por ende, se sacaron las muestras en el tiempo de uso de la lavadora en el proceso de enjuague.

Otras variables a tener en cuenta es determinar el grado de influencia del pH sobre el proceso de electrocoagulación. Antes de empezar con las corridas, se determinó la distancia de los electrodos y la instalación de los cables polo negativo y positivo Se trabajó en base de 24 litros de efluente por cada corrida, se dividieron en dos grupos el efluente a tratar, se trabajó en tres niveles de pH las muestras tomadas antes y después de ser tratado, así como la complementación de los otros parámetros.

Luego se analizaron en un laboratorio antes de uso de evaluar los parámetros se realizó con el lavado con agua destilada previa calibración de equipos. La eficiencia para cada corrida se evaluó conociendo las concentraciones iniciales y finales de la muestra. Antes de ser analizadas se hizo la técnica de la observación y descripción de los cambios en la celda de electrocoagulación.

2.9.3. Procedimiento para la recolección de la muestra

a) Ubicación de la vivienda multifamiliar

El domicilio, se encuentra ubicada en la Mz K Lote 5 Grupo 6 calle 70, San Juan de Lurigancho, Lima, Perú, según el mapa de ubicación (ver ANEXO n° 2). Las muestras de aguas residuales de lavandería se recolectaron en la dirección anterior.

b) Toma de muestra vivienda multifamiliar

Para el muestreo se tuvo en cuenta el “Protocolo de Muestreo de Aguas Residuales”. Las muestras luego son trasladadas al laboratorio para su caracterización inicial o al laboratorio para su procesamiento S.Q. A. Soluciones Químicas Ambientales SAC. Todo el proceso de la experimentación se desarrolló de manera presencial bajo supervisión de los especialistas.

2.9.4. Proceso de experimentación

a) Determinación de tratamientos en función del diseño factorial con tres factores

Este diseño, permitió identificar las posibles combinaciones para el desarrollo experimental. Para lo cual se aplicó la siguiente fórmula basada en (Siqueiros, 2004):

$$N^{\circ} \text{ de pruebas} = m^n$$

Donde:

m: Indica los niveles nivel (-) y (nivel (+))

n: Indica la cantidad de variables independientes (parámetros operacionales)

Remplazando:

$$N^{\circ} \text{ de pruebas} = 2^6$$

$$N^{\circ} \text{ de experimentos o tratamientos} = 12$$

Tabla 4

Condiciones de operación.

Dimensiones	Niveles	Variable dependiente
Distancia entre electrodos	0.4 mm	Reducción de la Demanda Química de Oxígeno
	0.8 mm	
Intensidad de corriente	5 A	
	4 A	
	3 A	

Nota: Elaboración propia.

b) Experimentos totales

Se identificaron un total de 12 tratamientos mediante un diseño factorial que consideró las variables independientes:

- Intensidad de corriente
- Distancia entre electrodos

Para determinar los experimentos a los que se aplica el procedimiento de electrocoagulación tenemos los siguientes:

- Número de experimentos o combinaciones= 12
- Número de repeticiones = 2
- Número total de experimentos = $6 \times 2 = 12$
- Muestra en Blanco = 1

Se contempló la siguiente tabla de distribución de muestras a analizar.

Tabla 5

Especificaciones de los tratamientos.

Tratamientos	Repeticiones	Intensidad (A)	Distancia entre Electrodos (mm)	Tiempo	
Blanco	2	-	-	-	
T-01		5	0.4		
T-02		4	0.4		
T-03	Repetición N°1	3	0.4	Cte.= 15 min	
T-04		5	0.8		
T-05		4	0.8		
T-06		3	0.8		
T-01		5	0.4		
T-02		4	0.4		
T-03	Repetición N°2	3	0.4	Cte.= 15 min	
T-04		5	0.8		
T-05		4	0.8		
T-06		3	0.8		

Nota: Elaboración propia.

c) Aplicación del tratamiento

Al inicio del experimento se utilizó un volumen de 4 litros para cada tratamiento, teniendo en cuenta las combinaciones indicadas en la Tabla 07.

Una vez finalizado el procedimiento, la muestra se acondiciona a una temperatura a fin, de preservar la espuma de la muestra a una temperatura de refrigeración.

d) Análisis de muestras en laboratorio

El análisis de las muestras se llevó a cabo en el laboratorio Soluciones Químicas Ambientales S.A.C (SQA) para lo cual se obtuvo dos instrumentos de reporte, el Informe de Ensayo.

CAPÍTULO III. RESULTADOS

3.1. Caracterización del efluente

Para la caracterización inicial las muestras fueron trasladadas al laboratorio externo Soluciones Químicas Ambientales (SQA), donde se analizaron los siguientes parámetros fisicoquímicos: pH, Conductividad eléctrica, Turbidez, Sólidos Suspendidos Totales (TSS), Color Demanda Química de Oxígeno (DQO); como se muestra en la Tabla 6:

Tabla 6

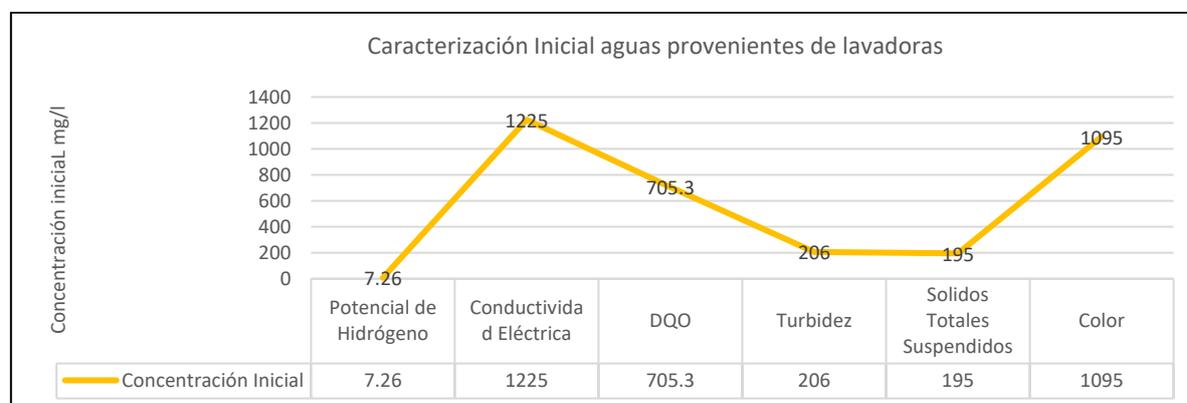
Caracterización inicial del efluente de aguas residuales procedente de lavadora.

Parámetro	Unidad	Concentración Inicial
Potencial de Hidrógeno	pH	7.26
Conductividad Eléctrica	μS/cm	1225
Turbidez	NTU	206
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	195
Color	Pt-Co	1095
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	705.30

Nota: Resultados de la concentración inicial del agua residual provenientes de lavadoras.

Figura 3

Resultados obtenidos caracterización inicial de agua residual de lavadora.



Nota: Resultados obtenidos en el excel caracterización inicial de aguas residuales de lavadora.

3.2. Resultados descriptivos

3.2.1. Caracterización del agua residual y tratamiento

De acuerdo a la Tabla 7, en la caracterización del agua residual antes del tratamiento (Blanco) medido por el laboratorio Soluciones Químicas Ambientales S.A.C. siendo la DQO de 705.3 mg/L y después del tratamiento son medidos por T-01, T-02, T-03, T-04, T-05, T-06, realizado por duplicado teniendo 12 corridas experimentales, trabajado a diferentes condiciones de tipo de intensidad de corriente y distancia entre electrodos en un tiempo constante de tratamiento de 15 minutos.

Tabla 7

Base de datos analizados aguas residuales.

Tratamientos	Repeticiones	Intensidad (A)	Distancia (mm)	pH	Conductividad (µm/cm)	Turbiedad (NTU)	SST (mg/L)	Color (Pt/Co)	DQO (mg/L)
Blanco	-	-	-	7.26	1225.00	206.00	195.00	1095.00	705.30
T-01		5	0.4	6.85	1204.00	17.00	14.00	326.00	319.30
T-02		4	0.4	7.49	1220.00	200.00	189.00	1091.00	310.20
T-03	Repetición N°1	3	0.4	7.20	2101.00	45.00	36.00	509.00	283.60
T-04		5	0.8	7.19	2101.01	45.01	41.00	512.00	301.10
T-05		4	0.8	7.33	1288.00	73.00	69.00	962.00	556.00
T-06		3	0.8	7.40	1282.00	70.00	65.00	960.00	554.00
T-01		5	0.4	7.20	1317.00	36.00	32.00	479.00	261.30
T-02		4	0.4	7.50	1314.00	198.00	171.00	1028.00	300.20
T-03	Repetición N°2	3	0.4	7.00	1192.00	62.00	53.00	1057.00	244.30
T-04		5	0.8	7.15	1189.00	61.00	50.00	1053.00	264.30
T-05		4	0.8	7.00	1210.00	193.00	173.00	1030.00	442.60
T-06		3	0.8	7.20	1218.00	192.00	165.00	1028.00	499.30

Nota: Resultados medidos por el laboratorio Soluciones Químicas Ambientales S.A.C.

3.2.2. Medición de la DQO

En la Tabla 8 y en Figura 4, se puede observar en el proceso de electrocoagulación que después del tratamiento T-03 presenta un mayor valor de la DQO de 555.00 mg/L y después del tratamiento T-05 presenta un menor valor de la DQO de 254.30 mg/L en promedio.

Tabla 8

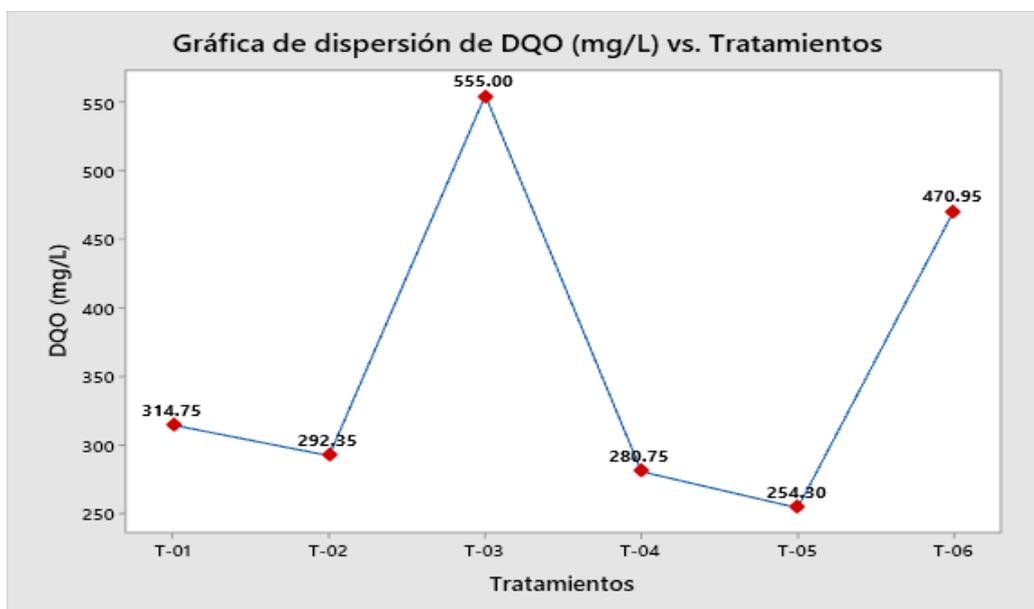
Promedio de medición de la DQO.

Tratamientos	Tiempo (min)	Intensidad (A)	Distancia (mm)	DQO (mg/L)	Promedio de la DQO (mg/L)	Reducción de la DQO (%)
Blanco	-	-	-	705.30	705.30	0.00
T-01	15	5	0.4	319.30	314.75	55.37
	15	5	0.4	310.20		
T-02	15	4	0.4	283.60	292.35	58.55
	15	4	0.4	301.10		
T-03	15	3	0.4	556.00	555.00	21.31
	15	3	0.4	554.00		
T-04	15	5	0.8	261.30	280.75	60.19
	15	5	0.8	300.20		
T-05	15	4	0.8	244.30	254.30	63.94
	15	4	0.8	264.30		
T-06	15	3	0.8	442.60	470.95	33.23
	15	3	0.8	499.30		

Nota: Resultados medidos por el laboratorio Soluciones Químicas Ambientales S.A.C.

Figura 4

Gráfica de dispersión de la DQO.



Nota: Resultados obtenidos en el software estadístico Minitab 19.

En la Tabla 9, se muestra la estadística descriptiva de la remoción de la DQO (%) en cada tratamiento en medidas de medias, desviación estándar, varianza, valor mínimo, mediana y valor máximo.

Tabla 9

Estadística descriptiva de los datos de los tratamientos.

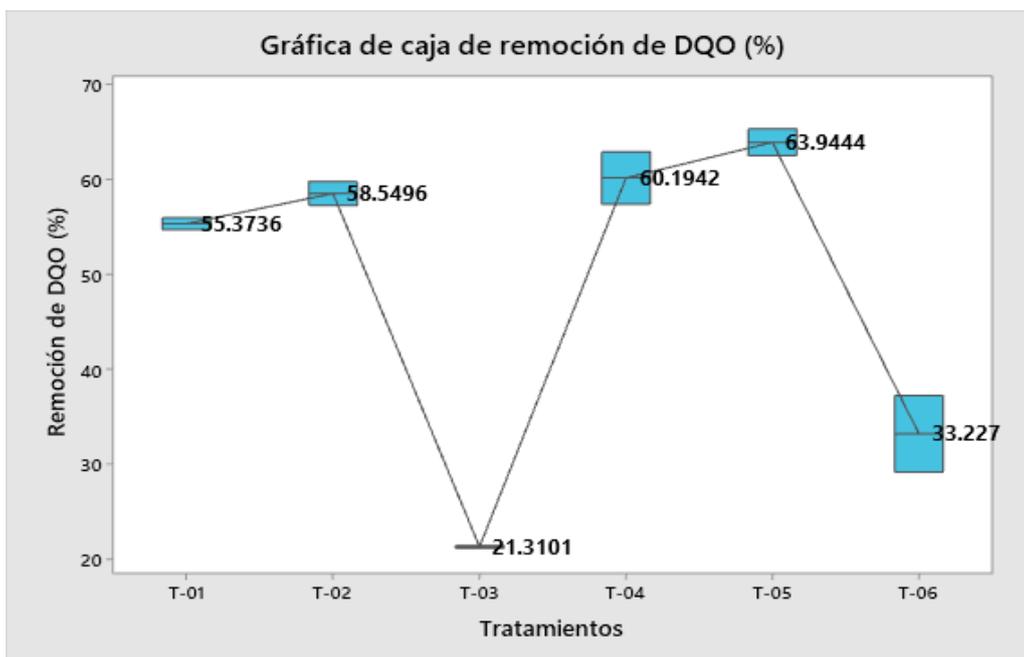
Tratamientos	N	Media	Desv.Est.	Varianza	Mínimo	Mediana	Máximo
T-01	2	55.374	0.912	0.832	54.728	55.374	56.019
T-02	2	58.55	1.75	3.08	57.31	58.55	59.79
T-03	2	21.310	0.201	0.040	21.168	21.310	21.452
T-04	2	60.19	3.90	15.21	57.44	60.19	62.95
T-05	2	63.94	2.01	4.02	62.53	63.94	65.36
T-06	2	33.23	5.68	32.31	29.21	33.23	37.25

Nota: Resultados obtenidos en el software estadístico Minitab 19.

En la Figura 5, se muestra que después del tratamiento por electrocoagulación se llegó a una máxima remoción de la DQO con el tratamiento con el T-05 del 63.94% y una mínima remoción de la DQO con el tratamiento T-03 del 21.31%.

Figura 5

Gráfica de de caja de remoción de la DQO.



Nota: Resultados obtenidos en el software estadístico Minitab 19.

3.2.3. Medición del pH

En la Tabla 10 y en Figura 6, se puede observar en el proceso de electrocoagulación que después del tratamiento T-02 presenta un mayor valor del pH = 7.50 y después del tratamiento T-01 presenta un menor valor de pH = 7.03 en promedio.

Tabla 10

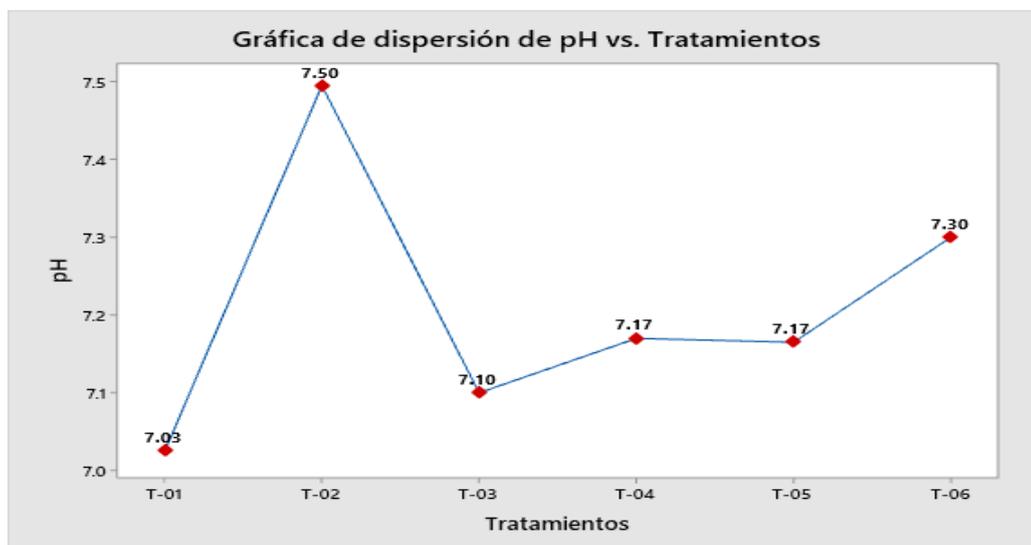
Promedio de medición de pH.

Tratamientos	Tiempo (min)	Intensidad (A)	Distancia (mm)	pH	Promedio de pH
Blanco	-	-	-	7.26	7.26
T-01	15	5	0.4	6.85	7.03
	15	5	0.4	7.20	
T-02	15	4	0.4	7.49	7.50
	15	4	0.4	7.50	
T-03	15	3	0.4	7.20	7.10
	15	3	0.4	7.00	
T-04	15	5	0.8	7.19	7.17
	15	5	0.8	7.15	
T-05	15	4	0.8	7.33	7.17
	15	4	0.8	7.00	
T-06	15	3	0.8	7.40	7.30
	15	3	0.8	7.20	

Nota: Resultados medidos por el laboratorio Soluciones Químicas Ambientales S.A.C.

Figura 6

Gráfica de dispersión del pH.



Nota: Resultados obtenidos en el software estadístico Minitab 19.

3.2.4. Medición de la conductividad

En la Tabla 11 y en Figura 7, se puede observar en el proceso de electrocoagulación que después del tratamiento T-02 presenta un mayor valor de la conductividad de 2101.01 $\mu\text{m}/\text{cm}$ y después del tratamiento T-05 presenta un menor valor de la conductividad 1190.50 $\mu\text{m}/\text{cm}$ en promedio.

Tabla 11

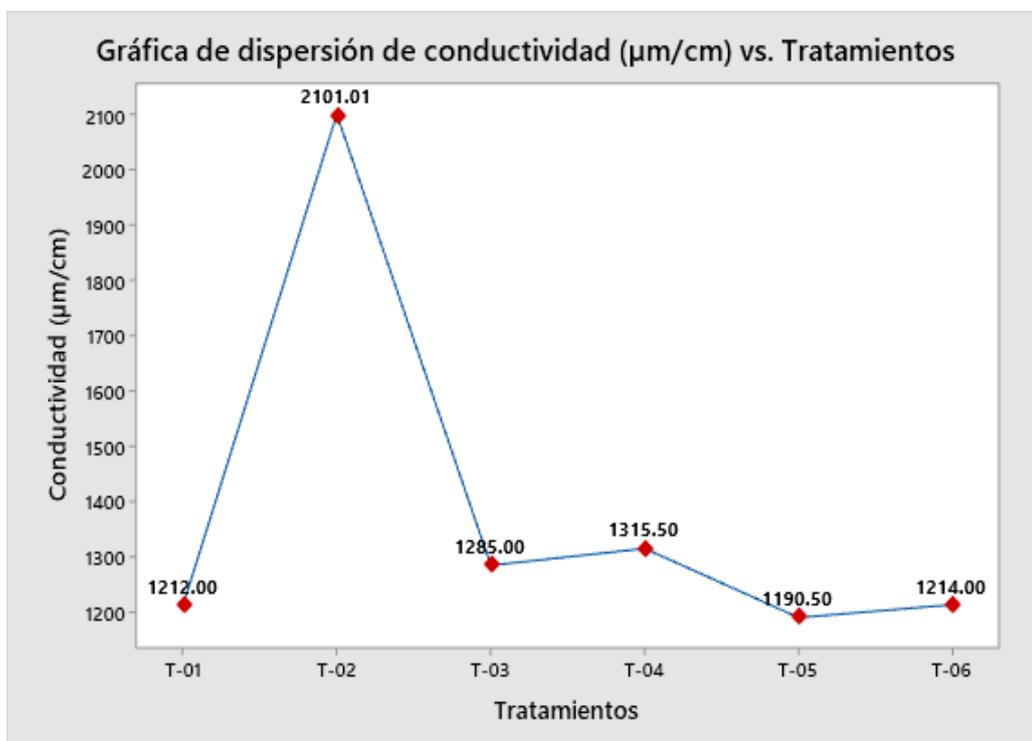
Promedio de medición de la conductividad.

Tratamientos	Tiempo (min)	Intensidad (A)	Distancia (mm)	Conductividad ($\mu\text{m}/\text{cm}$)	Promedio de conductividad ($\mu\text{m}/\text{cm}$)
Blanco	-	-	-	1225.00	1225.00
T-01	15	5	0.4	1204.00	1212.00
	15	5	0.4	1220.00	
T-02	15	4	0.4	2101.00	2101.01
	15	4	0.4	2101.01	
T-03	15	3	0.4	1288.00	1285.00
	15	3	0.4	1282.00	
T-04	15	5	0.8	1317.00	1315.50
	15	5	0.8	1314.00	
T-05	15	4	0.8	1192.00	1190.50
	15	4	0.8	1189.00	
T-06	15	3	0.8	1210.00	1214.00
	15	3	0.8	1218.00	

Nota: Resultados medidos por el laboratorio Soluciones Químicas Ambientales S.A.C.

Figura 7

Gráfica de dispersión de la conductividad.



Nota: Resultados obtenidos en el software estadístico Minitab 19.

3.2.5. Medición de la turbiedad

En la Tabla 12 y en Figura 8, se puede observar en el proceso de electrocoagulación que después del tratamiento T-06 presenta un mayor valor de la turbiedad de 192.50 NTU y después del tratamiento T-02 presenta un menor valor de la turbiedad de 45.01 NTU en promedio.

Tabla 12

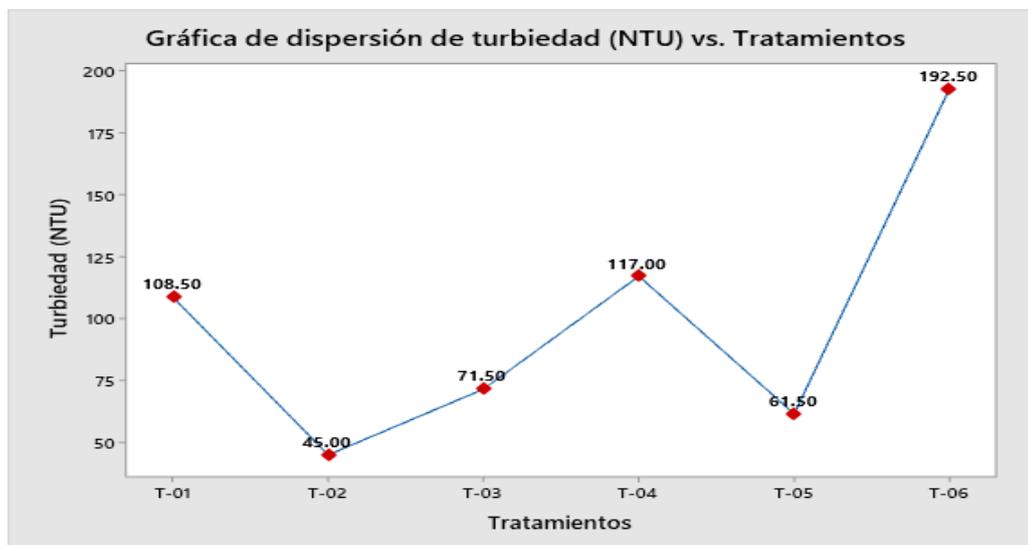
Promedio de medición de la turbiedad.

Tratamientos	Tiempo (min)	Intensidad (A)	Distancia (mm)	Turbiedad (NTU)	Promedio de la turbiedad (NTU)	Remoción de la turbiedad (%)
Blanco	-	-	-	206.00	206.00	0.00
T-01	15	5	0.4	17.00	108.50	47.33
	15	5	0.4	200.00		
T-02	15	4	0.4	45.00	45.01	78.15
	15	4	0.4	45.01		
T-03	15	3	0.4	73.00	71.50	65.29
	15	3	0.4	70.00		
T-04	15	5	0.8	36.00	117.00	43.20
	15	5	0.8	198.00		
T-05	15	4	0.8	62.00	61.50	70.15
	15	4	0.8	61.00		
T-06	15	3	0.8	193.00	192.50	6.55
	15	3	0.8	192.00		

Nota: Resultados medidos por el laboratorio Soluciones Químicas Ambientales S.A.C.

Figura 8

Gráfica de dispersión de la turbiedad.



Nota: Resultados obtenidos en el software estadístico Minitab 19.

3.2.6. Medición de los sólidos suspendidos totales

En la Tabla 13 y en Figura 9, se puede observar en el proceso de electrocoagulación que después del tratamiento T-06 presenta un mayor valor de los SST de 169.00 mg/L y después del tratamiento T-02 presenta un menor valor de los SST de 38.50 mg/L en promedio.

Tabla 13

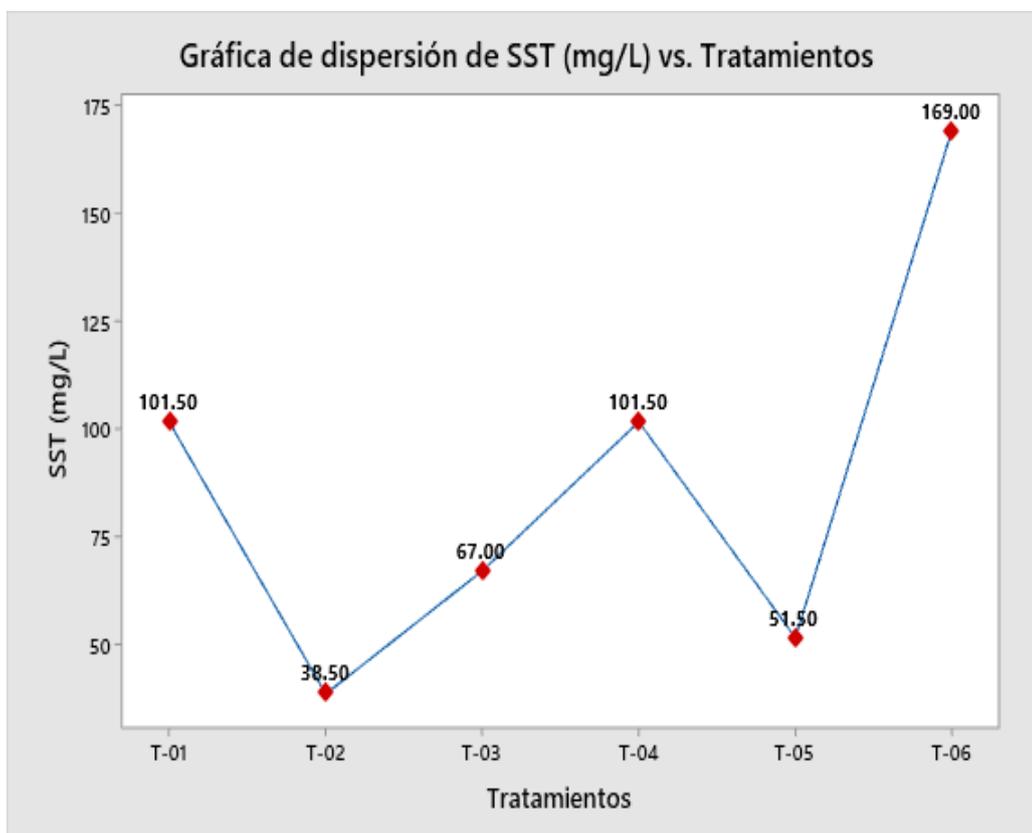
Promedio de medición de los SST.

Tratamientos	Tiempo (min)	Intensidad (A)	Distancia (mm)	SST (mg/L)	Promedio de los SST (mg/L)	Remoción de los SST (%)
Blanco	-	-	-	195.00	195.00	0.00
T-01	15	5	0.4	14.00	101.50	47.95
	15	5	0.4	189.00		
T-02	15	4	0.4	36.00	38.50	81.31
	15	4	0.4	41.00		
T-03	15	3	0.4	69.00	67.00	67.48
	15	3	0.4	65.00		
T-04	15	5	0.8	32.00	101.50	50.73
	15	5	0.8	171.00		
T-05	15	4	0.8	53.00	51.50	75.00
	15	4	0.8	50.00		
T-06	15	3	0.8	173.00	169.00	17.96
	15	3	0.8	165.00		

Nota: Resultados medidos por el laboratorio Soluciones Químicas Ambientales S.A.C.

Figura 9

Gráfica de dispersión de los SST.



Nota: Resultados obtenidos en el software estadístico Minitab 19.

3.2.7. Medición del color

En la Tabla 14 y en Figura 10 se puede observar en el proceso de electrocoagulación que después del tratamiento T-05 presenta un mayor valor del color de 1055.00 Pt/Co y después del tratamiento T-02 presenta un menor valor del color de 510.50 Pt/Co en promedio.

Tabla 14

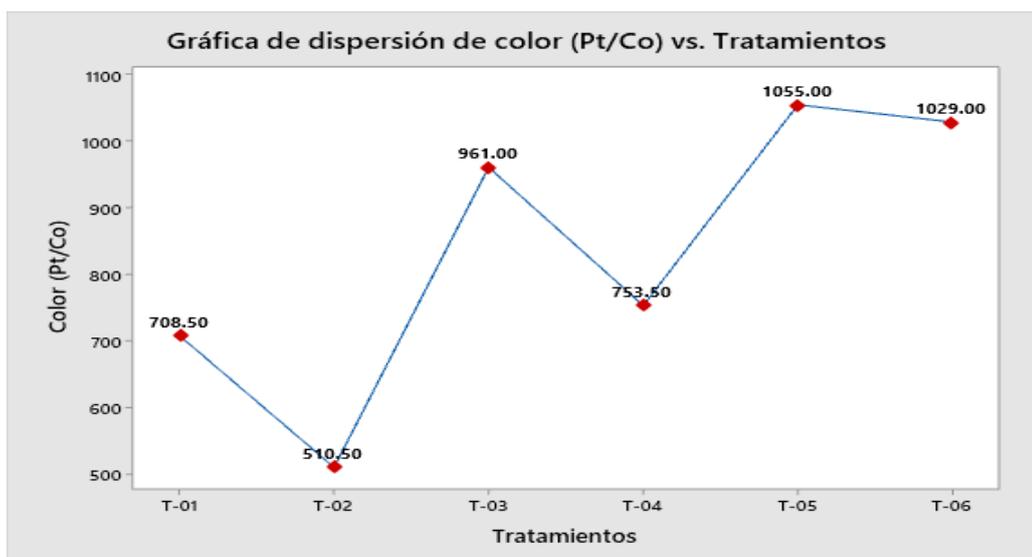
Promedio de medición de color.

Tratamientos	Tiempo (min)	Intensidad (A)	Distancia (mm)	Color (Pt/Co)	Promedio de color (Pt/Co)	Remoción de color (%)
Blanco	-	-	-	1095.00	1095.00	0.00
T-01	15	5	0.4	326.00	708.50	35.30
	15	5	0.4	1091.00		
T-02	15	4	0.4	509.00	510.50	53.38
	15	4	0.4	512.00		
T-03	15	3	0.4	962.00	961.00	12.24
	15	3	0.4	960.00		
T-04	15	5	0.8	479.00	753.50	31.19
	15	5	0.8	1028.00		
T-05	15	4	0.8	1057.00	1055.00	3.65
	15	4	0.8	1053.00		
T-06	15	3	0.8	1030.00	1029.00	6.03
	15	3	0.8	1028.00		

Nota: Resultados medidos por el laboratorio Soluciones Químicas Ambientales S.A.C.

Figura 10

Gráfica de dispersión de color.



Nota: Resultados obtenidos en el software estadístico Minitab 19.

3.3. Resultados Inferenciales

3.3.1. Prueba de normalidad de residuales de la reducción de la DQO

Para una prueba estadística paramétrica se deben de analizar los residuos (e_{ij}) que son generados por la diferencia entre la respuesta observada (Y_{ij}) y la respuesta predicha (\hat{Y}_{ij}) por el modelo en cada tratamiento: $e_{ij} = Y_{ij} - \hat{Y}_{ij}$

Los residuales deben cumplir si son normales, evaluando las hipótesis estadísticas de los residuales en base a la prueba de normalidad de Anderson Darling.

Siendo las hipótesis de prueba para el análisis de la normalidad:

H_0 : Los residuos siguen una distribución normal.

H_1 : Los residuos no siguen una distribución normal.

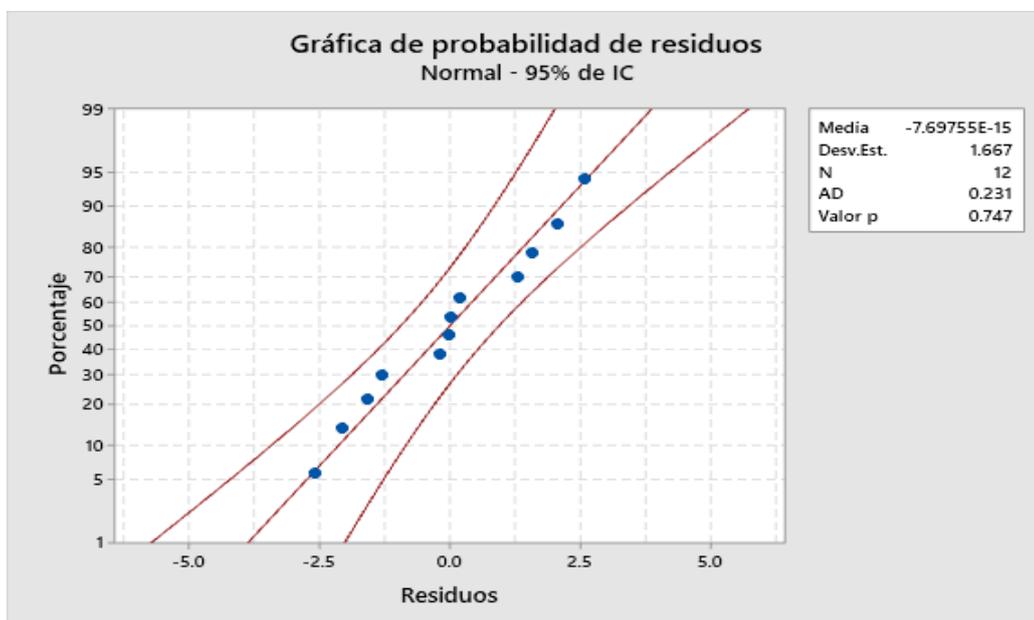
Nivel de significancia (α) = 0.05

Si el valor $p < \alpha$, se rechaza H_0 ; Si el valor $p > \alpha$, no se rechaza H_0

En la Figura 11, para la condición de normalidad, se puede observar que a un intervalo de confianza del 95% los datos están relativamente cerca de la línea de distribución normal ajustada con un coeficiente de correlación (AD) = 0.231 y el valor $p = 0.747$ es mayor que el nivel de significancia de 0.05; por lo tanto, no hay suficiente evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula (H_0), por lo se concluye que los datos siguen una distribución normal.

Figura 11

Gráfica de probabilidad normal de residuos.



Nota: Resultados obtenidos en el software estadístico Minitab 19.

3.3.2. Prueba de hipótesis estadística en el proceso de electrocoagulación

Ya que los datos presentan una distribución normal se utilizará la prueba paramétrica ANOVA donde las hipótesis estadísticas son:

$H_0: \tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = \tau_4 = \tau_5 = \tau_6$, todas las medias (promedios) de la reducción de la DQO son iguales.

$H_1: \tau \neq 0$, por lo menos una media de la reducción de la DQO es diferente.

Nivel de significancia (α) = 0.05

Si el valor $p < \alpha$, se rechaza H_0 ; Si el valor $p > \alpha$, no se rechaza H_0

En la Tabla 13, en el análisis de varianza, el valor p de los factores: Intensidad de corriente (A) y la distancia entre electrodos (mm) es menor que el nivel de significancia utilizado de 0.05 a un nivel de confianza del 95%, donde existe suficiente

evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula. Por lo tanto, se concluye que las medias de los tratamientos difieren; es decir, que los factores influyen de manera significativa en el porcentaje de la reducción de la DQO.

Tabla 15

Análisis de varianza ANOVA.

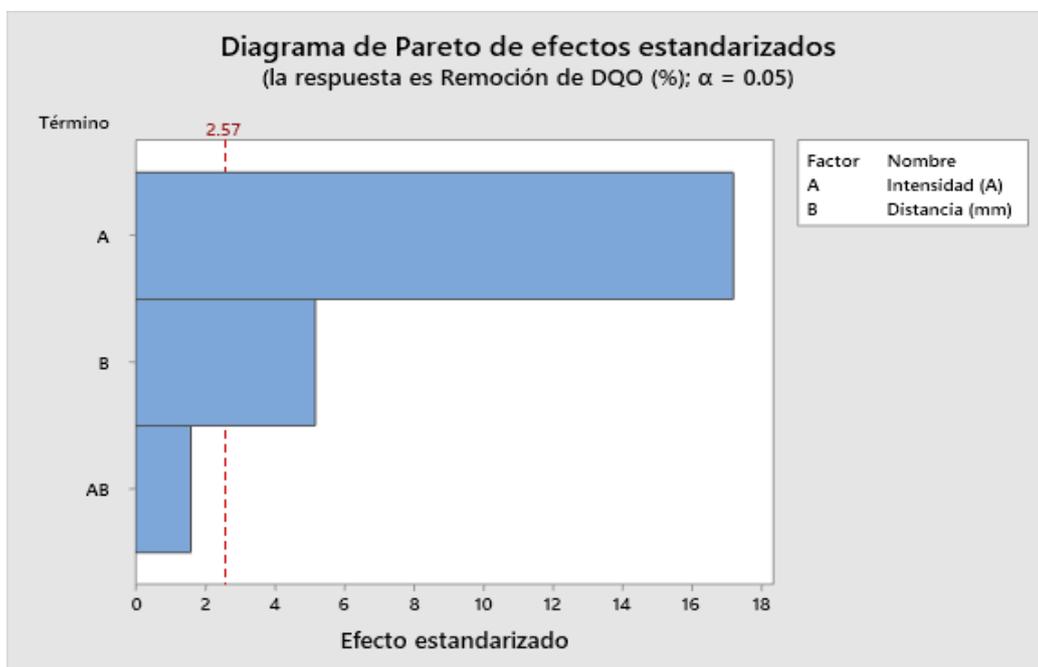
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	6	3016.25	502.71	82.25	0.000
Bloques	1	24.93	24.93	4.08	0.099
Lineal	3	2960.24	986.75	161.44	0.000
Intensidad (A)	2	2796.96	1398.48	228.80	0.000
Distancia (mm)	1	163.28	163.28	26.71	0.004
Interacciones de 2 términos	2	31.07	15.54	2.54	0.173
Intensidad (A)*Distancia (mm)	2	31.07	15.54	2.54	0.173
Error	5	30.56	6.11		
Total	11	3046.81			

Nota: Resultados obtenidos del software estadístico Minitab 19.

En la Figura 12, se muestra que la intensidad de corriente (A) y la distancia entre electrodos (B) influyen en la remoción de la DQO de manera positiva ya que sobrepasan el nivel de referencia de 2.57 generado por el mismo programa estadístico de acuerdo al nivel de significancia de 0.05 utilizado.

Figura 12

Diagrama de Pareto.



Nota: Resultados obtenidos en el software estadístico Minitab 19.

3.3.3. Estadísticos de bondad en el proceso de electrocoagulación

Se observa en la Tabla 16, que el coeficiente de determinación (R^2 ajustado) es de 97.79% el cual es un valor adecuado de ajuste del modelo, donde nos indica que los factores de intensidad de corriente y distancia entre electrodos influyen en gran magnitud en la remoción de la DQO.

Tabla 16

Resumen de las estadísticas de Bondad.

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
2.47228	99.00%	97.79%	94.22%

Nota: Resultados obtenidos del software estadístico Minitab 19.

Donde:

- S: Representa la desviación estándar se utiliza para evaluar qué tan bien el modelo describe la respuesta.
- R²: Es el porcentaje de variación en la respuesta que es explicada por el modelo, Mientras mayor sea el valor de R², mejor se ajustará el modelo a los datos. R² siempre está entre 0% y 100%.
- R² (ajustado): Se utiliza R² ajustado cuando se desee comparar modelos que tengan diferentes números de predictores.

3.3.4. Ecuación de regresión de modelo

De acuerdo a los factores y niveles se genera una ecuación de regresión del modelo, donde se tiene la ecuación general. Se toma el valor de la constante (48.766) y se le suma los valores de cada factor para determinar la eficiencia de remoción promedio de la DQO en cada tratamiento:

$$\begin{aligned}
 \text{Remoción de} &= 48.766 - 21.50 \text{ Intensidad (A)}_{_3} + 12.48 \text{ Intensidad (A)}_{_4} \\
 \text{DQO (\%)} &+ 9.02 \text{ Intensidad (A)}_{_5} - 3.689 \text{ Distancia (mm)}_{_0.4} \\
 &+ 3.689 \text{ Distancia (mm)}_{_0.8} \\
 &- 2.27 \text{ Intensidad (A)*Distancia (mm)}_{_3 0.4} \\
 &+ 2.27 \text{ Intensidad (A)*Distancia (mm)}_{_3 0.8} \\
 &+ 0.99 \text{ Intensidad (A)*Distancia (mm)}_{_4 0.4} \\
 &- 0.99 \text{ Intensidad (A)*Distancia (mm)}_{_4 0.8} \\
 &+ 1.28 \text{ Intensidad (A)*Distancia (mm)}_{_5 0.4} \\
 &- 1.28 \text{ Intensidad (A)*Distancia (mm)}_{_5 0.8}
 \end{aligned}$$

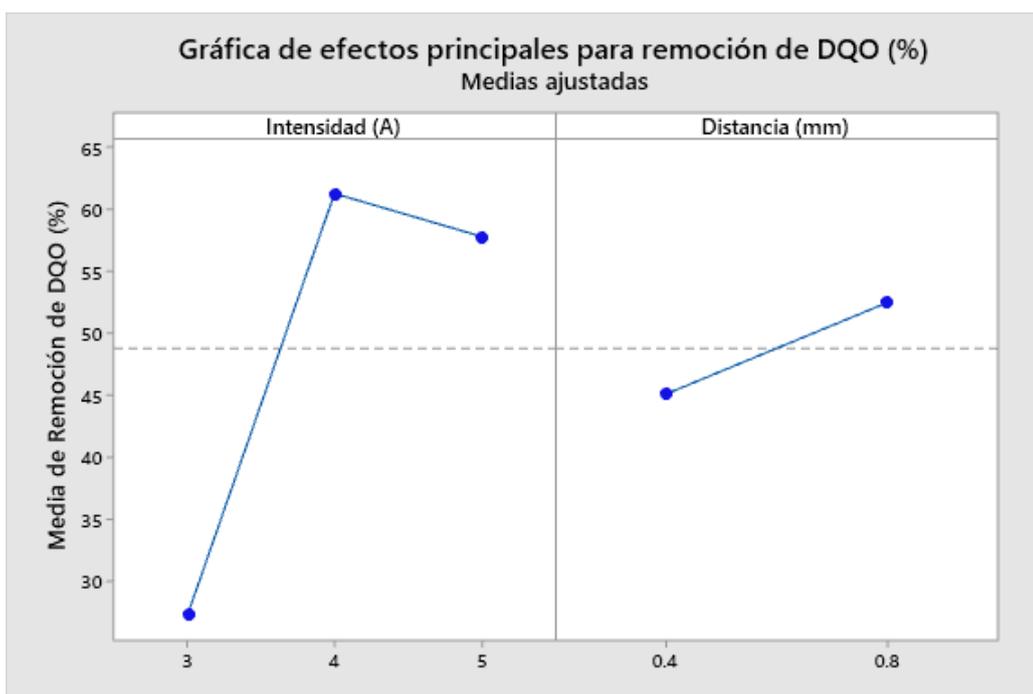
3.3.5. Gráficas de efectos principales en el proceso de electrocoagulación

En la Figura 13, a una intensidad de corriente de 4 A tiene un mayor efecto en la remoción de la DQO del agua residual proveniente de lavadora en un tiempo de tratamiento de 15 minutos.

A una distancia entre electrodos de 0.8 mm se logra remover en mayor proporción de la DQO del agua residual proveniente de lavadora en un tiempo de tratamiento de 15 minutos.

Figura 13

Gráfica de efectos principales para la remoción de la DQO.



Nota: Resultados obtenidos en el software estadístico Minitab 19.

CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

4.1. Discusión

De acuerdo a la Tabla 6, desde el planteamiento de análisis de caracterización inicial del agua procedente de lavadoras, arrojaron concentraciones de 705.30 mg/L del parámetro de Demanda Química de oxígeno (DQO) mientras en la investigación por parte de (Cuba Tello, 2020) se determinó , una concentración de 109 mg/l previo al tratamiento de aguas residuales lo cual, se encuentra en un rango inferior a nuestra presente tesis de investigación debido a que la unidad de análisis fueron de lavadoras industriales de condominios jardines de Santa Clara Ate Vitarte lo cuales la población usa aditivos como detergentes ecológicos, suavizantes etc. sin embargo, en contraste con la autora (Acuña, 2018) registro un rango de 16 156 mg/L lo cual demuestra que las muestras recogidas en este punto son mucho más elevado ya que , son aguas no domésticas provenientes de actividades de matadero de bovino entre otras especies, cabe precisar que este incremento podría estar relacionado a una mayor producción por parte de dichos establecimientos en tanto se estaría generando el vertido de gran cantidad de DQO algún tipo de químico para el lavado del establecimiento .

Correspondiente al parámetro de Solidos Totales Suspendedos (STS) se obtuvo una concentración de 195.00mg/l de STS en dicha investigación la concentración que no supera notablemente autores como (Acuña, 2018) que obtuvo 1100 mg/l en su análisis de caracterización sin embargo; (Cuba Tello, 2020) arrojaron 615 mg/l superando las concentraciones de las descarga de aguas residuales al sistema de alcantarillado de acuerdo con los Valores Máximos Admisibles (VMA) dicho resultado superan los estándares en ambas tesis esto demuestra la importancia de realizar la caracterización antes de proceder con los tratamientos.

Correspondiente a los resultados post tratamiento, de acuerdo a la Tabla 8, se precisa que el T-05 obtuvo el porcentaje óptimo de remoción para los parámetros evaluados, alcanzando una remoción de 63.94% máximo quienes emplearon 4 A y 0.8 mm entre la distancia de electrodos el tiempo fue de un rango de 15 minutos, dichos contraste con autores como (Olmos Bonilla & Moncaleano Guayara, 2021) quien obtuvo una remoción El prototipo de la celda alcanzó para el tratamiento de la muestra ambiental una eficiencia de remoción de DQO de 88.67% en las condiciones óptimas de funcionamiento de la celda son las implementadas en el ensayo 9, con un tiempo de retención de 30 minutos, una intensidad de corriente de 5 amperios, según precisa (Acuña Alcántara & Pujaico Lizarbe, 2019) nos permiten concluir que las mejores condiciones para obtener un mayor porcentaje de reducción de DQO en el tratamiento de las aguas residuales domésticas en el EBAR N°085 son a un pH ácido de 5.6, una intensidad de corriente de 5.0 amperios y un tiempo de tratamiento de 42 minutos; con los que se obtiene una eficiencia de 63.3% . lo cual significaría que un voltaje superior a 30 voltios y un tiempo mayor a 30 minutos si permite obtener mejores resultados de remoción hasta alcanzar un 100% pero depende en este caso el incremento de corriente de energía. Finalmente, se precisa que el T-05 que aplico los criterios operacionales de intensidad, Tiempo y distancia entre electrodos. (Ayuque Rojas, 2022) obtuvo un 92.5% respecto al parámetro DQO donde se deduce que al incrementar la densidad de corriente el tiempo en el proceso de electrocoagulación aumenta el porcentaje de remoción.

Por otro lado, (Yoselin L. Cangalaya Gonzales & Simeon Nuñez, 2019) quienes emplearon una separación de electrodos en 5 mm , con un tensión de 25 obtuvo una remoción mínima de 80,06% de DQO y una máxima de 91,93% de DQO, mientras para una separación de 15 mm se obtuvo una remoción mínima de 48,61% de DQO y una máxima de 66,84% de

DQO por lo tanto se confirma que a mayor distancia de separación de electrodos mayor es la remoción de DQO lo cual lo cual significaría que un intensidad de corriente si permite obtener mejores resultados de remoción.

Finalmente, se precisa que el autor (Acuña, 2018) obtuvo el porcentaje de remoción óptimo T6 con una remoción de 94.55% de Sólidos Suspending Totales (SST), un 97.20% de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) y un 97.00% de Demanda Química de Oxígeno (DQO), con un intensidad de corriente de 4 A y una distancia entre electrodos de 0.8 mm en un tiempo en 15 minutos para lo cual se estima que dichos factores si influyen significativamente en el proceso de electrocoagulación .

Según Vasquez (2020), en su estudio llegó a una reducción de los Sólidos Suspending Totales (SST) de 94.55% y un 97.00 % de Demanda Química de Oxígeno (DQO); y en nuestra investigación se llegó a una reducción de los Sólidos Suspending Totales (SST) de 81.31% y un 63.94 % de Demanda Química de Oxígeno (DQO) a las condiciones de 4 A de intensidad de corriente y 0.8 mm de distancia entre electrodos.

4.2. Conclusiones

- S determinó que las concentraciones de la caracterización inicial de las aguas residuales fueron: pH 7.26; Conductividad eléctrica de 1225 μ S/cm; DQO de 705.30 mg/L; Turbidez de 206 NTU; Solidos Totales Suspending de 195 mg/L y color de 1095 Pt-Co.
- A las condiciones de una intensidad de corriente de 4 A y una distancia entre electrodos de 0.8 mm se logró reducir las concentraciones de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) de 705.30 mg/L a 254.30 mg/L en un tiempo de tratamiento de 15 min.

- Se obtuvo el porcentaje de remoción óptimo T-05 con una remoción de se muestra que después del tratamiento por electrocoagulación se llegó a una máxima remoción de la DQO con el tratamiento con el T-05 del 63.94% y una mínima remoción de la DQO con el tratamiento T-03 del 21.31%. Ilegando a concluir la eficiencia de proceso de electrocoagulación.

4.3. Recomendaciones

- Revisar el equipo de fuente poder antes de inicio de las pruebas, así como ver que no tenga fuga de agua la celda de electrocoagulación.
- Evaluar las características de salida de la espuma generada durante el proceso de electrocoagulación mediante un controlador de tiempo.
- Realizar de preferencia repeticiones de los tratamientos a fin de tener una data general para la prueba estadística.

REFERENCIAS

Acuña Alcántara, G., & Pujaico Lizarbe, J. F. (2019). Condiciones óptimas de operación de una celda de electrocoagulación para la reducción de la Demanda Química de Oxígeno en aguas residuales domésticas. Perú.

Acuña, B. L. (2018). Aplicación del sistema de electrocoagulación a nivel de laboratorio con electrodos de aluminio y hierro para el tratamiento de aguas residuales del camal S.A.G.E.I.S.A. en el año 2018.

Arango Ruiz, Á. (2005). La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales. Revista Lasallista de Investigación, vol. 2, pp. 49-56.

Ayunque Rojas, J. C. (2022). Tratamiento de aguas residuales procedentes de lavadoras por el método de electrocoagulación en la ciudad de Huancavelica.

Cuba Tello, M. V. (2020). Tratamiento de agua residual procedente de lavadoras por el método de electrocoagulación para la reutilización en riego de vegetales - Ate. Lima, Perú: Unidad de Posgrado, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

Fernández Cirelli, A. (2012). El agua: un recurso esencial. Revista Química Viva, 11(3), 147-170. Recuperado el [fecha de Consulta 19 de Abril de 2022], de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=86325090002>

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2006). Metodología de la investigación. ((. Ed.), Editor)

Instituto de Toxicología de la defensa. (2016). Obtenido de Disponible:https://www.defensa.gob.es/itoxdef/Galerias/documentacion/protocolos/ficheros/PROTOCOLO_DE_TOMA_DE_MUESTRAS_DE_AGUA_RESIDUAL_ver_2.pdf

Kinney, & Taylor. (1998). Capítulo III metodología. Obtenido de Disponible: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lemg/lemaitre_w_n/capitulo3.pdf

La casa del electrodoméstico. (30 de Diciembre de 2021). Obtenido de Recuperado: <https://www.lacasadelectrodomestico.com/blog/consumo-agua-en-lavadora/>

Manrique Guerra, L. (2022). Electrocoagulación de efluentes con colorantes sintéticos de industria textil para la disminución de la Demanda Química de Oxígeno. Universidad Agraria de la Selva. Tingo María, Perú.

Moscoso Cavallini, J. C. (2011). Estudio de Opciones de Tratamiento y Reuso De Aguas Residuales En Lima Metropolitana. University of Stuttgart.

Olmos Bonilla, D. M., & Moncaleano Guayara, J. N. (2021). Evaluación de la eficiencia de la electrocoagulación en aguas residuales textiles utilizando como electrodo el aluminio.

Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental. (s.f.). Obtenido de https://www.oefa.gob.pe/?wpfb_dl=7827

Rea Marcos, L. M. (2016). Reducción de la demanda química (DQO) de las aguas residuales industriales de las balsas de tratamiento de una planta de disposición final de residuos aplicando electrocoagulación con electrodos de Fe/Al.

Reynolds, K. (2002). Tratamiento de Aguas Residuales en Latinoamérica: Identificación Del Problema. Obtenido de <https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2007/10/Tratamiento-aguas-residuales-Latinoamerica.pdf>

Ruiz. (2005). La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales. Revista Lasallista de investigación, 2(1), 49-56.

Ruíz. (2014). Tratamiento de aguas residuales mediante electrocoagulación: desarrollo y potencial de aplicación. Journal of Engineering and technology, 3(1).

Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento. (2008). Diagnóstico Situacional de los Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales en las EPS del Perú y Propuestas de Solución.

Vasquez Acuña, B. (2020). Aplicación del sistema de electrocoagulación a nivel de laboratorio con electrodos de aluminio y fierro para la reducción de los parámetros fisicoquímicos de las aguas residuales del camal S.A.G.E.I.S.A. en el año 2018.

Villabona Ortiz, A., Tejada Tovar, C., & Contreras Amaya, R. (2021). Electrocoagulations as an Alternative for the Removal of Chromium (VI) in solution. Tecnura. Obtenido de disponible:<https://doi.org/10.14483/22487638.17088>

Yoselin L. Cangalaya Gonzales, & Simeon Nuñez, Y. (2019). Evaluación de la tensión de corriente, tiempo de contacto y distancia entre electrodos en la reducción de materia orgánica de aguas para riego por electrocoagulación. Huancayo, Lima.

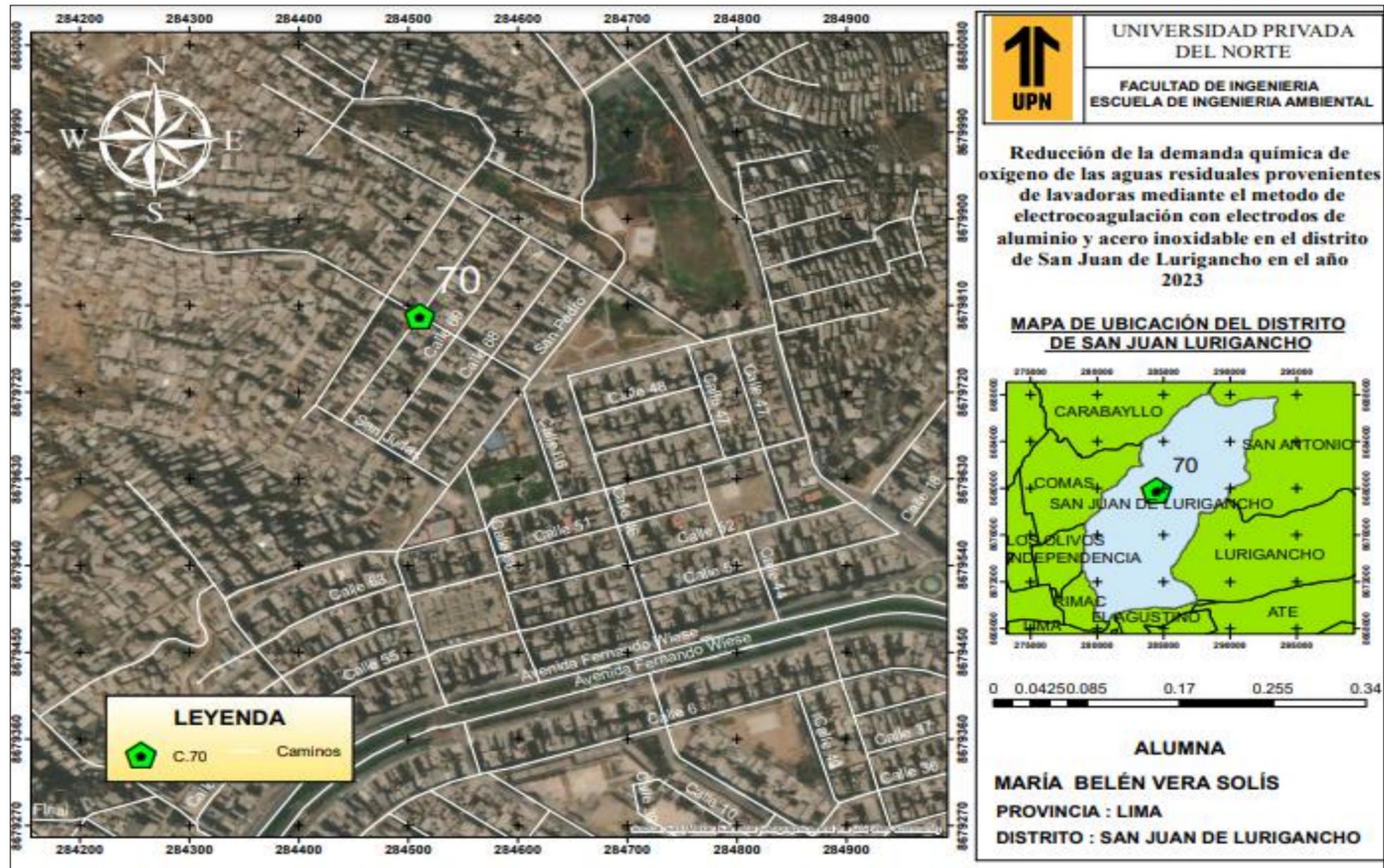
ANEXOS

Tabla 17. *Matriz de consistencia*

Reducción de la Demanda Química de Oxígeno de las aguas residuales provenientes de lavadoras mediante el método de electrocoagulación con electrodos de aluminio y acero inoxidable en el distrito de San Juan de Lurigancho en el año 2023.							
Problema	Objetivo	Hipótesis	Variables e Indicadores				
Problema General:	Objetivo General:	Hipótesis General:	Variable	Dimensiones	Indicadores	Niveles y Rango	
¿En qué medida el método de electrocoagulación a nivel de laboratorio con electrodos de aluminio y acero inoxidable permite la reducción de la Demanda Química de Oxígeno de las aguas residuales provenientes de lavadoras en el distrito de San Juan de Lurigancho en el año 2023?	Reducir la concentración de la Demanda Química de Oxígeno en las aguas residuales provenientes de lavadoras mediante el método electrocoagulación a nivel de laboratorio con electrodos de aluminio y acero inoxidable en el distrito de San Juan de Lurigancho en el año 2023.	Al aplicar el método de electrocoagulación a nivel de laboratorio con electrodos de aluminio y acero inoxidable reducirá significativamente la Demanda Química de Oxígeno de las aguas residuales provenientes de lavadoras en el distrito de San Juan de Lurigancho en el año 2023.	Variable Dependiente (Y) Aguas residuales provenientes de lavadoras	Demanda Química de Oxígeno (mg/L)	Reducción de la Demanda Química de Oxígeno (%)	Rango de porcentaje de reducción: Y > 60%	
Problemas Específicos:	Objetivos Específicos:	Hipótesis Específicas:					
¿Cuál es la caracterización de las residuales provenientes de lavadoras en el distrito de San Juan de Lurigancho antes de aplicar el método de electrocoagulación con electrodos de aluminio y acero inoxidable?	Realizar la caracterización de las aguas residuales provenientes de lavadoras en el distrito de San Juan de Lurigancho antes de aplicar el método de electrocoagulación con electrodos de aluminio y acero inoxidable.	Las concentraciones de los parámetros de la caracterización de las aguas residuales provenientes de lavadoras supera a los valores Máximos Admisibles del D.S. N° 010-2019-VIVIENDA.	Variable Independiente (X) Método de Electrocoagulación	Criterios de Operación		Condición de operación: 3 A	
¿Cuáles son las condiciones óptimas de la intensidad y distancia entre electrodos para llegar a la máxima reducción de la concentración de la Demanda Química de Oxígeno de las aguas residuales provenientes de lavadoras en el distrito de San Juan de Lurigancho?	Determinar las condiciones óptimas de la intensidad y distancia entre electrodos para llegar a la máxima reducción de la concentración de la Demanda Química de Oxígeno de las aguas residuales provenientes de lavadoras en el distrito de San Juan de Lurigancho.	Las condiciones óptimas de la intensidad y distancia entre electrodos influirán significativamente en la reducción de la concentración de la Demanda Química de Oxígeno de las aguas residuales provenientes de lavadoras en el distrito de San Juan de Lurigancho.				Intensidad de corriente (A)	4 A
¿Cuál será el porcentaje de reducción de la Demanda Química de Oxígeno de las aguas provenientes de lavadoras mediante el método de electrocoagulación con electrodos de aluminio y acero inoxidable en el distrito de San Juan de Lurigancho?	Determinar el porcentaje de reducción de la Demanda Química de Oxígeno de las aguas provenientes de lavadoras mediante el método de electrocoagulación con electrodos de aluminio y acero inoxidable en el distrito de San Juan de Lurigancho.	Mediante el método de electrocoagulación con los electrodos de aluminio y acero inoxidable se reducirá más del 60% de la Demanda Química de Oxígeno de las aguas residuales provenientes de lavadora mediante en el distrito de San Juan de Lurigancho en el año 2023.					5 A
						Condición de operación: Distancia entre electrodos (mm) 0.4 mm 0.8 mm	

Tipo y Diseño De Investigación	Población y Muestra	Técnicas e Instrumentos	Estadística a Utilizar
<p>Tipo:</p> <p>El proyecto de investigación tiene un propósito aplicado porque pretende dar solución a un problema específico o un método específico, para este trabajo de investigación se relaciona con el agua doméstica descargada de lavadoras sin pretratamiento. Utiliza un enfoque cuantitativo ya que recopila datos de laboratorio para probar hipótesis basadas en mediciones numéricas y análisis estadístico para modelar el comportamiento y probar teorías (Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2006) .</p> <p>Diseño:</p> <p>Se empleó el diseño experimental acorde al método específico empleado, así como se complementó con el corte pre-experimental (12), es decir, se manipuló a la variable independiente de estudio (electrocoagulación) con la finalidad de alcanzar un punto donde la eficiencia del tratamiento refleje un mayor porcentaje de remoción, tomando en cuenta un contexto de experimentación en laboratorio, de modo que la hipótesis validada se encuentre asociada con una potencial aplicación en un segundo momento (independiente) que son: intensidad, tiempo de retención , distancia entre electrodos. Por otro lado, este diseño requiere un grupo control experimental, con tal fin, determinar si el tratamiento ha generado alguna diferencia entre los resultados del grupo T0, por ello, se empleó 12 tratamiento y un control en la cual no se aplicó el tratamiento, solo se analizó con las características de los parámetros</p>	<p>Población:</p> <p>La población está determinada por las aguas residuales de las lavadoras domésticas, que corresponde al consumo de 42-62 litros de agua de lavado, y una lavadora con una capacidad de carga de 15 kg., ubicado en Mk Lote 5 Grupo 6 calle 70, Lima, Perú.</p> <p>Muestra:</p> <p>El método de muestreo para este estudio es de tipo no probabilístico (no aleatorio), ya que las muestras se recolectaron al azar , es decir, que se tomaron de diferentes muestras compuestas considerando las horas de operación de uso de la lavadoras , de las cuales se preparó 24 litros para su respectivo análisis antes, durante y después del proceso del método de electrocoagulación de las cuales, se determinó una muestra a representativa de 4 litros por cada tratamiento , los cuales fueron posteriormente analizadas en el laboratorio .</p> <p>Para la determinación del tamaño de la muestra compuesta se aplicó la siguiente formula según la expresión (Instituto de Toxicología de la Defensa, 2016):</p> <p>Ecuación 1 Fórmula para la determinación de volumen de muestra compuesta</p> <div style="text-align: center; border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 10px auto;"> $V_i = V \times \left(\frac{Q_i}{n}\right) \times Q_p$ </div> <p>Donde: V_i = Volumen de cada alícuota o porción de muestra, V = Volumen total a componer (pueden ser 2 L). Q_i = Caudal instantáneo de cada muestra Q_p = Caudal promedio durante el muestreo n = número de muestras tomadas</p> <p>Tipo de muestreo</p> <p>Dado el trabajo de investigación es de tipo de muestreo no probabilístico, sobre lo que en la cual se selecciona el número de muestras acorde al criterio y se selecciona con base en la conveniencia del investigador. Por esta razón , se empleó 4 litros , que fue la cantidad requerida por cada tratamiento .De acuerdo (Kinnear & Taylor, 1998). Estas también son conocidas como muestras dirigidas, ya que están orientadas por las características de la investigación, esta no se busca la representatividad de la población, sino el cuidado y el control de las dimensiones específicas de la materia de estudio, que permitan la recolección y el análisis de datos. Debido a ello, el muestreo se realizó en una sola fecha, tomando en consideración el día de generación de mayor producción de aguas domésticas provenientes del lavado de ropa.</p>	<p>Las técnicas de empleadas en la presente investigación fueron:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Observación directa: se recopilo información sobre la pregunta de investigación, conocer la realidad de la población y lo que se está haciendo para satisfacer las necesidades durante el muestreo y tratamiento general., • Revisiones Bibliográficas: Se utilizan como documentos tales como libros, artículos científicos, tesis y revistas relacionadas con el tema de investigación. Tales como, Redalyc y Scielo. • Análisis físico-químico: Para determinar la eficiencia de remoción de los parámetros físico-químicos procesados en la celda de electrocoagulación, se deben utilizar instrumentos que permitan obtener resultados. • Estadísticas: para este propósito se utilizó Microsoft Excel y Minitab Statistical Software19. <p>Las herramientas utilizadas incluyen:</p> <p>Para validación de los resultados:</p> <p>La validez y confiabilidad de las herramientas dependía de la aprobación de consultores, especialista o asesor de investigación.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cabe resaltar, que se recopilo información del área de investigación, mediante evidencia fotográfica del tiempo de muestreo asi como las características resaltantes del agua. • Informe de Ensayo y Cadena de Custodia - Caracterización (ANEXO n° 5) <p>Con este instrumento se organizó la información de la caracterización inicial del efluente previo tratamiento.</p> <p>Este instrumento permitió llevar acabo el control y vigilancia del muestreo, incluyendo los métodos de la toma de muestra, codificación, transporte y la definición de los parámetros a analizar</p> <ul style="list-style-type: none"> • Informe de Ensayo por parte del laboratorio externo SQA (ANEXO n° 6) <p>Se detalla, la información de los resultados obtenidos en los tratamientos.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Celda de electrocoagulación <p>Con este prototipo se detalló las medidas reales de la celda, lo cual se detalla las características del material</p>	<p>Estadística:</p> <p>Para el análisis de los datos se utilizaron los siguientes métodos:</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Programa de Microsoft Excel: se utilizó para llevar a cabo la organización de los datos y tabulación de datos obtenidos en los tratamientos y a su vez calcular hallar el porcentaje de remoción. ➤ Software estadístico Minitab 19: se utilizó para procesar los resultados obtenidos al aplicar y analizar pruebas estadísticas tales como: ➤ Prueba de Hipótesis Estadística <p>si se puede aceptar o rechazar una afirmación acerca de una población dependiendo de la evidencia proporcionada por una muestra de datos obtenidos en los tratamientos obtenidos.</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Análisis de Varianza(ANOVA) <p>Se desarrolló la estadística que compara la varianza entre la media (o media) de diferentes grupos en los diferentes tratamientos. Se utiliza en diferentes contextos para determinar si existen diferencias entre diferentes grupos de métodos.</p>

Figura 14. Plano de ubicación del muestreo.



Nota: Elaboración propia

Ilustración 1. Informe de ensayo de aguas domésticas procedentes de lavadoras emitido por el laboratorio Soluciones Químicas Ambientales SQA.



INFORME DE ENSAYO N° 007-2023

II. RESULTADOS

FECHA			15-02-2023						
CODIGO DE MUESTRA			AGUA DE LAVADO DOMÉSTICA						
DESCRIPCION DE MUESTRA			TOMA DE MUESTRA POR EL CLIENTE						
NRO. MUESTRA			T ₀	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆
ENSAYO	L.C.M	UNIDAD	RESULTADOS	RESULTADOS	RESULTADOS	RESULTADOS	RESULTADOS	RESULTADOS	RESULTADOS
Potencial de Hidrógeno	0.01	Unidad de pH	7.26	6.85	7.49	7.20	7.19	7.33	7.4
Conductividad Eléctrica	0.01	µS/cm	1225	1204	2101	1288	1317	1192	1210
Demanda Química De Oxígeno	3	mg/L	705.3	283.6	261.3	556	244.3	319.3	442.6
Turbidez	0.01	NTU	206	17	45	73	36	62	193
Color	3.0	Pl-Co	1095	326	509	982	479	1057	1830
Sólidos Totales Suspendidos	5.0	mg/L	195	14	36	69	32	53	173

"L.C.M.": Límite de Cuantificación del Método

Los resultados contenidos en el presente documento sólo están relacionados con los ítems ensayados.
Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce

Fecha: 16/02/2023 Página 2 de 3
Correo: ventas@sqaperu.com

Reducción de la Demanda Química de Oxígeno de las aguas residuales provenientes de lavadoras mediante el método de electrocoagulación con electrodos de aluminio y acero inoxidable en el distrito de San Juan de Lurigancho en el año 2023.

Ilustración 2. Toma de muestras del efluente de lavadora.

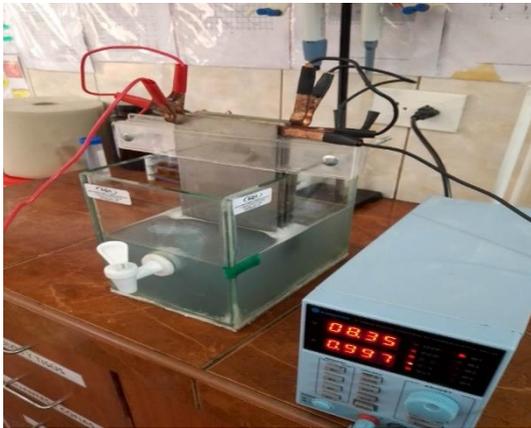


Toma de muestra

ANEXO n° 11. Materiales y traslado de las muestras

	
<p>Muestra de agua de lavadora</p>	<p>Recipiente de las muestras compuesta.</p>
	
<p>Muestra compuesta previo análisis</p>	<p>Metodología previo a los tratamientos</p>

ANEXO n° 13 Construcción del prototipo

	
<p>Instalación y conexión de los cables a la fuente de alimentación</p>	<p>Revisión de la celda de electrocoagulación</p>
	
<p>Fuente de alimentación 0-5 Amperios</p>	<p>Prototipo de electrocoagulación</p>

ANEXO n° 15. Proceso de tratamiento en laboratorio SQA

	
<p>Análisis descriptivo de la muestra tratada</p>	<p>Realización cadena de custodia</p>
	
<p>Placas de Aluminio y Acero Inoxidable</p>	<p>Pruebas con el fuente de poder</p>



Etiquetado de muestra



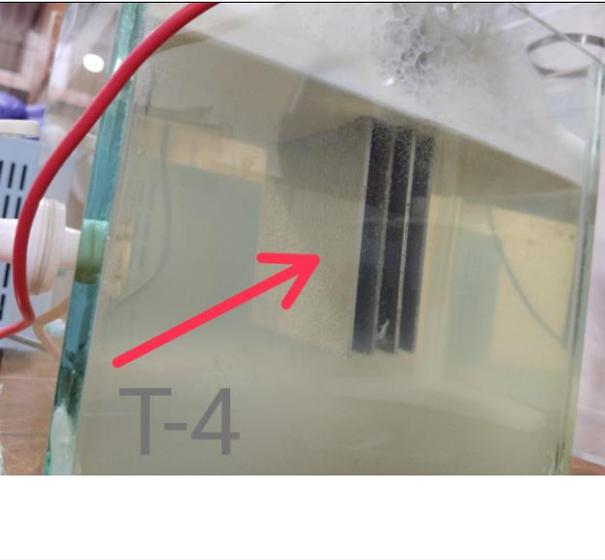
Presencia de espuma flotante en la parte superior



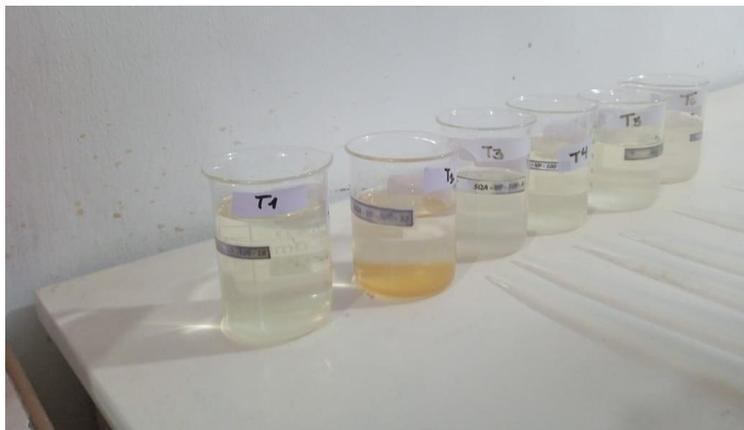
Muestreo para DQO



Medición de la cubeta

	
<p>Presencia de cambio de color y sedimentación</p>	<p>Presencia de una faja de color amarillento en la parte media de la celda</p>
	
<p>Presencia de color gris en la celda</p>	<p>Presencia de las placas debajo de la muestra de agua</p>

ANEXO n° 16. Post tratamiento DQO

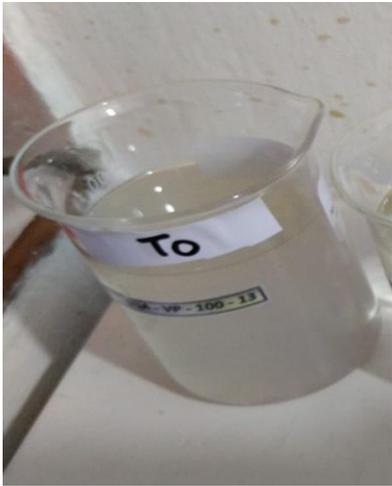
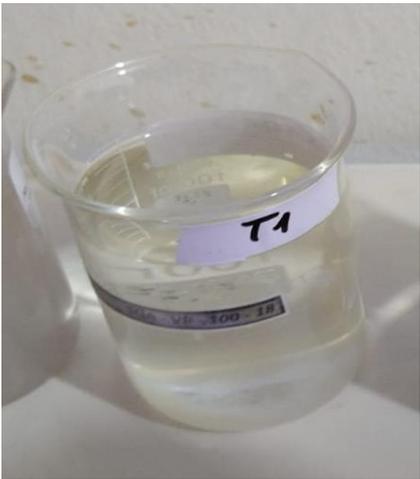
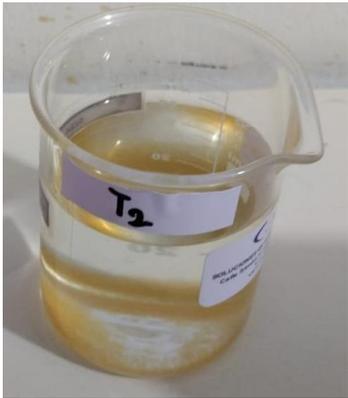
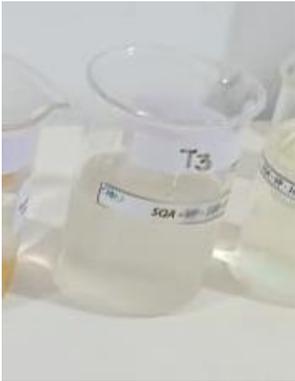


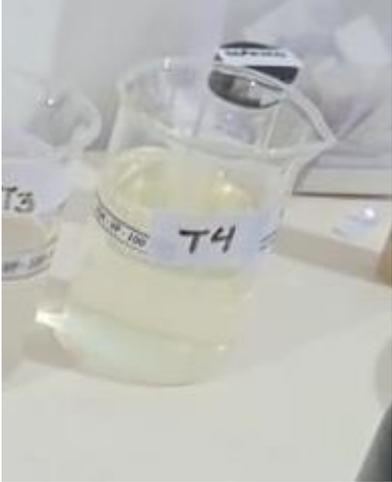
Muestra analizada de las 6 muestras



Colorímetro de color de las muestras para la determinación DQO

ANEXO n° 17. Tratamientos finales de las muestras analizadas con electrocoagulación

	
T6	T7
	
T8	T5

	
<p>T4</p>	<p>T3</p>
	
<p>T2</p>	<p>T1</p>

ANEXO n° 18. Electrodo pre y post tratamiento

	
<p>Electrodos de aluminio pre tratamiento</p>	<p>Electrodos de aluminio post tratamiento</p>
	
<p>Electrodos de hierro pre tratamiento</p>	<p>Electrodos de hierro post tratamiento</p>

Anexo n° 20 Matriz de Operacionalización de Variables

Matriz de Operacionalización de Variable					
Variable	Definición Concepto	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Índice
Aguas residuales de lavadoras / Variable Dependiente (X)	Se define como aquellas aguas que han sido modificadas o impurificadas por actividades del hombre, que representan un peligro y deben ser desechadas contemplando un tratamiento previo a fin de evitar el deterioro de los cursos de agua a los cuales es vertido o a la red de alcantarillado Espigares & Pérez. (2010).	Los efluentes líquidos son aguas residuales que poseen características modificadas según la actividad para la cual fue utilizada previamente, sin embargo, en su estado actual ya no posee utilidad y por ende debe ser tratada y desechada.	Demanda Química de Oxígeno (mg/L)	Reducción de la Demanda Química de Oxígeno (%)	Rango de porcentaje de reducción: Y > 60%
Método de Electrocoagulación / Variable Independiente (Y)	Según Ruiz. (2005), El método de electrocoagulación es conocido como un proceso que requiere la utilización de energía eléctrica para la remoción de contaminantes. La característica principal de este método radica en los electrodos de sacrificio (aluminio y hierro), los cuales permiten la formación de agregados, produciendo partículas sólidas que luego precipitan.	El método de electrocoagulación es entendido como el proceso que permite el tratamiento de aguas residuales mediante la aplicación de energía eléctrica y la utilización de electrodos, los cuales hacen posible la aglomeración de las partículas y por ende la precipitación de estas.	Criterios Operacionales	Intensidad de corriente (A)	Condición de Efectividad: 3 A 4 A 5 A
				Distancia entre electrodos (mm)	Condición de Efectividad: 0.4 mm 0.8 mm

Nota: Se planteo de acuerdo a los criterios planteados de las variables.