

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CALLAO
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA



**“REMOCIÓN DE LOS CONTAMINANTES EN
EFLUENTES LÍQUIDOS DE UNA PLANTA TEXTIL
MEDIANTE EL MÉTODO DE ELECTROCOAGULACIÓN”**

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO QUÍMICO

AUTORES

MARIA LUISA, TUPIA MONTES
SUYEY SOFÍA, VALERIO CLAUDIO

Handwritten signatures of the authors, Maria Luisa Tupia Montes and Suyey Sofía Valerio Claudio.

ASESOR

MG. GLADIS ENITH, REYNA MENDOZA

Handwritten signature of the advisor, MG. Gladis Enith Reyna Mendoza.

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

CALLAO, 2023
PERÚ



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN**



N° 016-2023-UIIQ-FIQ-V

EL DIRECTOR DE LA UNIDAD DE INVESTIGACIÓN DE INGENIERÍA QUÍMICA DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO, que suscribe:

HACE CONSTAR:

Que, las señoritas **TUPIA MONTES MARIA LUISA y VALERIO CLAUDIO SUYEY SOFÍA**, Bachilleres de la Facultad de Ingeniería Química con **Códigos N° 101005-I y 1116120462** respectivamente, han presentado su Tesis titulada **"REMOCIÓN DE LOS CONTAMINANTES EN EFLUENTES LÍQUIDOS DE UNA PLANTA TEXTIL MEDIANTE EL MÉTODO DE ELECTROCOAGULACIÓN"** la cual al ser revisada con el sistema OURIGINAL, se encontró un 13% de similitud (se adjunta informe N.° D163882467); por lo que la Unidad de Investigación de Ingeniería Química, expide la presente **CONSTANCIA DE AUTENTICIDAD** a solicitud de las interesadas para los fines que estimen conveniente.

Bellavista, 14 de abril de 2023



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

Dr. LUIS AMÉRICO CARRASCO VENEGAS
DIRECTOR DE LA UNIDAD DE INVESTIGACIÓN

INFORMACIÓN BÁSICA

FACULTAD: Ingeniería Química

UNIDAD DE INVESTIGACIÓN: De la Facultad de Ingeniería Química

TÍTULO: Remoción de los contaminantes en efluentes líquidos de una planta textil mediante el método de electrocoagulación

AUTORES / CÓDIGO ORCID / DNI :

Maria Luisa, Tupia Montes / 0000-0002-5701-9154 / 46880127

Suyey Sofía, Valerio Claudio / 0000-0001-9134-5386 / 47951584

ASESOR / CÓDIGO ORCID / DNI :

Mg. Gladis Enith, Reyna Mendoza / 0000-0002-7400-6558 / 07836885

LUGAR DE EJECUCIÓN: Empresa Soluciones Químicas Ambientales SQA S.A.C

UNIDAD DE ANÁLISIS: Efluente líquido de una planta textil

TIPO / ENFOQUE / DISEÑO DE INVESTIGACIÓN:

Aplicada / Cuantitativo / Experimental

TEMA OCDE: 2.04.02 Ingeniería de Proceso

HOJA DE REFERENCIA DEL JURADO Y APROBACIÓN

La presente Tesis fue sustentada por los Bachilleres TUPIA MONTES MARIA LUISA y VALERIO CLAUDIO SUYEY SOFÍA ante el Jurado de Sustentación de Tesis conformado por los siguientes docentes ordinarios de la Universidad Nacional del Callao:

Ing. Mg. DIAZ BRAVO PABLO BELIZARIO	Presidente
Ing. Mg. MACHACA GONZALEZ LEONARDO FELIX	Secretario
Lic. Mg. RODRIGUEZ CHUQUIMANGO SANTOS PANTALEÓN	Vocal
Lic. Dr. TRUJILLO PEREZ SALVADOR APOLINAR	Miembro Suplente
Ing. Mg. REYNA MENDOZA GLADIS ENITH	Asesora

Tal como está asentado en el Libro de actas N° 1 Folio N° 122 y Acta N° 121 de fecha 30 de abril del 2023, para optar el Título Profesional de Ingeniero Químico en la Modalidad de Tesis con Ciclo de Tesis, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 27 del Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad Nacional del Callao, aprobado por Resolución de Consejo Universitario N° 099–2021–CU del 30 de junio de 2021

DEDICATORIA

Dedicamos la presente tesis a nuestros padres, familiares y amigos que nos brindaron su apoyo incondicional en nuestra etapa universitaria y la realización de la presente investigación.

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a nuestros profesores de la facultad de ingeniería química los cuales compartieron sus conocimientos durante nuestra formación universitaria.

A nuestra asesora Mg. Gladys Reyna Mendoza por su constante asesoría y apoyo durante el proceso de la investigación.

A la empresa SQA S.A.C por su asesoría y apoyo en el análisis de la investigación

ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS	3
ÍNDICE DE FIGURAS	4
ÍNDICE DE ABREVIATURAS	5
RESUMEN	6
ABSTRACT	7
INTRODUCCIÓN	8
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	9
1.1. Descripción de la realidad problemática	9
1.2. Formulación del problema	10
1.2.1. Problema general	10
1.2.2. Problemas específicos	10
1.3. Objetivos	10
1.3.1. Objetivo general	10
1.3.2. Objetivos específicos	10
1.4. Justificación.....	10
1.5. Delimitantes de la investigación	11
1.5.1. Teórica	11
1.5.2. Temporal	11
1.5.3. Espacial	11
II. MARCO TEÓRICO.....	12
2.1. Antecedentes: Internacional y nacional	12
2.1.1. Antecedentes internacionales.....	12
2.1.2. Antecedentes nacionales	14
2.2. Bases teóricas.....	17
2.2.1. Aguas residuales en la industria textil.....	17
2.2.2. Tratamientos de remoción de contaminantes en aguas residuales	25
2.2.3. Electrocoagulación	26
2.3. Marco conceptual.....	31

2.4.	Definición de términos básicos	33
III.	HIPÓTESIS Y VARIABLES	34
3.1.	Hipótesis	34
3.1.1.	Operacionalización de variables	34
IV.	METODOLOGÍA DEL PROYECTO	36
4.1.	Diseño metodológico	36
4.2.	Método de investigación	37
4.3.	Población y muestra	42
4.3.1.	Población	42
4.3.2.	Muestra	42
4.4.	Lugar de estudio y periodo desarrollado	42
4.5.	Técnicas e instrumentos para la recolección de la información.	42
4.5.1.	Técnicas para la recolección de información	42
4.5.2.	Equipos y materiales	43
4.6.	Análisis y procesamiento de datos	44
4.7.	Aspectos éticos en investigación	44
V.	RESULTADOS	45
5.1.	Resultados descriptivos	45
5.2.	Resultados inferenciales	45
5.3.	Otro tipo de resultados	54
VI.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	56
6.1.	Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados	56
6.2.	Contrastación de los resultados con otros estudios similares	57
6.3.	Responsabilidad ética de acuerdo a los reglamentos vigentes	58
VII.	CONCLUSIONES	59
VIII.	RECOMENDACIONES	60
IX.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61
	ANEXOS	68

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Carga contaminante en los sectores textiles	19
Tabla 2	Operaciones realizadas según el tipo de fibra	19
Tabla 3	Principales procesos en la industria textil	20
Tabla 4	Clasificación de colorantes por método de aplicación	23
Tabla 5	Grado de colorantes por tipo de fibra	24
Tabla 6	VMA para descarga de agua residual no doméstico	25
Tabla 7	Operacionalización de la variable	35
Tabla 8	Rango y notación de factores (variables independientes)	36
Tabla 9	Diseño experimental de variables	36
Tabla 10	Características fisicoquímicas del efluente	45
Tabla 11	DQO, Color, SST final, Amperaje, pH y Energía consumida	45
Tabla 12	Porcentaje de remoción de DQO, Color y SST promedios	46
Tabla 13	Coeficientes codificados en DQO, Color y SST	47
Tabla 14	Resumen del modelo en Color, DQO y SST	47
Tabla 15	Análisis de Varianza en DQO, Color y SST	48
Tabla 16	Ecuación de regresión de Color, DQO y SST	49

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Flujo del proceso del teñido de Textil el Amazonas S.A.	21
Figura 2 Interacciones en el proceso de electrocoagulación	28
Figura 3 Reactores para electrocoagulación tipo batch.....	30
Figura 4 Etapas de la investigación	37
Figura 5 Toma de muestra del efluente.....	37
Figura 6 Esquema de la celda electroquímica.....	38
Figura 7 Acondicionamiento de la celda de electrocoagulación	39
Figura 8 Tratamiento de la muestra	40
Figura 9 Diagrama de Pareto de efectos estandarizados en DQO	49
Figura 10 Diagrama de Pareto de efectos estandarizados en Color	50
Figura 11 Diagrama de Pareto de efectos estandarizados en SST	50
Figura 12 Efecto del voltaje en el % de Remoción de DQO	51
Figura 13 Efecto del voltaje en el % de Remoción de Color.....	51
Figura 14 Efecto del voltaje en el % de Remoción de SST	52
Figura 15 Comportamiento del % de remoción de DQO, Color y SST	52
Figura 16 Efectos principales para Y1 (%de remoción de DQO).....	52
Figura 17 Efectos principales para Y2 (%Remoción de Color)	53
Figura 18 Efectos principales para Y3 (%Remoción de SST)	54
Figura 19 Comportamiento del pH y la intensidad de corriente	55
Figura 20 Comportamiento de la energía consumida durante el tratamiento.	55

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

DBO: Demanda bioquímica de oxígeno

DQO: Demanda química de oxígeno

EC: Electrocoagulación

ECA. Estándar de Calidad Ambiental

pH. Potencial de hidrógeno

SDT: Sólidos disueltos totales

SST. Sólidos suspendidos totales

TEA: Textil El Amazonas

VMA. Valores máximos admisibles

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo la remoción de los contaminantes de color, DQO y SST en efluentes líquidos de una planta textil mediante el método de electrocoagulación. Se realizó la caracterización fisicoquímica del efluente de TEA, encontrando los valores de Color 547.6 Pt-Co, DQO 402 mg/L, SST 156 mg/L, SDT 1981.6 mg/L, Turbidez 83.3 NTU, Conductividad 3920 uS/cm y pH 7.06. Para el proceso de electrocoagulación, se utilizó el diseño factorial de dos factores voltaje (5,10,15) V y tiempo de tratamiento (15,30,45) min, trabajando con 3 electrodos de hierro como ánodo y 3 electrodos de aluminio como cátodo, colocados de forma intercalada con una separación de 10 mm entre las placas, con conexión monopolar en paralelo y a un pH neutro. Como resultado se alcanzó una remoción de demanda química de oxígeno (DQO) de 86,46% y de color de 95,74% a 15 voltios y 45 minutos, asimismo para sólidos suspendidos totales (SST) una remoción de 82,48 % a 15 V y tiempo de 30 minutos. Se concluye que el tratamiento por electrocoagulación es un método eficiente para ser empleado en el tratamiento de aguas residuales textiles dado que la industria textil es la segunda actividad más contaminante en el mundo.

Palabras clave: Electrocoagulación, agua residual textil, Demanda Química de Oxígeno, Color, Sólidos Suspendidos Totales.

ABSTRACT

The objective of this investigation was the removal of color, COD and TSS contaminants in liquid effluents from a textile plant using the electrocoagulation method. The physicochemical characterization of the TEA effluent was carried out, finding the values of Color 547.6 Pt-Co, COD 402 mg/L, TSS 156 mg/L, SDT 1981.6 mg/L, Turbidity 83.3 NTU, Conductivity 3920 uS/cm and pH 7.06. For the electrocoagulation process, the factorial design of two voltage factors (5,10,15) V and treatment time (15,30,45) min was used, working with 3 iron electrodes as anode and 3 aluminum electrodes as cathode, placed intercalated with a separation of 10 mm between the plates, with monopolar connection in parallel and at a neutral pH. As a result, a removal of chemical oxygen demand (COD) of 86.46% and color of 95.74% at 15 volts and 45 minutes was achieved, likewise for total suspended solids (TSS) a removal of 82.48% at 15 V and time of 30 minutes. It is concluded that electrocoagulation treatment is an efficient method to be used in the treatment of textile wastewater since the textile industry is the second most polluting activity in the world.

Keywords: Electrocoagulation, textile wastewater, Chemical Oxygen Demand, Color, Total Suspended Solids.

INTRODUCCIÓN

La industria textil genera en sus procesos grandes volúmenes de aguas residuales, estas aguas residuales se caracterizan por tener altos valores de DQO, DBO, turbidez, grasas, sulfuros, materia orgánica, materia inorgánica, metales pesados, colorantes, entre otros, por lo cual la industria textil es considerada una de las industrias más contaminantes, pues dañan el sistema de alcantarillado, generando un riesgo potencial si se vierten sin un previo tratamiento [1].

El tratamiento de las aguas residuales de la industria textil depende de los procesos, en el caso específico del proceso de teñido de hilos de poliéster y algodón actualmente son tratadas mediante el método de coagulación – floculación la cual requiere el uso de polímeros sintéticos, los cuales al ser usado en exceso generan sobrecostos en el tratamiento y una mayor contaminación.

Una alternativa a los tratamientos químicos y biológicos para la mitigación de carga contaminante en los efluentes en la industria textil es la electrocoagulación, esta se basa en la formación de un coagulante en la celda de electrocoagulación, el cual se genera por la corriente eléctrica aplicada al agua residual a través de los electrodos de la celda de electrocoagulación, donde se generan cationes metálicos en el ánodo, mientras que en el cátodo se liberan aniones hidroxilo e hidrógeno, aniones y cationes luego forman óxidos e hidróxidos metálicos que actúan como coagulantes en el proceso de electrocoagulación, resultando su implementación eficiente para la reducción de color, DQO y SST.

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción de la realidad problemática

La industria textil es después de la industria del petróleo la segunda industria más contaminante del planeta, produciendo el 20% de las aguas residuales [2].

La materia prima más importante en la industria textil es el algodón, esta fibra es la que consume mayor cantidad de agua en el proceso de tintura frente a otras fibras, el consumo promedio es de 30 - 150 L de agua / kg de material textil [3].

De acuerdo con la UNESCO la proporción promedio de aguas residuales que se trata de forma segura en la región América Latina y el Caribe, es de apenas un 40%, el 2018 la proporción de aguas residuales tratadas adecuadamente fue del 39% en Perú [4].

La empresa Textil el Amazonas dentro de su proceso de producción en el área de tintorería, tiñe algodón y poliéster generando gran cantidad de efluentes contaminados, los cuales actualmente son tratados mediante el proceso fisicoquímico coagulación-floculación, haciendo uso de coagulantes y polímeros sintéticos para disminuir la carga contaminante del efluente, lo cual de acuerdo con lo observado no es suficiente. Es por ello que mediante el método de electrocoagulación se considera las ventajas de reducir el consumo de químicos, los costos de operación, generando mayor eficiencia de remoción de la carga contaminante de los efluentes y reduciendo el impacto ambiental.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema general

¿Es posible remover los contaminantes de color, DQO y SST en efluentes líquidos de una planta textil mediante el método de electrocoagulación?

1.2.2. Problemas específicos

- a) ¿Cuáles son las características fisicoquímicas en el efluente líquido de una planta textil?
- b) ¿Cuáles son los parámetros operacionales de proceso de electrocoagulación para lograr la remoción de los contaminantes de color, DQO y SST en el efluente líquido de una planta textil?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Remover los contaminantes de color, DQO y SST de la carga del efluente de una planta textil mediante el método de electrocoagulación.

1.3.2. Objetivos específicos

- a) Caracterizar fisicoquímicamente el efluente líquido de una planta textil
- b) Determinar los parámetros operacionales del proceso de electrocoagulación para la remoción de contaminantes de color, DQO y SST en el efluente líquido de una planta textil.

1.4. Justificación

El tratamiento de los efluentes de la industria textil mediante la electrocoagulación aportará conocimiento de una técnica no convencional, disminuyendo el uso de reactivos químicos.

La electrocoagulación es ventajosa en comparación con la coagulación convencional, ya que al no hacer uso de coagulante se considera un aporte económico por el ahorro en el consumo de químicos; y espacios de almacenamiento

de químicos, así como de reducción en la generación de lodos, segregando así menor cantidad de residuos que disminuyen los costos de su disposición final.

Los resultados de esta investigación también contribuyen a la reducción de efluentes contaminantes en el alcantarillado alcanzando niveles permisibles según la normativa vigente D.S.010-2019 para la descarga de aguas residuales no domésticas y evitando de esta manera dañar la infraestructura de los alcantarillados, y las grandes multas por incumplimiento.

1.5. Delimitantes de la investigación

1.5.1. Teórica

Esta investigación se enmarcó en la teoría de la electroquímica específicamente la electrocoagulación, los principios básicos de teñido de fibras naturales y sintéticas, la teoría de tratamiento de aguas residuales industriales y las normas técnicas Sthandar Methods for the Examination of Water and Wastewater (SMEWW-APHA-AWWA-WEF).

1.5.2. Temporal

El teñido de los hilos en la planta de estudio es un proceso continuo durante todo el año, por lo que el tratamiento es aplicable en todo momento; esta investigación se realizó entre los meses de diciembre del 2022 a marzo del 2023.

1.5.3. Espacial

La no disponibilidad de equipos en la universidad fue limitante para la realización de corridas experimentales. La investigación y análisis se desarrolló en el laboratorio de la empresa Soluciones Químicas Ambientales SQA S.A.C.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes: Internacional y nacional

2.1.1. Antecedentes internacionales

En la investigación “Tratamiento de aguas residuales textiles por electrocoagulación empleando electrodo compuesto de Fe-Al” el autor analizó el efluente de un molino manual textil de Odisha en India, utilizó una muestra de agua sintética textil (colorante Reactive Black 5 (RB5), Congo Red (CR) y Disperse Blue 3 (DB3) a una concentración total de 200 mg/L junto con varios aditivos químicos como almidón, ácido acético, sacarosa, carbonato de sodio, hidróxido de sodio, ácido sulfúrico, detergente y cloruro de sodio) , analizó el efecto en los parámetros de electrocoagulación como el tiempo de reacción, la densidad de corriente y el voltaje. Usó 2 placas de ánodo Fe-Al; separación de placas de 3cm ,experimento con voltajes de 6 a 12 V y una densidad de corriente de 5-25A/m² , obteniendo condiciones óptimas a un pH de solución 8 , 12V y 80 min de tiempo de reacción con una remoción de 90% DQO y 94 % de color, concluyó también que el aumento de la corriente eléctrica se encuentra asociada con la reducción de la distancia entre electrodos, debido a que mayores colisiones de los iones mejoran la coagulación, para esta investigación se consumió 0,018 kWh/kg de tinte eliminado [5].

En la investigación “Determinación de los parámetros óptimos para el tratamiento de un efluente textil mediante coagulación-floculación química y electrocoagulación” los autores tuvieron como objetivo comparar la remoción del colorante Violeta de Metilo de un efluente textil, comparando los procesos de coagulación-floculación química y electrocoagulación a escala laboratorio, para la determinación de parámetros óptimos, realizaron pruebas de jarras en un tiempo de agitación de 30 segundos, con el coagulante químico WC-901 , pH 6.5-7.44 y a una velocidad de 200 rpm comparándolo con el método de electrocoagulación con electrodos de aluminio separados por 1.5 cm, 2A durante 5 minutos , concluyeron que el

tratamiento por electrocoagulación fue más eficiente a un pH óptimo del 6.5 con una remoción del 97% DQO en comparativa con la coagulación convencional con una remoción del 90% DQO [6].

En la investigación “Tratamiento de aguas residuales industriales mixtas por electrocoagulación y oxidación electroquímica indirecta” los autores analizaron aguas residuales provenientes de industrias mixtas realizando el tratamiento electroquímico de electrocoagulación usando electrodos de aluminio como ánodo y cátodo y los procesos de oxidación electroquímica indirecta haciendo uso de grafito, concluyeron que la conexión monopolar era más efectiva que la conexión bipolar para la eliminación de DQO y color de las aguas residuales. La conexión monopolar de electrodos de aluminio redujo la DQO en 55 % y el color en 56 %, con un voltaje aplicado de 1,5 V en 1 h de electrólisis. En el caso del proceso de oxidación electroquímica indirecta usando electrodos de grafito, las eficiencias de reducción de DQO y color fueron del 55 % y 99,8 %, respectivamente, durante 1 h de electrólisis realizada a pH 7,7, 4 Voltios y concentración de NaCl 1 g L⁻¹. Destacaron la importancia de la presencia de electrolitos en el proceso de oxidación electroquímica indirecta, ya que la adición externa de cloruro de sodio mejoró significativamente tanto la DQO como la eficiencia de eliminación del color. Observaron que la densidad de corriente aumenta la polarización en los electrodos, siendo el consumo de energía para la electrocoagulación con conexión bipolar mayor en comparación con la conexión monopolar [7].

En la investigación “Evaluación de la eficiencia de la electrocoagulación en aguas residuales textiles utilizando como electrodo el aluminio” los autores realizaron el tratamiento por electrocoagulación de una muestra de agua sintética (colorante Recolfix Índigo RC), realizaron las pruebas en una celda electrolítica de 2L usando 3 electrodos de aluminio (ánodo) y 3 de acero inoxidable (cátodo), conexión monopolar paralelo espesor de 0.2 cm, con una separación de 1 cm, en pH (6.5-9), evaluaron la eficiencia de remoción con la variación de parámetros de

tiempo(10,20,30) min, intensidad de corriente (1, 3, 5)A y área del electrodo 400 cm² ,para la electrocoagulación después de un tiempo de 30 min e intensidad de corriente de 5A , obtuvieron eficiencias de remoción de DQO(99,67%) y turbiedad(97,94%) [8].

En la investigación “Apropiación funcional de una celda de electrocoagulación con electrodos de hierro para el tratamiento de aguas residuales de la industria textilera” los autores analizaron el agua residual sintética (mezcla de colorante Índigo Carmín y agua destilada) en una celda de electrocoagulación de 2L con 2 electrodos de hierro (ánodo) , 2 electrodos de aluminio (cátodo), conexión en paralelo, espesor de 0.2 cm y área de contacto de 100 cm² e intercalados con separación de placas de 1 cm, evaluaron las muestras en intervalos de tiempo (10, 20 y 30) min, intensidad de corriente 1,3,5A, obtuvieron mejores resultados en un tiempo de 30 min y amperaje de 5A,eficiencias de remoción de DQO(60%), SDT(49%) , Turbidez(63%) [9].

2.1.2. Antecedentes nacionales

En la investigación “Estudio del efecto de la electrocoagulación en el tratamiento de aguas residuales a nivel de laboratorio en la planta de tratamiento de aguas residuales Covicorti en la ciudad de Trujillo – La Libertad” los autores usaron un reactor tipo Batch de 3 L, trabajaron con ánodos de Aluminio, Zinc y Hierro y como cátodo un electrodo de Ti, las mejores remociones se han obtenido a pH cercanos a 7 una remoción de 97.32% color y 96.95%DQO [10].

En la investigación “Evaluación de la eficiencia de una celda de electrocoagulación a escala laboratorio para el tratamiento de agua” el autor utilizó una celda de electrocoagulación en base a electrodos de aluminio y hierro, con agua residual de la industria de pintura, concluyendo que a una intensidad de corriente de 5 amperios, pH natural del efluente de 7.12 y tiempo de tratamiento de 15 minutos el

autor llegó a determinar una eficiencia promedio del 87% en la remoción del DQO, la cual cumple con la normativa ambiental vigente [11].

En la investigación “Influencia de la densidad de corriente y la distancia entre electrodos en la remoción del color y demanda química de oxígeno de efluentes de recurtido usando la electrocoagulación - ozonificación”. El autor realizó el tratamiento del efluente de recurtido de la curtiembre Ecológica del Norte mediante el método de electrocoagulación-ozonización en un reactor batch de 2L de capacidad con 2 electrodos uno de fierro como ánodo y otro de aluminio como cátodo y para la ozonización usó un reactor de columna de burbujeo tipo semi-batch, conectado a 2 frascos lavadores de gases, en ensayos previos de la EC. Encontró que la mayor remoción de color 96,2% y DQO 85,8%, fueron a las condiciones óptimas de densidad de corriente de 210 A/m² y distancia de electrodos de 2 cm y un tiempo de 60 minutos, a estas mismas condiciones se acopló el proceso de ozonización, y encontró que a un pH de 10 y tiempo de 90 minutos obtuvo la mejor remoción de color 90,8% y DQO 87,8%, notando que al agregar el equipo de oz disminuyó la remoción de color [12].

En la investigación “Remoción de colorantes en soluciones acuosas sintéticas por electrocoagulación aplicando energía generada por un panel solar” la autora acopló un sistema fotovoltaico al proceso electrocoagulación para ser abastecida de energía para el tratamiento de soluciones acuosas con colorantes cyanine blue. Logró determinar la eficiencia de remoción de dicho colorante, se prepararon soluciones acuosas con los colorantes a una concentración de 2g/L a pH de 3 y 10 para ser tratadas y estudiar la eficiencia de remoción de colorante del agua. Para la electrocoagulación después de un tiempo de 60 min obtuvo eficiencias de remoción de 70% y 97% a pH 3 y pH 10 respectivamente [13].

En la investigación “Influencia del tiempo y densidad de corriente para la remoción de DBO y turbidez de efluentes de industria papelera por electrocoagulación”, los

autores trataron el agua residual de la empresa Trupal proveniente de la máquina papelera. Llevaron a cabo el tratamiento a diferentes tiempos de (40, 60, 80) min y diferentes densidades de corriente (5,23; 10,45; 15,66; 20,90)mA/cm², haciendo uso de un reactor de vidrio tipo Batch de 2,6 L, y electrodos de hierro como cátodo y aluminio como ánodo, en paralelo, a un pH de 5. Las condiciones óptimas de remoción de turbidez (99,35%) fue a un tiempo de 60 min y una densidad de corriente de 20,90 mA/cm², asimismo lograron una remoción de DBO₅(86,22%) a un tiempo de 80 min y una densidad de corriente de 10, 45 mA/cm² [14].

En la investigación “Estudio comparativo y medición de la eficiencia entre los electrodos de sacrificio de hierro (Fe) y aluminio (Al) en la remoción de aceites y grasas por el proceso de electrocoagulación de aguas residuales”, los autores evaluaron el efecto de las variables independientes densidad de corriente (15,25,35) A/m² y pH (6,8) haciendo uso de electrodos de sacrificio (Al/Fe). Las condiciones óptimas de remoción de aceites y grasas se dieron cuando el pH y la densidad de corriente fueron de 8 y 25 A/m² respectivamente [15].

En la investigación “Estudio de los parámetros operacionales en el proceso de sinergia (electrocoagulación/uv) para la remoción de la turbiedad en aguas provenientes de lavadoras domésticas Huánuco 2020”. Realizaron pruebas en un reactor Batch/UV y evaluaron 3 parámetros (pH, voltaje, tiempo de tratamiento). Las condiciones óptimas de remoción que encontraron fue de la turbiedad en 99.54%, de igual modo para aceites y grasas se llegó a (5 mg/L), fosfatos (0.05 mg PO₄), dureza total (240.1 CaCO₃ mg/L), DQO (187.0 mg/L), DBO₅ (95.9 mg//L) y sólidos totales (940 mg/L) todo ello fue a condiciones de operación de 9.25 V, 51 minutos y pH a 4.95 [16].

En la investigación “Electrocoagulación de efluentes con colorantes sintéticos de industria textil para la disminución de la demanda química de oxígeno”. El autor tuvo como objetivo evaluar la disminución de la demanda química de oxígeno de

efluentes con colorantes sintéticos de una industria textil aplicando el método de electrocoagulación a escala de laboratorio con una muestra de solución 75% v/v del efluente con electrodos de 0.3 cm con una separación de 0.8 mm, en el tratamiento estadístico utilizó el análisis de varianza y la superficie de respuesta para evaluar el comportamiento de disminución de la DQO (%) en relación al voltaje y el tiempo de electrocoagulación (EC). En donde se obtuvo la disminución del 95% de la DQO del efluente con colorantes sintéticos en el tratamiento EC-11 en 20 minutos y 10 voltios con la muestra pura, y un 87% de la disminución de la DQO con la disolución al 75% v/v del efluente, lo cual demuestra que la electrocoagulación es altamente efectiva con colorantes sintéticos [17].

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Aguas residuales en la industria textil

Los efluentes líquidos que son generados al final de los diversos procesos de la industria textil contienen contaminantes de muy diversa naturaleza, entre ellos sales inorgánicas, almidón, peróxidos, EDTA, tensoactivos, enzimas, surfactantes, colorantes, metales y otros compuestos orgánicos de variada estructura [18].

El agua consumida en la producción textil depende del material a procesar (basado en el producto final que se quiere obtener), debido a que estos procesos son variados, estas aguas residuales presentan fluctuaciones considerables en muchos parámetros como la DQO, DBO, SST, Color, turbidez, conductividad, temperatura y salinidad [19].

A continuación, se detallan algunos de los parámetros:

Color. Se habla de color aparente si no se ha removido la turbiedad y de color verdadero del agua en caso contrario. Se determina mediante unidades de Hazen o unidades de color en escala PtCo. Estas mediciones se realizan a base de cloruro de cobalto (II) (CoCl_2) y cloro-platino de potasio (Cl_6PtK_2) usando espectrofotometría. El color del agua se debe principalmente a materia orgánica o minerales en suspensión o en estado coloidal [20].

DBO. La demanda biológica de oxígeno es un parámetro del agua que expresa la cantidad de oxígeno necesario para la oxidación bioquímica de compuestos orgánicos degradables existentes en el líquido residual, fijando condiciones de tiempo y temperatura (5 días y temperatura de 20 °C). [20].

DQO: La demanda química de oxígeno es la cantidad de oxígeno consumido por las materias orgánica e inorgánica existentes en el agua, que son oxidables en condiciones operatorias definidas. La medida corresponde a una estimación de las materias oxidables presentes en el agua. [21].

SST: Los sólidos suspendidos totales son el material constituido por los sólidos sedimentables, los sólidos suspendidos y coloidales [21].

De cualquier forma, el vertimiento de los efluentes textiles es un problema, no solo por su color sino también por las características tóxicas y mutagénicas, que tienen muchos tintes y sus productos de degradación [22].

Las características de las aguas residuales generadas en la industria textil en los procesos de teñido y acabado son:

- Gran variación de caudal y carga contaminante.
- Bajo contenido de material suspendido y coloidal.
- La mayoría de sus contaminantes son solubles y medianamente biodegradables.
- La demanda química de oxígeno es aproximadamente el doble que la de un efluente doméstico.
- Están exentas de microorganismos patógenos.
- Presentan elevada coloración y salinidad [23].

En la tabla 1 se presenta la carga contaminante en los diferentes sectores textiles.

Tabla 1*Carga contaminante en los sectores textiles*

Parámetro	Floca (poliéster)	Hilo	Tejido algodón
pH	7-12	7-11	8-13
DQO (mg/L)	3000-7000	500-1000	1500-3000
DBO (mg/L)	1000-2200	200-350	400-1000
Materias en suspensión (mg/L)	100-300	50-150	100-300
Volumen/peso(L/kg)	10-20	40-80	100-200
Color (Pt-Co/L)	400-4000	400-1000	400-3000

Fuente: Tabla adaptada de López [23]

Procesos en la industria textil. El proceso textil engloba el tratamiento de las fibras y tejidos durante el proceso en húmedo en: preparación, teñido y acabado. Estos procesos generan la mayoría de los efluentes líquidos en esta industria [23]. En la tabla 2, se presentan operaciones para los diferentes tipos de fibra (algodón, lana o poliéster)

Tabla 2*Operaciones realizadas según el tipo de fibra*

Fase	Operación	Tipo de fibra		
		Algodón	Lana	Poliéster
Preparación	Desencolado	*		*
	Desengrasado		*	
	Carbonización		*	
	Batanado		*	
	Descrudado	*		*
	Mercerizado	*		
	Blanqueo químico	*	*	
Tintura	Tintura/Estampación	*	*	*
Acabados	Acabados	*	*	*

Fuente: Tabla adaptada de López [23]

En la tabla 3 se detallan las sustancias químicas comúnmente empleadas en los principales procesos en la industria textil.

Tabla 3

Principales procesos en la industria textil

Proceso	Descripción	Sustancias químicas comúnmente empleadas
Descrude	Eliminación de impurezas naturales o adquiridas de las fibras sin tratar y tejidos grises	Hidróxido de sodio, silicato de sodio, detergentes.
Lavado	Proceso húmedo para eliminar restos que químicos o impurezas de las fibras	Álcali de jabón, detergentes no iónicos
Secado	Transferencia de calor hacia las fibras por medio de aire o vapor caliente	Ninguna
Engomado	Aplicar a los hilos una sustancia viscosa y adherente para dar resistencia.	Almidones celulosa, albuminas, alcohol polivinílico (PVA)
Desencolado	Eliminación de compuestos químicos usados en el engomado	Ácido mineral, enzimas
Mercerizado	Preparación de los hilos para que se adhiera mejor el colorante, dándole más brillo y generando un alargamiento de las fibras	Soda cáustica o álcali
Blanqueo	Aplicación de agentes químicos oxidantes y blanqueadores para mejorar el color blanco y facilitar el teñido	Peróxido de hidrógeno
Teñido	Proceso fisicoquímico que consiste en absorción de las partículas de colorantes sobre el material fibroso.	Colorantes naturales o sintéticos, pigmentos

Fuente: Tabla adaptada de Barrera [20]

Los hilos de algodón generalmente requieren de un mercerizado previo al teñido.

Mercerizado: Proceso mediante el cual se contrae a las fibras de algodón para darle estabilidad dimensional y en consecuencia brillo y mejor absorción de colorante. Es un tratamiento con álcali concentrado a bajas temperaturas por menos

de 1 min seguido de un lavado con agua en caliente [24], razón por la cual los efluentes líquidos textiles tienen carácter básico.

Teñido: El gasto de agua y energía en los procesos de tintura depende del sistema si es por lote o continuo, de las operaciones realizadas y de la maquinaria empleada. Se estima que el 10% de los tintes producidos se pierden en los efluentes acuosos del proceso de tintado textil. La razón principal de esta pérdida es el agotamiento incompleto de los tintes durante el proceso de tintado. La cantidad de tinte que se pierde depende del tipo de tinte, del proceso de aplicación, así como del tono de color deseado [22].

El proceso de teñido de hilos de algodón y poliéster, generalmente, se realiza según la figura 1.

Figura 1

Flujo del proceso del teñido de Textil el Amazonas S.A.



Fuente: Tomado de Merino [25]

Siendo otro de los principales contaminantes en la industria textil el color, el cual se describe a continuación.

Colorantes en la industria textil. Los colorantes están formados por un grupo de átomos los cuales administran color (cromóforos) y otros capaces de desarrollar el color, denominados auxocromos. Entre los grupos cromóforos más comunes tenemos a los azo (-N=N-), carbonilo (C=O), metilo (-CH₃), nitro y quinoides (los cuales son derivados de compuestos aromáticos).

Los grupos auxocromos sirven para fijar los colorantes al material o para hacerlos solubles en el medio utilizado para transferir el color, entre los más comunes se encuentran el benceno sulfonato (SO₃Na), grupos hidróxido (OH⁻) y los grupos amino (NH₂) [26].

En la actualidad existe una diversa gama de colorantes, los cuales se pueden clasificar de acuerdo con su estructura química o su método de aplicación en el rubro textil [18].

En la tabla 4 (página 23) se visualiza la clasificación de colorantes de acuerdo a su método de aplicación.

De acuerdo al método de aplicación del colorante y tipo de fibra se estima que un 50% del colorante utilizado en el proceso de tintura termina como descarga en el efluente [18].

En la tabla 5 (página 24) se expresa los porcentajes aproximados del grado de fijación del colorante en la fibra y su porcentaje de descarga en el efluente.

Las aguas residuales con colorantes sintéticos (usados en la industria) son consideradas las más complicadas de tratar, por este motivo los efluentes que presentan este tipo de colorante deben ser tratados adecuadamente previo a su descarga, de lo contrario esto afectaría directamente al ecosistema y cuerpos de agua [18].

Los procesos textiles generalmente son llevados a cabo a altas temperaturas, por lo que la temperatura del efluente es elevada, por otro lado, dependiendo del tipo de colorante a usar el pH del efluente puede variar y en consecuencia también su conductividad.

Tabla 4*Clasificación de colorantes por método de aplicación*

Tipo	Fibra	Método de aplicación	Grupo cromóforo
Ácidos	Nylon, lana, seda, papel, tintas y piel	Normalmente usado para baños de tintes neutros a ácidos	Azo, antraquinona, trifenilmetano, nitro y nitroso
Básicos	Papel, poliacrilonitrilos, nylon, poliéster y seda	Usado en baños de tintura básica	Azo, trimetilmetano, antraquinona
Directos	Algodón, rayón, piel y nylon	Para la Inmersión de fibra en un baño con un electrolito.	Azo
Dispersos	Poliéster, poliamida acetato, acrílicos plásticos	En forma de presión coloidal con altas temperaturas y presión. Unión del colorante por interacciones dipolares	Azo, antraquinona y nitro
Mordaz	Lana, piel y algodón	Aplicado en conjunto con sales de Cr	Azo y antraquinona
Reactivos	Algodón, lana, seda y nylon	Los grupos reactivos reaccionan con los grupos funcionales de la fibra para formar un enlace covalente en función de la temperatura y el pH	Azo y antraquinona
Al azufre	Algodón y rayón	-	Estructuras indeterminadas
A la tina	Algodón, rayón y lana	Reducido con hidrosulfito de sodio, luego de la impregnación se oxida	Antraquinona e índigos

Fuente: Tomado de Zaruma [18]

Tabla 5*Grado de colorantes por tipo de fibra*

Colorante	Tipo de fibra	Grado de fijación (%)	Descarga en efluentes (%)
Ácido	Poliamida	85-95	5-15
Básico	Acrílico	95-100	0-5
Directo	Celulosa	70-95	5-30
Disperso	poliéster	90-100	0-10
Reactivo	Celulosa	50-90	10-50
Sulfuro	Celulosa	60-90	10-40
Tina	Celulosa	80-95	5-20

Fuente: Tomado de Zaruma [18]

Las descargas de aguas residuales provenientes de las diferentes industrias a la red de alcantarillado generan un problema importante para el tratamiento de efluentes de agua residual, por lo que no se tiene que superar la normativa de valor máximo permisible (VMA) para efluentes operando a la red de desagüe la cual se ha dispuesto en Decreto Supremo N° 010 -2019 la cual se muestra en la tabla 6 [27].

Tabla 6*VMA para descarga de agua residual no doméstico*

Parámetro	Unidad	Simbología	VMA para descargas al sistema de alcantarillado
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	DBO5	500
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	DQO	1000
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	S.S.T	500
Aceites y Grasas	mg/L	A y G	100
Potencial Hidrógeno	Unidad	pH	6-9
Sólidos sedimentables	ml/l/h	S.S	8.5
Temperatura	°C	T	<35

Fuente: Tomado de Decreto Supremo N.º 010-2019-VIVIENDA [27]

2.2.2. Tratamientos de remoción de contaminantes en aguas residuales

Las aguas residuales provenientes de diferentes industrias se producen como resultados de los múltiples procedimientos de cada sector industrial en sus diferentes vías de producción. Las variedades en los tipos de efluentes abarcan diferentes tipos de contaminantes. Por ello es necesario un tratamiento del efluente previo a la descarga del cuerpo receptor natural o colector de aguas negras [28]. Existen varios métodos que pueden utilizarse para remover contaminantes de las aguas residuales textiles.

Métodos convencionales. En respuesta a diferentes clases de contaminantes solubles e insolubles en el agua se opta por una etapa primaria de coagulación y floculación, decantación para insolubles y un tratamiento biológico para los más solubles [20].

Existe un gran número de técnicas específicas en la eliminación de contaminantes en aguas residuales. Entre ellas, las más utilizadas en la industria textil son las siguientes:

- Tratamiento primario.
- Adsorción con carbono activo
- Tratamiento terciario: tecnología de membranas, ozonificación

Nuevas tecnologías. Las tecnologías convencionales son las más usadas en escala industrial, sin embargo, tiene un denominador común el cual es su elevado costo por lo cual se opta por nuevas tecnologías como [29]:

- Coagulación –floculación con coagulantes naturales
- Tratamientos enzimáticos
- Reactores anaeróbicos
- Proceso de oxidación avanzada (POA)
- Técnicas electroquímicas

2.2.3. Electrocoagulación

Es el proceso en el cual se desestabiliza las partículas de contaminantes que se encuentran suspendidos, emulsionadas o disueltas en un medio acuoso; esta técnica se da por la inducción de corriente eléctrica a través de placas metálicas paralelas o diversos materiales siendo el hierro y aluminio los más utilizados [30].

Durante el proceso de electrocoagulación se producen etapas de manera sucesiva como [31]: Formación de iones metálicos mediante la oxidación electrolítica del ánodo; hidrólisis de los iones metálicos debido a la disolución del ánodo los cuales generan hidróxidos metálicos y iones poliméricos; electrolisis del agua, el cual produce gases a través de la generación de pequeñas burbujas de oxígeno en el ánodo y de hidrógeno en el cátodo; desestabilizando los contaminantes y partículas en suspensión; aglomerando las partículas desestabilizadas para la formación de floculos; flotación de los contaminantes y precipitación de las partículas desestabilizadas.

Las reacciones electroquímicas con el metal (M) pueden resumirse como sigue [32].

En el ánodo (oxidación):



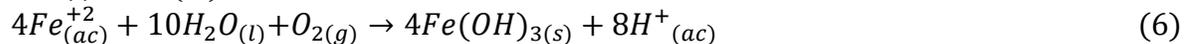
En el cátodo (reducción):



Reacciones del Hierro (Fe) cuando se utiliza como ánodo [31].

Mecanismo 1:

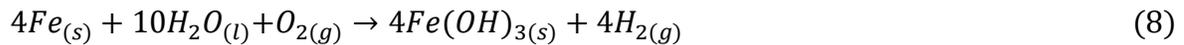
Ánodo:



Cátodo:

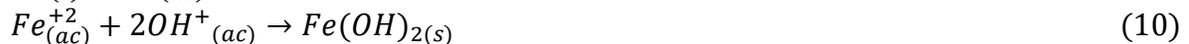


Reacción Global:



Mecanismo 2

Ánodo:



Cátodo:



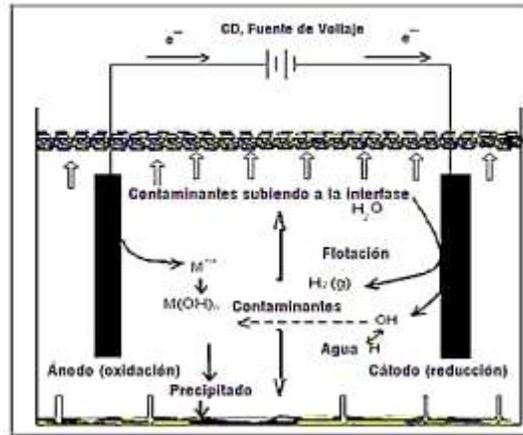
Reacción Global:



Debido a la oxidación en un sistema de electrolitos, el hierro produce forma de iones monoméricos, $Fe(OH)_3$ y complejos hidroxipoliméricos.

Figura 2

Interacciones en el proceso de electrocoagulación



Fuente: Tomado de Mollah [32]

Factores que afectan la electrocoagulación. Los factores que afectan la electrocoagulación son:

Tipo de material del electrodo. De acuerdo a estudios, se han seleccionado electrodos por su efectividad lo cual está relacionado con el potencial estándar de reducción, costo y accesibilidad, entre los cuales tenemos por ejemplo el aluminio, hierro, acero dulce y acero inoxidable. El aluminio y hierro son los metales mayormente usados en el proceso de electrocoagulación [33].

Tiempo de residencia. Las revisiones científicas reportan que cuanto mayor sea el tiempo de residencia el agua residual en la celda electrolítica genera una mayor cantidad de sólidos y micro burbujas, debido a la producción de gases, los cuales llevan consigo partículas de óxido a la superficie como espuma o una capa de sólidos, por lo cual también los flóculos aumentan su tamaño y se facilita la precipitación de los mismos.

Voltaje. El voltaje en la celda de electrocoagulación establece la especie que prevalece en la reacción que ocurre en el ánodo, la diferencia de potencial eléctrico es equitativo al costo de la energía y puede cambiar dependiendo de otros parámetros como la conductividad eléctrica, separación de placas, los materiales, entre otras características [34].

Densidad de corriente eléctrica. Es la corriente por área de electrodo, que determina la cantidad de iones metálicos generados por los electrodos por lo cual la disociación de iones metálicos es directamente proporcional a la densidad de corriente aplicada [33].

Cuando la corriente eléctrica es la adecuada las burbujas generadas actúan como floculante aumentando la densidad y el tamaño de los flóculos de contaminantes el cual facilita su separación física del agua tratada, sin embargo cuando se produce una sobreproducción de burbujas por una elevada corriente eléctrica se genera una inactivación o pasivamiento de los electrodos, pues se crea una película que altera las reacciones de oxidación - reducción, y como consecuencia genera ineficiencias en el proceso, igualmente una elevada producción de burbujas genera un aumento en la turbiedad de las muestras.

Mediante la siguiente ecuación determinamos el consumo de energía generado en la celda.

$$E_{Consumida} = \frac{V \cdot I \cdot t}{1000 \cdot Vol} \quad (13)$$

Donde:

E consumida: Energía Consumida KWh/m³

V: Voltaje (V)

I: Intensidad de corriente (A)

t: tiempo (min)

Vol: Volumen de la muestra (m³)

pH. El potencial de hidrógeno durante el tratamiento de electrocoagulación se refleja en la eficiencia, así como también en la solubilidad de los hidróxidos solubles formados por el metal conductor y electrolisis del agua. El rendimiento de tratamiento dependerá de la naturaleza del contaminante siendo una mayor eliminación de contaminantes valores cercanos a pH 7. [34].

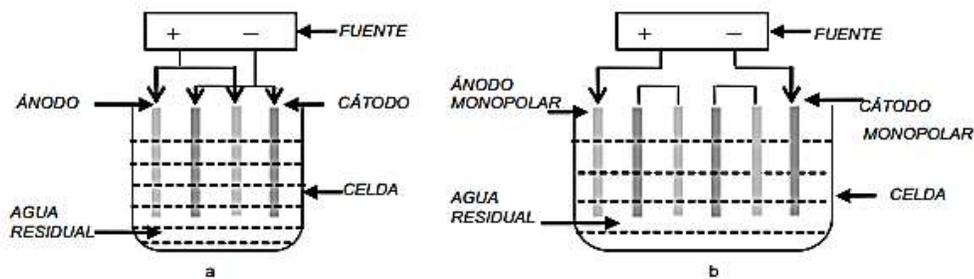
La celda electroquímica o reactor usado para la electrocoagulación puede ser tipo batch o continuo, en su forma simple de batch está formado por una celda electroquímica con un ánodo y un cátodo colocados en forma vertical, los

electrodos en forma de placas paralelas se conectan a una fuente de voltaje como se observa en la figura 3. [35].

En la figura 3 se observa el tipo de reactores batch: Reactor con electrodos monoplares conectados en paralelo (a) y reactor con electrodos monoplares conectados en serie (b).

Figura 3

Reactores para electrocoagulación tipo batch



Fuente: Tomado de Arango [35]

En la conexión monopolar en paralelo- los electrodos (ánodos y cátodos) están conectados en paralelo, donde la corriente eléctrica se divide entre todos los electrodos con relación a la resistencia de celdas individuales, por consiguiente, se necesita una diferencia menor de potencial en comparación a la conexión en serie [11].

En la conexión monopolar en serie se contempla que cada electrodo está conectado internamente entre sí, y no tiene interconexiones en los electrodos externos, esta posición de electrodos necesita una diferencia mayor de potencial para la corriente dada [11].

El volumen de la celda ocupada por los electrolitos se le denomina zona de reacción ya que en este se dan los procesos de desestabilización de partículas, coagulación y sedimentación. Los lodos se depositarán en la parte superior de la celda cuando su densidad es baja y precipitaron cuando sea alta, para que finalmente sean removidos [35].

Ventajas y desventajas de electrocoagulación. Las ventajas más resaltantes son las siguientes [30]

- Los costos de operación son menores en comparación de procesos convencionales con el uso de polímeros.
- Son de fácil operación requiriendo de equipos simples
- Reduce la necesidad de almacenamiento y uso de productos químicos
- Presenta lodos compactos y en menor medida.
- Se producen flóculos de mayor tamaño que los formados por coagulación química, conteniendo menor agua ligada.
- La corriente eléctrica favorece el movimiento de las partículas de contaminante más pequeñas, incrementando la coagulación.
- Purifica el agua y permite su reúso.

Entre las desventajas tenemos [30]

- Es necesario que los electrodos de sacrificio sean repuestos.
- Los lodos generados contienen altas concentraciones de aluminio o hierro dependiendo del electrodo de sacrificio usado.
- Pueden ser un tratamiento costoso dependiendo del costo de energía generado.
- El óxido formado por el ánodo puede crear una capa que impida el paso de corriente eléctrica, disminuyendo la eficiencia del proceso.

2.3. Marco conceptual

De la literatura se sabe que la carga contaminante proveniente de la industria textil al pasar por diferentes procesos contiene contaminantes con altos valores de DQO, DBO, turbidez, grasas, sulfuros, materia orgánica, materia inorgánica, metales pesados, colorantes.

La contaminación del agua residual dependerá mucho del tipo de fibra (algodón, lana o poliéster), el proceso y sustancias químicas empleadas siendo uno de los principales problemas la contaminación por colorantes residuales.

Los procesos que se desarrollan durante el teñido del hilo son llevados a cabo a altas temperaturas, requieren de diferentes pH de acuerdo al colorante a usar,

condiciones fuertemente alcalinas en los pretratamientos de hilos de algodón como el mercerizado, formación de aglomerados debido a los diferentes productos auxiliares y electrolitos que se usan durante el teñido, residuos de hilos y fibras que se van generando por el desgaste de las mismas durante los procesos; todo esto contribuye a una alta carga contaminante de las aguas residuales textiles. A todo esto, hay que adicionarle el bajo porcentaje de agotamiento de los colorantes lo que contribuye a la coloración de dichas aguas.

Como se puede deducir los parámetros del agua residual textil del teñido de hilos excede los valores máximos permisibles de las normas peruanas para la descarga en el alcantarillado, lo que hace necesario su tratamiento.

Las aguas residuales textiles pueden tratarse de manera convencional con un tratamiento primario o utilizando nuevas tecnologías, buscando soluciones económicas. Una de las nuevas tecnologías que se puede emplear es la electrocoagulación, la cual requiere de celdas electrolíticas con una adecuada selección de parámetros.

En este trabajo de investigación se trataron aguas residuales textiles provenientes de una planta de teñido de hilos de algodón y poliéster utilizando la electrocoagulación, a nivel de laboratorio.

El reactor utilizado fue una celda electroquímica, construida para tal fin, utilizando ánodo de hierro y cátodo de aluminio dado su accesibilidad.

Entre los parámetros que se estudiaron está el voltaje, que es una medida indirecta de la intensidad de corriente que, en presencia de los electrodos, producen iones coagulantes que facilitan la separación de sustancias; y el tiempo de tratamiento ya que se debe encontrar el tiempo óptimo de tratamiento que asegure la formación de mayor número de flóculos, ya que tiempos muy prolongados disminuyen la eficiencia haciendo que se revierta los contaminantes hacia el agua.

2.4. Definición de términos básicos

Aguas residuales: Aguas producto de un proceso cuya calidad se ha degradado a causa de la incorporación de elementos contaminantes [36].

Ánodo: Es el electrodo donde el metal entra en solución como catión que se va detrás de un equivalente. Es el electrodo hacia el cual fluye la corriente de electrones liberados por el cátodo.

Carga contaminante: Contaminantes que se localizan en diferentes medios (agua, suelos, atmósfera), o que se libera a los mismos en una unidad de tiempo [36].

Cátodo: Es un electrodo que produce la liberación masiva de electrones por efecto del calor. [37].

Coagulación: Es la desestabilización de partículas coloidales por la adición de un reactivo químico, llamado coagulante. Esto sucede a través de la neutralización de las cargas.

Efluente: Agua residual tratada o sin tratar, producto del proceso industrial que se dispone generalmente en los suelos o diversos cuerpos de agua subterráneas o superficiales [36].

Electrodo de sacrificio: Placa metálica(ánodo) que se disuelve mientras que el cátodo permanece sin disolverse.

Floculación: Fenómeno por el cual las partículas se desestabilizan chocando unas con otras para formar coágulos mayores [38].

Turbiedad: Es un parámetro en la calidad de agua, debido a la falta de transparencia en un líquido, este se debe a la presencia de partículas en suspensión coloidales y disueltas [38].

III. HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1. Hipótesis

Hipótesis general

La eficiencia de remoción de la carga contaminante de color, DQO y SST en efluentes líquidos de una planta textil mediante el método de electrocoagulación permitirá resultados mayores al 70%.

Hipótesis específica

- Las características fisicoquímicas del efluente líquido de una planta textil permitirán conocer el grado de contaminantes para seleccionar las condiciones de remoción.
- Los parámetros de tiempo y voltaje influyen en el proceso de electrocoagulación permitiendo obtener una mayor remoción de color, DQO y SST presente en el agua residual de una planta textil.

3.1.1. Operacionalización de variables

Variables independientes

X1 = Características fisicoquímicas del efluente líquido de una planta textil.

X2 = Parámetros de electrocoagulación.

Variable dependiente

Y = Porcentaje de remoción de color, DQO y SST en efluentes líquidos de una planta textil mediante el método de electrocoagulación.

$Y = F(X)$

Tabla 7

Operacionalización de la variable

VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	MÉTODO	TÉCNICA
Porcentaje de remoción de color, DQO y SST en efluentes líquidos de una planta textil mediante el método de electrocoagulación.	Proporción que toma como referencia el número 100. [39]	Porcentaje de remoción de Color, DQO y SST en el efluente líquido de una planta textil.	Porcentaje de Remoción	Color DQO SST	Cálculo	$\% \text{ Remoción} = \left(\frac{\text{valor inicial} - \text{valor final}}{\text{valor inicial}} \right) * 100\%$
Características fisicoquímicas del efluente líquido de una planta textil	Son las características que nos informan sobre el comportamiento del material ante diferentes acciones externas, como el calentamiento, las deformaciones o el ataque de productos químicos. [40]	Características fisicoquímicas del agua residual de una planta textil	Características fisicoquímicas	DQO	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5220 D. 23 rd Ed.,2017.	Colorimétrico
				Color	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2120-C. 23 rd Ed.,2017.	Colorimétrico
				SST	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540 D. 23 rd Ed.,2017.	Instrumental
				Turbidez	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2130 B. 23 rd Ed.,2017.	Instrumental
				Conductividad	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2510 B. 23 rd Ed.,2017.	Instrumental
				pH	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500HB. 23 rd Ed.,2017.	Instrumental
Parámetros de Electrocoagulación	Medida de referencia que, con carácter supletorio o complementario, se aplica cuando las características de la actividad no permiten una adecuada determinación de valores límite de emisión o cuando no hay normativa de aplicación [41].	Valores de tiempo y voltaje utilizados en el proceso de electrocoagulación para la remoción de contaminantes de efluentes textiles.	Tiempo	15 min 30 min 45 min	Medición directa observacional	Cronometría
			Voltaje	5V 10V 15V		Multiparámetro

IV. METODOLOGÍA DEL PROYECTO

4.1. Diseño metodológico

La presente investigación es tipo aplicada debido a que a través del conocimiento científico difunde y resuelve problemas en el tratamiento de aguas residuales en la industria textil [42].

Es de enfoque cuantitativo puesto que utiliza la recolección de datos analizados para comprobar la hipótesis formulada. [43]

Es de diseño experimental a causa de la manipulación y control de las variables independientes que dan como resultado la variable dependiente [42].

Nivel explicativo porque explica la influencia del tratamiento (voltaje y tiempo) sobre la reducción de los contaminantes (causa- efecto) [42].

La notación de factores se muestra en la tabla 8 y el diseño experimental de variables en la tabla 9.

Tabla 8

Rango y notación de factores (variables independientes)

Factor	Unidad	Notación	Niveles		
			Menor	Medio	Alto
Voltaje	V	X1	5	10	15
Tiempo	min	X2	15	30	45

Tabla 9

Diseño experimental de variables

N° prueba	Voltaje (Voltios)	Tiempo (min)	% Remoción de DQO	% Remoción de Color	% Remoción de SST
1	5	15	Y1	Y2	Y3
2	5	30	Y1	Y2	Y3
3	5	45	Y1	Y2	Y3
4	10	15	Y1	Y2	Y3
5	10	30	Y1	Y2	Y3
6	10	45	Y1	Y2	Y3
7	15	15	Y1	Y2	Y3
8	15	30	Y1	Y2	Y3
9	15	45	Y1	Y2	Y3

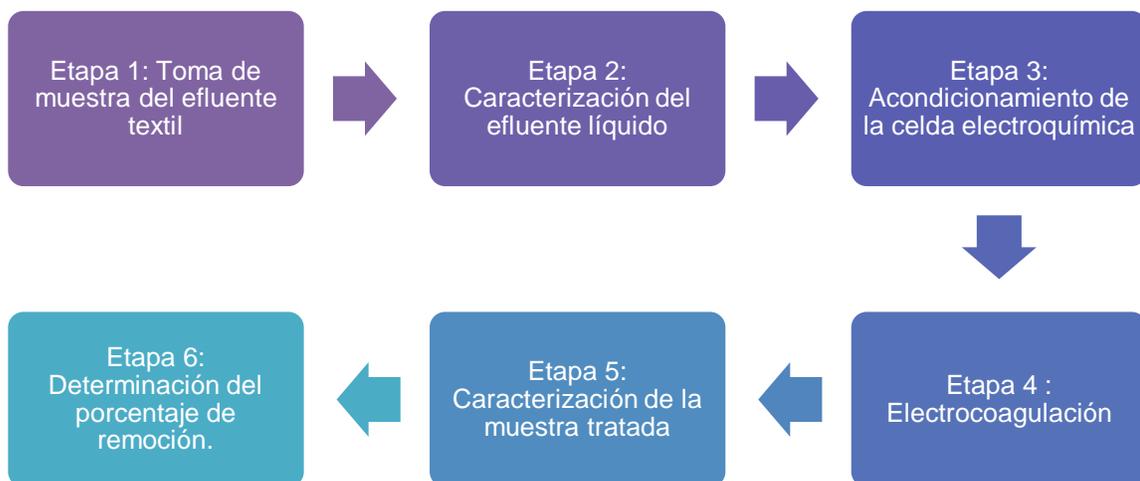
El experimento básico se realizó con 9 tratamientos (3^2) (2 factores, 3 niveles), realizados por triplicado cada uno, haciendo un total de 27 corridas experimentales.

4.2. Método de investigación

El método de investigación consistió en 6 etapas las que se muestran en la figura 4:

Figura 4

Etapas de la investigación



Etapa 1: Toma de muestra del efluente textil. Se tomó una muestra del efluente de la planta textil TEA, recolectado en una jornada laboral, se tomó 15 litros del efluente cada 2 horas hasta alcanzar 60 litros. De esta muestra se tomó 1 litro para la caracterización y lo restante se almacenó para las corridas experimentales.

La figura 5 muestra el momento de la toma de muestra en la arqueta de bombeo.

Figura 5

Toma de muestra del efluente

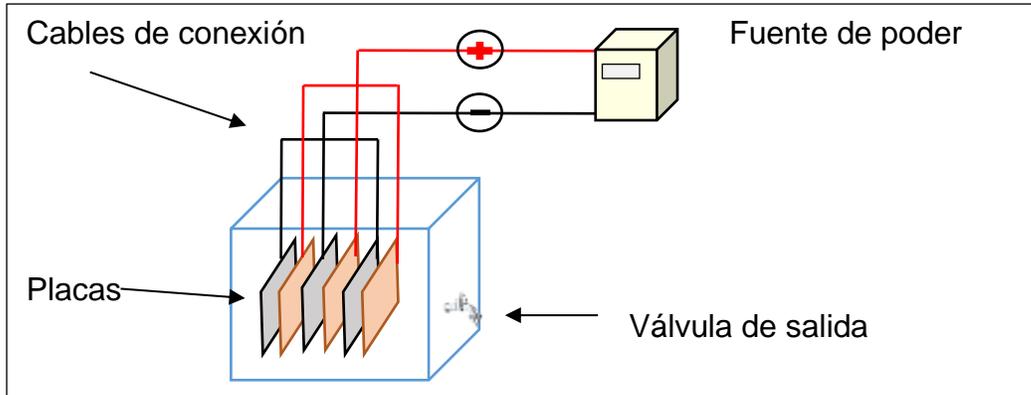


Etapa 2: Caracterización del efluente líquido. Se analizaron las características fisicoquímicas del efluente de la planta textil TEA de acuerdo con el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (SMEWW-APHA-AWWA-WEF)., para los parámetros de color, DQO, SST, turbidez, conductividad, pH y temperatura.

Etapa 3: Acondicionamiento de la celda electroquímica. A una celda de vidrio de altura 13 cm, ancho 13 cm, largo 15 cm, se le fijaron 6 electrodos (ancho 10cm, largo 12 cm) de aluminio para el cátodo y hierro para el ánodo de 0.2 cm de espesor cada uno, los cuales se instalaron sobre una base acrílica dentada como soporte tanto en parte superior como inferior, los electrodos se colocaron con una separación de placas de 10 mm, la secuencia de electrodos fue ánodo-cátodo-ánodo-cátodo-ánodo-cátodo, esta instalación se realizó en paralelo, permitiendo una conexión monopolar, se empleó pinzas de cocodrilo y cables que sirvieron para conectar los electrodos a una fuente de poder de corriente directa. También se le acondicionó una válvula para la toma de muestras. La figura 6 muestra el esquema de la celda electrolítica utilizada, los electrodos de hierro se muestran de color naranja y los electrodos de aluminio de color plomo.

Figura 6

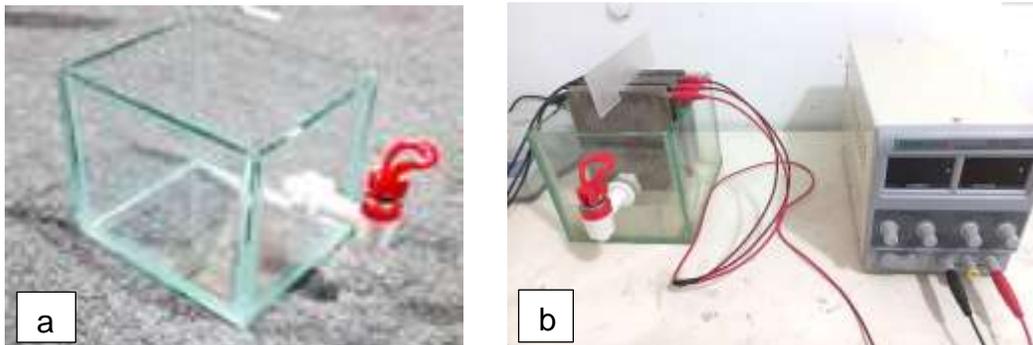
Esquema de la celda electroquímica



La figura 7 muestra los detalles del acondicionamiento de la celda de electrocoagulación (a) celda acondicionada de vidrio (b) Equipo de electrocoagulación

Figura 7

Acondicionamiento de la celda de electrocoagulación



Etapa 4: Electrocoagulación. En la fuente de poder se seleccionó el voltaje de acuerdo con el diseño experimental, se encendió el equipo y se verificó que el valor del voltaje fuese el correcto, mediante el multímetro.

Se vertió 1,5 L de muestra del efluente de la planta textil a la celda electrolítica, se introdujeron los electrodos de hierro y aluminio, Se ajustaron las condiciones de

operación y se encendió el equipo. Al cabo del tiempo previsto se tomaron muestras para su análisis.

La figura 8 muestra los detalles del proceso de electrocoagulación en el tratamiento de la muestra, a) Muestra durante el proceso de electrocoagulación (b) Formación de burbujas en el agua (c) Muestra después del proceso de electrocoagulación

Figura 8

Tratamiento de la muestra



Etapa 5: Caracterización de la muestra tratada. El efluente de la celda electrolítica fue analizado de acuerdo al Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (SMEWW-APHA-AWWA-WEF), seleccionando el adecuado para cada parámetro.

Para el análisis del color fue necesario filtrar la muestra previamente para medir el color verdadero.

Etapa 6: Determinación del porcentaje de remoción

Determinación del % de remoción de Color. Se comparó el color de la muestra inicial del efluente líquido de la planta textil con el color de la muestra tratada por el método de electrocoagulación, el cual fue filtrado y medido en un colorímetro multiparámetro.

El cálculo del porcentaje de remoción de color se determinó de acuerdo con la ecuación 14:

$$\% \text{ Remoción de color} = \left(\frac{C_i - C_f}{C_i} \right) * 100\% \quad (14)$$

En donde:

C_i : Color inicial del efluente de la planta textil (U Pt-Co)

C_f : Color final del efluente tratado de la planta textil (U Pt-Co)

Determinación del % de remoción de DQO. Se comparó el DQO de la muestra inicial del efluente líquido de la planta textil con el DQO de la muestra tratada, el cual fue medido en el equipo colorimétrico.

El cálculo del porcentaje de remoción de DQO se determinó de acuerdo a la ecuación 15.

$$\% \text{ Remoción de DQO} = \left(\frac{DQO\ i - DQO\ f}{DQO\ i} \right) * 100\% \quad (15)$$

En donde:

$DQO\ i$: DQO inicial del efluente de la planta textil (mg/L)

$DQO\ f$: DQO final del efluente tratado de la planta textil (mg/L)

Determinación del % de remoción de SST. Se comparó el valor de SST con el valor SST de la muestra tratada, el cual fue medido de manera instrumental. El cálculo del porcentaje de remoción de SST se determinó de acuerdo a la ecuación 16.

$$\% \text{ Remoción de SST} = \left(\frac{SST\ i - SST\ f}{SST\ i} \right) * 100\% \quad (16)$$

En donde:

$SST\ i$: SST del efluente de la planta textil (mg/L)

$SST\ f$: SST del efluente tratado de la planta textil (mg/L)

4.3. Población y muestra

4.3.1. Población

Para el desarrollo del presente trabajo se utilizó el efluente líquido del proceso de teñido de TEA, en una jornada de trabajo.

Debido a que el trabajo de investigación es experimental, no es aplicable la determinación del tamaño de muestra por métodos estadísticos, en consecuencia, nuestra muestra corresponde a una unidad de análisis.

4.3.2. Muestra

La muestra para el tratamiento está constituida por 1.5 L de agua residual textil proveniente de TEA, empresa de teñido de hilos de algodón y poliéster. Esta muestra se tomó aleatoriamente de un volumen total de 60 litros de efluente colectados durante una jornada laboral completa de la empresa, tomando volúmenes pequeños cada 2 horas hasta alcanzar los 60 litros.

4.4. Lugar de estudio y periodo desarrollado

Las corridas experimentales de la investigación y análisis de caracterización se realizaron en el laboratorio de la empresa Soluciones Químicas Ambientales SQA S.A.C. El periodo en el que se desarrollo fue de 4 meses, desde diciembre del 2022 hasta marzo del 2023.

4.5. Técnicas e instrumentos para la recolección de la información.

4.5.1. Técnicas para la recolección de información

Etapa 1: Toma de muestra del efluente textil. La planta textil cuenta con una bomba centrífuga, al prenderla podemos sacar la muestra mediante una válvula de tomamuestra (ver figura 5).

Etapa 2: Caracterización del efluente líquido. Las características fisicoquímicas del efluente de la planta textil se realizaron de acuerdo con el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (SMEWW-APHA-

AWWA-WEF), para el parámetro de color y DQO se usó la colorimetría; SST y turbidez instrumental; para conductividad, pH y temperatura la medición fue directa con un multiparámetro.

Etapa 3: Acondicionamiento de la celda electroquímica. Se acondicionó la celda de acuerdo a los antecedentes.

Etapa 4: Electrocoagulación. Se requirió de la medición directa del voltaje de la fuente de poder mediante un multitester, y de la cronometría para la medición del tiempo.

Etapa 5: Caracterización de la muestra tratada. Para la caracterización de la muestra tratada se utilizó el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (SMEWW-APHA-AWWA-WEF), de acuerdo al parámetro: color, DQO con colorimetría y SST instrumental.

Etapa 6: Determinación del porcentaje de remoción. Se utilizaron las ecuaciones 14,15 y 16

4.5.2. Equipos y materiales

Equipos e instrumentos

- Celda electroquímica de vidrio de 2L de capacidad
- Fuente de poder marca Baku 305 D, 30 V ,5A
- Placas de electrodo de aluminio de 0.2 cm de espesor
- Placas de electrodo de hierro de 0.2 cm de espesor
- Colorímetro portátil multiparamétrico marca Hach, modelo DR900
- Medidor multiparámetro marca Hach, modelo HQ11D.
- Temoreactor marca Rocker Cientific, modelo CR-25
- Multitester marca Prasek PR-85

Materiales

- Cables eléctricos rojo y negro calibre 16
- Envases de plásticos de diferentes tamaños
- Vaso precipitado de 1000 ml
- Vaso precipitado de 250 ml
- Probeta de 1000 ml
- Papel filtro whatman #40

4.6. Análisis y procesamiento de datos

Los datos obtenidos del tratamiento de electrocoagulación fueron procesados utilizando la estadística descriptiva e inferencial, utilizando el software Minitab 20 y el programa Excel 2016.

4.7. Aspectos éticos en investigación

El presente trabajo de investigación es experimental y a nivel de laboratorio; se desarrolla mostrando originalidad y utilidad, siguiendo los principios de ética de investigación, por lo que se procedió a realizar las corridas experimentales siguiendo las buenas prácticas para la obtención de la data. Así mismo, para el análisis fisicoquímico se utilizaron los servicios de un laboratorio externo con equipos certificados.

V. RESULTADOS

5.1. Resultados descriptivos

En la tabla 10 se muestran las características fisicoquímicas del efluente líquido de una planta textil.

Tabla 10

Características fisicoquímicas del efluente

Parámetro	Valor inicial	unidad
Color	547.6	Pt-Co
DQO	402	mg/L
SST	156	mg/L
SDT	1981.6	mg/L
Conductividad	3920	uS/cm
Turbidez	83.3	NTU
pH	7.06	-

5.2. Resultados inferenciales

En la tabla 11 se muestran los resultados obtenidos de DQO, Color, SST final, Amperaje, Consumo de energía y pH.

Tabla 11

DQO, Color, SST final, Amperaje, pH y Energía consumida

N° prueba	Voltaje (V)	Tiempo (min)	DQO mg/L	Color U Pt-Co	SST mg/L	Intensidad (A)	pH	E.consumida kWh/m ³
1	5	15	170.33	183.67	66.00	2.10	7.20	1.75
2	5	30	135.33	145.00	61.67	2.40	7.90	4.00
3	5	45	109.33	114.00	48.33	2.55	8.30	6.38
4	10	15	120.33	135.67	55.00	2.75	7.25	4.58
5	10	30	93.00	108.00	43.67	2.60	7.87	8.67
6	10	45	72.67	86.00	40.67	2.80	8.10	14.00
7	15	15	76.33	45.00	34.00	2.90	7.30	7.25
8	15	30	63.33	31.67	27.33	2.10	8.51	10.50
9	15	45	54.33	23.33	30.33	2.80	9.04	21.00

En la tabla 12 se muestran los resultados promedio obtenidos de acuerdo al diseño experimental de las variables respuesta cómo %Remoción de DQO, Color, SST

Tabla 12

Porcentaje de remoción de DQO, Color y SST promedios

N°	X1	X2	Y1	Y2	Y3
1	5	15	57.63	66.46	57.69
2	5	30	66.33	72.91	60.47
3	5	45	72.80	78.94	69.02
4	10	15	70.07	75.23	64.74
5	10	30	76.87	80.22	72.01
6	10	45	81.92	84.42	73.93
7	15	15	81.01	91.78	78.21
8	15	30	84.25	94.22	82.48
9	15	45	86.48	95.74	80.56

Nota: En la tabla las siguientes notaciones y sus variables respuesta son:
 %Remoción de DQO=Y1; %Remoción de Color=Y2; %Remoción de SST=Y3

Se realiza la Regresión factorial mediante el software Minitab 20 del %Remoción de DQO, Color y SST vs. Voltaje (X1); Tiempo (X2)

Teniendo en cuenta que:

Ho=Hipótesis nula: No existe relación entre grupos o medias.

H1=Hipótesis alterna: Existe relación entre grupos o medias.

Si $p < 0.05$ se rechaza la hipótesis nula, se acepta hipótesis alterna por lo que los factores son significativos.

Si $p > 0.05$ se acepta hipótesis nula, los factores no son significativos.

Se presentan las tablas 13, 14 y 15 obtenidas mediante el software Minitab 20.

Tabla 13

Coefficientes codificados en DQO, Color y SST

Variables	Término	Efecto	Coefficiente	Error Estándar del coeficiente.	Valor T	Valor p	FIV
%Remoción de DQO	Constante		75.263	0.394	190.87	0.000	
	X1	18.325	9.163	0.483	18.97	0.000	1.00
	X2	10.835	5.417	0.483	11.22	0.000	1.00
	X1*X2	-4.851	-2.425	0.591	-4.10	0.009	1.00
%Remoción de Color	Constante		82.212	0.723	113.63	0.000	
	X1	21.143	10.571	0.886	11.93	0.000	1.00
	X2	8.542	4.271	0.886	4.82	0.005	1.00
	X1*X2	-4.26	-2.13	1.09	-1.96	0.107	1.00
%Remoción de SST	Constante		71.011	0.688	103.20	0.000	
	X1	18.020	9.010	0.843	10.69	0.000	1.00
	X2	7.621	3.811	0.843	4.52	0.006	1.00
	X1*X2	-4.49	-2.24	1.03	-2.17	0.082	1.00

Tabla 14

Resumen del modelo en Color, DQO y SST

Variable Respuesta	Desviación estándar (S)	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	R-cuadrado (pred)
%Remoción de DQO	1.18291	99.02%	98.42%	94.95%
%Remoción de Color	2.17044	97.13%	95.41%	90.26%
%Remoción de SST	2.06430	96.54%	94.46%	86.19%

Tabla 15*Análisis de Varianza en DQO, Color y SST*

Variable Respuesta	Fuente	Grados de Libertad GL	Suma de cuadrados SC Ajustados.	cuadrados medios MC Ajustados.	Valor F	Valor p
%Remoción de DQO	Modelo	3	703.327	234.442	167.54	0.000
	Lineal	2	679.797	339.899	242.91	0.000
	X1	1	503.711	503.711	359.98	0.000
	X2	1	176.087	176.087	125.84	0.000
	Interacciones de 2 términos	1	23.530	23.530	16.82	0.009
	X1*X2	1	23.530	23.530	16.82	0.009
	Error	5	6.996	1.399		
	Total	8	710.323			
%Remoción de Color	Modelo	3	798.14	266.046	56.48	0.000
	Lineal	2	779.98	389.991	82.79	0.000
	X1	1	670.52	670.525	142.34	0.000
	X2	1	109.46	109.457	23.24	0.005
	Interacciones de 2 términos	1	18.16	18.156	3.85	0.107
	X1*X2	1	18.16	18.156	3.85	0.107
	Error	5	23.55	4.711		
	Total	8	821.69			
%Remoción de SST	Modelo	3	594.33	198.111	46.49	0.000
	Lineal	2	574.20	287.099	67.37	0.000
	X1	1	487.08	487.078	114.30	0.000
	X2	1	87.12	87.121	20.44	0.006
	Interacciones de 2 términos	1	20.13	20.135	4.72	0.082
	X1*X2	1	20.13	20.135	4.72	0.082
	Error	5	21.31	4.261		
	Total	8	615.64			

Nota: En el %de Remoción de DQO, el valor de $p < 0.05$ para los factores X1 y X2, por lo cual son significativos, En el %de Remoción de color el valor de $p < 0.05$ para los factores X1 y X2 por lo cual son significativos., En el %de Remoción de SST, el valor de $p < 0.05$ para los factores X1 y X2, por lo cual son significativos.

En la tabla 16 se muestra las ecuaciones de regresión en unidades no codificadas de Color, DQO y SST en función de los factores X1 (Voltaje) y X2 (Tiempo) obtenidas mediante el software Minitab 20.

Tabla 16

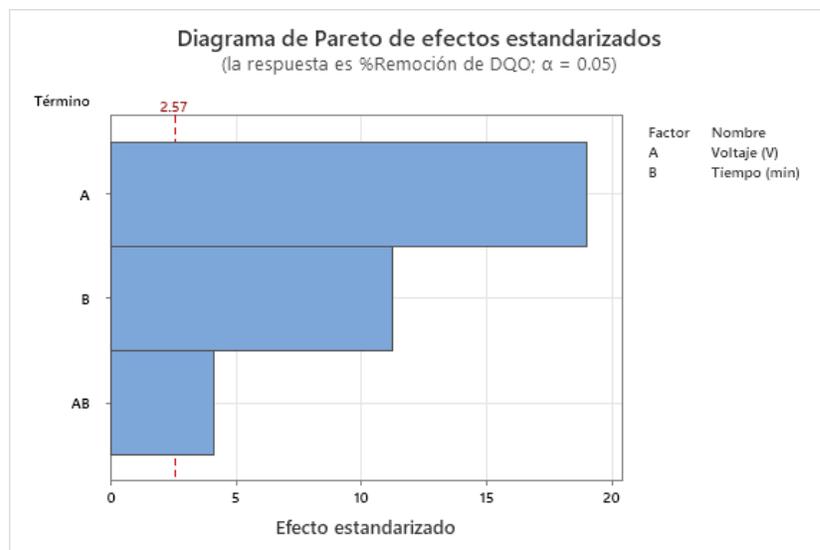
Ecuación de regresión de Color, DQO y SST

Variable Respuesta	Ecuaciones de regresión
%Remoción de DQO	$36.40 + 2.803 X1 + 0.6845 X2 - 0.03234 X1 \cdot X2$
%Remoción de Color	$44.00 + 2.966 X1 + 0.569 X2 - 0.0284 X1 \cdot X2$
%Remoción de SST	$36.40 + 2.699 X1 + 0.553 X2 - 0.0299 X1 \cdot X2$

La figura 9 muestra el diagrama de pareto de efectos estandarizados en DQO realizados en el software Minitab 20.

Figura 9

Diagrama de Pareto de efectos estandarizados en DQO

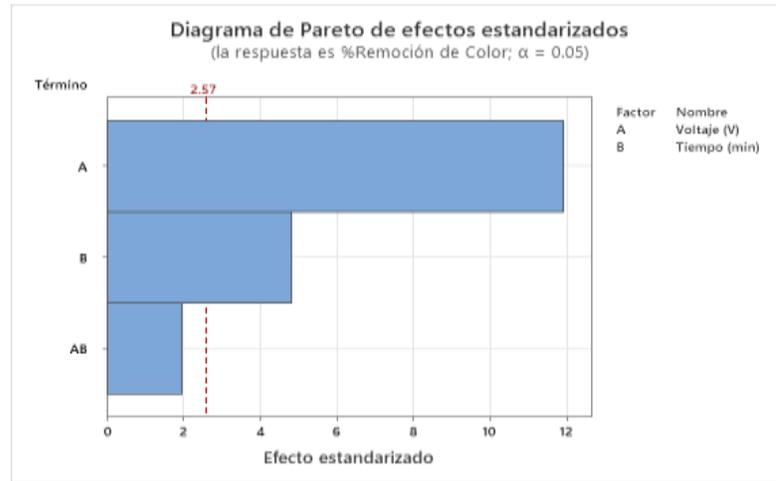


Nota: En el gráfico se observa que el voltaje es el factor más relevante para el porcentaje de remoción de DQO, seguido por el tiempo y la combinación de ambos.

La figura 10 muestra el diagrama de pareto de efectos estandarizados en Color realizados en el software Minitab 20.

Figura 10

Diagrama de Pareto de efectos estandarizados en Color

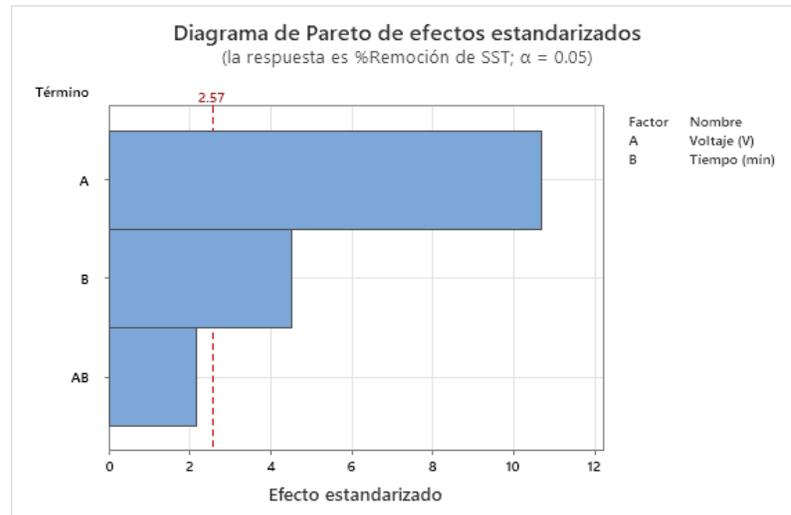


Nota: En el gráfico se observa que el voltaje es el factor más relevante para el porcentaje de remoción de Color, seguido por el tiempo.

La figura 11 muestra el diagrama de Pareto de efectos estandarizados en SST realizados en el software Minitab 20.

Figura 11

Diagrama de Pareto de efectos estandarizados en SST

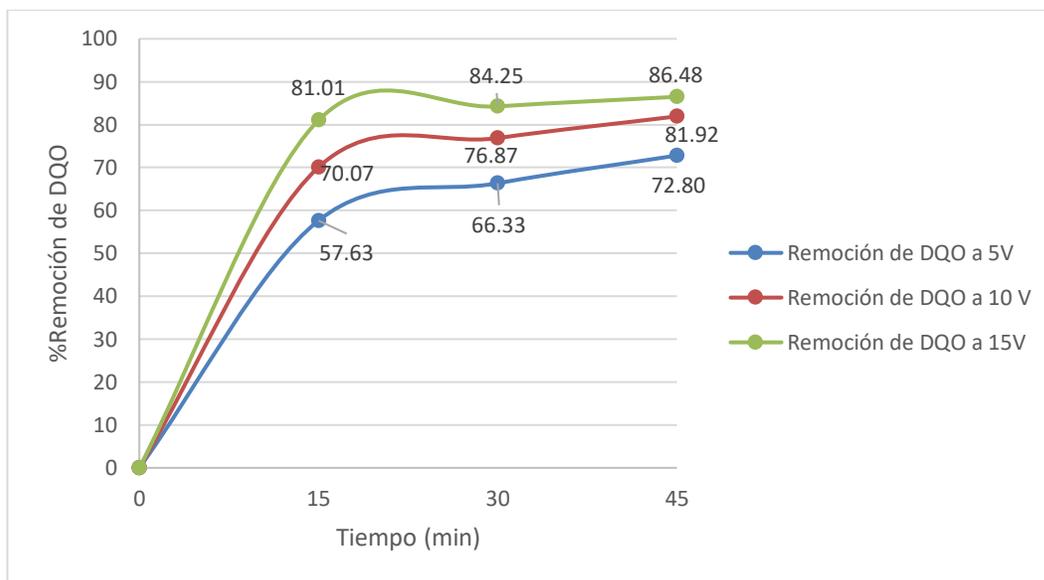


Nota: En el gráfico se observa que el voltaje es el factor más relevante para el porcentaje de remoción de SST, seguido por el tiempo.

La figura 12 muestra el efecto del porcentaje de remoción de la DQO.

Figura 12

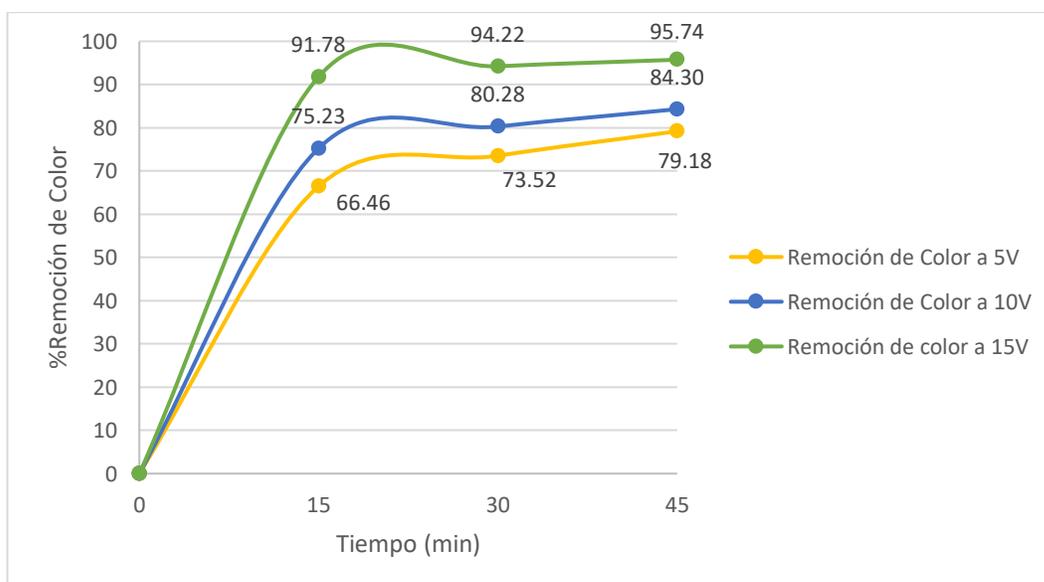
Efecto del voltaje en el % de Remoción de DQO



La figura 13 muestra el efecto del porcentaje de remoción de Color.

Figura 13

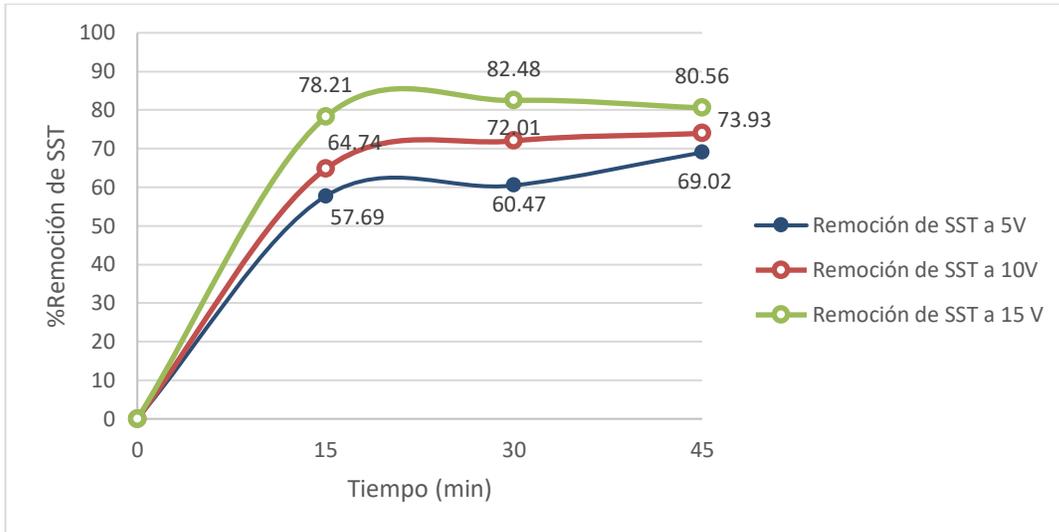
Efecto del voltaje en el % de Remoción de Color



La figura 14 muestra el efecto del porcentaje de remoción de sólidos solubles totales

Figura 14

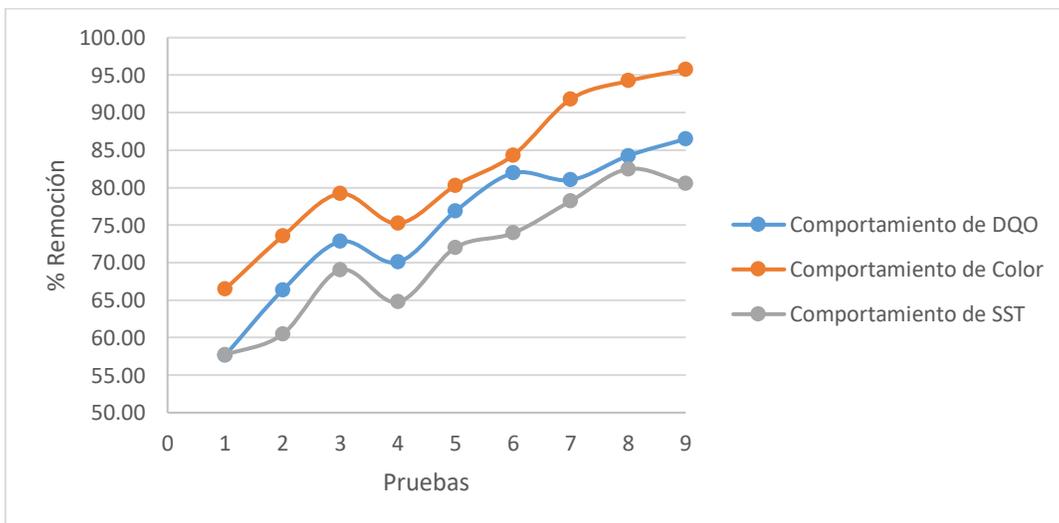
Efecto del voltaje en el % de Remoción de SST



La figura 15 muestra el comportamiento del porcentaje de remoción de DQO, Color y SST.

Figura 15

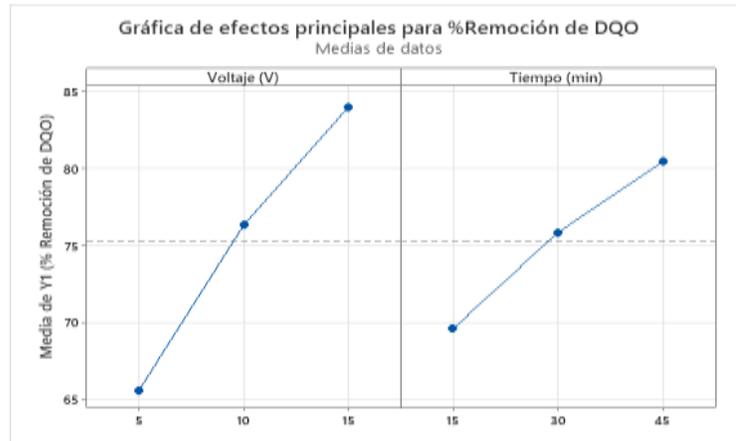
Comportamiento del % de remoción de DQO, Color y SST



La figura 16 muestra los efectos principales de la media del porcentaje de remoción de la Demanda química de Oxígeno.

Figura 16

Efectos principales para Y1 (%de remoción de DQO)

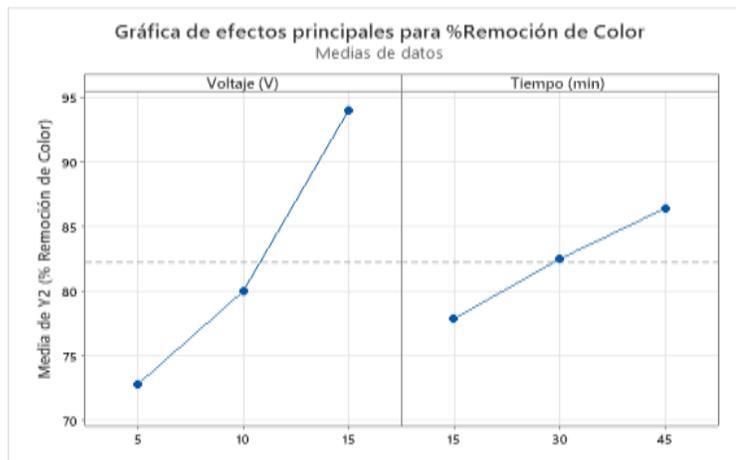


Nota: En el gráfico se observa que de 10 V a 15 V el % de remoción de DQO está por encima de la media, y con respecto al tiempo se observa que a 30 min esta sobre la media de 75% de remoción de DQO.

La figura 17 muestra los efectos principales de la media del porcentaje de remoción de Color.

Figura 17

Efectos principales para Y2 (%Remoción de Color)

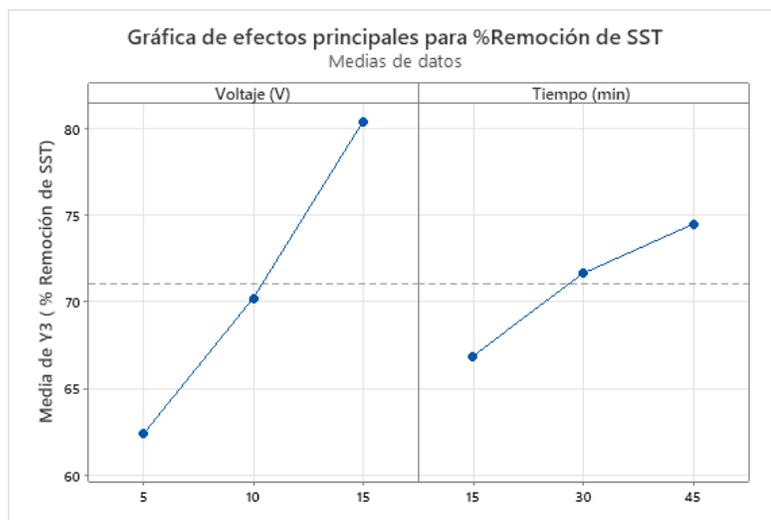


Nota: En el gráfico se observa que a 15 V el % de remoción está por encima de la media, y con respecto al tiempo se observa que a 30 min esta sobre la media de remoción de Color la cual está entre 80 y 85%.

La figura 18 muestra los efectos principales de la media del porcentaje de remoción de Sólidos solubles totales.

Figura 18

Efectos principales para Y3 (%Remoción de SST)



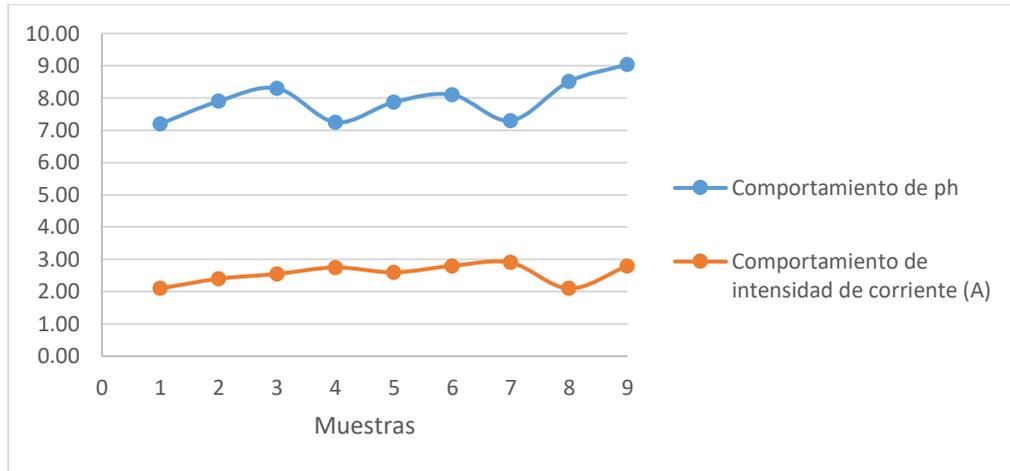
Nota: En el gráfico se observa que a 15 V el % de remoción está por encima de la media, y con respecto al tiempo se observa que a 30 min esta sobre la media de remoción de SST la cual está entre 70 y 75%.

5.3. Otro tipo de resultados

La figura 19 muestra el comportamiento del pH y la intensidad de corriente durante las pruebas de electrocoagulación.

Figura 19

Comportamiento del pH y la intensidad de corriente

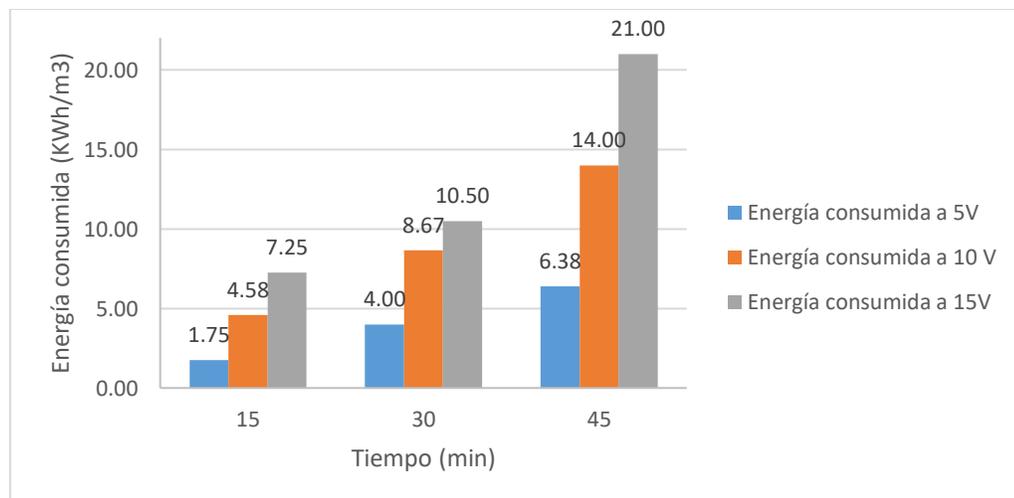


Nota: En el gráfico se observa que el pH se encuentra entre 7 y 9 el cual se encuentra dentro de los VMA de descarga del efluente; se observa que el comportamiento del amperaje varía entre 2 y 3 A el cual servirá para determinar la energía consumida durante el tratamiento.

La figura 20 muestra la energía consumida por la celda de electrocoagulación.

Figura 20

Comportamiento de la energía consumida durante el tratamiento.



Nota: En el gráfico se puede observar que la energía consumida en la celda de electrocoagulación aumenta a medida que incrementa el voltaje y tiempo

VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1. Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados

La hipótesis específica 1 plantea que las características fisicoquímicas del efluente líquido de una planta textil permitirán conocer el grado de contaminantes, para seleccionar las mejores condiciones de remoción se realizó la caracterización del efluente textil los cuales se pueden visualizar en la tabla 10, para lograr obtener los mayores porcentajes de remoción de contaminantes en el efluente, lo cual se puede contrastar con los resultados obtenidos en la tabla 12.

La hipótesis específica 2 plantea que los parámetros de tiempo y voltaje influyen en el proceso de electrocoagulación permitiendo obtener una mayor remoción de contaminantes de color, DQO, y SST en el efluente líquido de una planta textil esto es demostrado mediante al análisis estadístico de la tabla 15 y el cual se puede visualizar mediante las figuras 9, 10 y 11 siendo el voltaje seguido del tiempo factores relevantes en la electrocoagulación.

Del análisis estadístico ANOVA para nuestras variables X1 (voltaje) y X2 (tiempo) se pudo observar en la tabla 17 que los valores respectivos de p son menores de 0.05, por ello se rechaza la hipótesis nula (no son factores significativos) y se acepta la hipótesis alterna (son factores significativos), resultando el voltaje y tiempo factores significativos en el tratamiento del efluente.

Tabla 17*ANOVA del % de remoción de DQO, Color y SST*

Variable respuesta	Factor	GL	%Contribución	SC Ajustados	MC Ajustados	Valor p
%Remoción de DQO	X1	1	74.09	503.711	503.711	0.000
	X2	1	25.90	176.087	176.087	0.000
	Total	2	100	679.797	339.899	0.000
%Remoción de color	X1	1	85.96	670.52	670.525	0.000
	X2	1	14.03	109.46	109.457	0.005
	Total	2	100	779.98	389.991	0.005
%Remoción de SST	X1	1	84.82	487.08	487.078	0.000
	X2	1	15.18	87.12	87.121	0.006
	Total	2	100	574.20	287.099	0.00

La hipótesis general plantea una eficiencia de remoción de la carga contaminante de color, DQO y SST en efluentes líquidos de una planta textil mediante el método de electrocoagulación permitirá resultados mayores al 70%, de acuerdo a los resultados obtenidos en la tabla 12, obtenemos en la prueba número 9 el mayor porcentaje de remoción de DQO de 86,46%, Color de 95,74% y prueba 8 la remoción de SST 82,48% los cuales superan al 70%, demostrándose la hipótesis general planteada.

6.2. Contrastación de los resultados con otros estudios similares

En la investigación [8] utilizan una solución sintética de agua textil con características similares en la celda acondicionada tipo monopolar paralela de 6 electrodos, separación de placas de 1 cm ,donde los autores reportan un porcentaje de DQO(99,67%) en un tiempo de 30 min e intensidad de corriente de 5A con un pH 6-9, en comparación con la muestra real textil usada en la prueba 9 en la cual se obtuvo el 86.48% en un tiempo mayor de 45 min, se concluye que es debido a que trabajaron a una intensidad mayor a la que se usó en esta investigación, por otro lado la muestra sintética no tenía interferencias como si ocurre en el caso de una muestra real.

En la investigación [9] utilizan una solución sintética de agua textil con características similares en la celda acondicionada tipo monopolar paralela de 4 electrodos (2 ánodos de hierro y 2 cátodos de aluminio), separación de placas de 10 mm ,donde los autores reportan un porcentaje de remoción de DQO a 5 Amperes en un tiempo de 30 min, en comparación con la muestra real textil usada en la prueba 9 en la cual se obtuvo el 86.48% en un tiempo de 45 min, se concluye que es debido a que trabajaron con una menor cantidad de electrodos y un menor tiempo de tratamiento.

Con respecto al porcentaje de remoción de color obtenido de la tabla 12 y prueba número 9 se obtuvo una remoción de 95.74%, similar a la investigación [5] en el cual el autor uso agua textil sintética y reportó el 94% de remoción de color, con voltaje de 12V y tiempo mayor a 80 min, usando la misma combinación de electrodos de Fe-Al.

De acuerdo a los resultados obtenidos en la tabla 12 el porcentaje de remoción de DQO a 15V y 45min de 86.48% obtenido en la prueba número 9, es similar a la investigación [11] el cual se logró una remoción de 87% también con pH neutral similar de 7.12 pero un tiempo menor de 15 min.

6.3. Responsabilidad ética de acuerdo a los reglamentos vigentes

Las autoras de la investigación se responsabilizan por la información emitida en la presente tesis; de acuerdo con el Reglamento del Código de Ética de la Investigación de la UNAC, Resolución de Consejo Universitario N.º 060-2019-CU. Este trabajo cumple con todos los requisitos y responsabilidades señaladas en los ítems mencionados.

VII. CONCLUSIONES

1. Se determinó las características fisicoquímicas del efluente textil inicial la cual presentó los siguientes valores: Color 547.6 Pt-Co, DQO 402 mg/L, SST 156 mg/L, SDT 1981.6 mg/L, Conductividad 3920 uS/cm, Turbidez 83.3 NTU y pH 7.06.
2. Se concluye que los parámetros operacionales voltaje y tiempo influyen de manera favorable en el proceso de electrocoagulación, siendo el voltaje el factor más importante en la remoción de los parámetros de DQO, color y SST.
3. Mediante el método de electrocoagulación a 15 voltios y 45 minutos se logró mayor porcentaje de remoción de DQO (86,46%) y Color (95,74%), en tanto que el mayor porcentaje de remoción de sólidos suspendidos totales se logró a 15 voltios y 30 minutos con un valor de 82,48%, por lo que concluimos que este método es efectivo para la remoción de DQO, color y SST.

VIII. RECOMENDACIONES

Realizar la limpieza y pulido de las placas en la superficie de contacto de los electrodos para una mejor carga.

Se recomienda un tratamiento de lodos, generados producto del proceso de electrocoagulación.

Se recomienda probar otro tipo de electrodos y tipo de conexión para ver la opción de obtener un mayor porcentaje de remoción.

Se aconseja la implementación del método de electrocoagulación para el tratamiento de los efluentes de la planta textil TEA y aprovechar el agua tratada para regadíos jardines internos, limpieza de pisos u otros debido a la calidad de agua que se logra permitiendo además el reemplazo de los insumos químicos coagulantes.

IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. ZEBALLOS, María et al. *Tratamiento fisicoquímico de los efluentes del proceso de lavado de lana en una industria textil de Arequipa*. Arequipa. Revista de la Sociedad Química del Perú, 2020. Disponible en:
http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1810-634X2020000400428
- [2]. ONU. *El costo ambiental de estar a la moda*. 2019. Disponible en:
<https://news.un.org/es/story/2018/07/1438312>
- [3]. SANCHEZ, Marco et al. *Contaminación de los ambientes acuáticos generados por la industria textil*. UNFV. Lima, 2018. Disponible en:
<https://doi.org/10.24265/campus.2018.v23n26.03>
- [4]. UNESCO. *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2021*. p141.2021. Disponible en:
<https://www.unesco.org/reports/wwdr/2021/es>
- [5]. KUMAR, Akshaya . *Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation employing Fe-Al composite electrode*, Revista Water Process Engineering, Odisha, India. 2017.
Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2017.11.001>
- [6]. ALVAREZ, Juan et al. *Determinación de los parámetros óptimos para el tratamiento de un efluente textil mediante coagulación-floculación química y electrocoagulación*. La Plata. Argentina .2019
Disponible en: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/75789>

[7]. NIDHEESH, P.V. et al. *Treatment of mixed industrial wastewater by electrocoagulation and indirect electrochemical oxidation*. Revista Chemosphere, Maharashtra, India 2020

Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126437>

[8]. MONCALEANO, Juan y OLMOS, Diana. *Evaluación de la eficiencia de la electrocoagulación en aguas residuales textiles utilizando como electrodo el aluminio*. Tesis (Título de Ingeniero Ambiental). Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2021. Disponible en:

<https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/29904?show=full>

[9]. MUÑOZ Ana y VELÁSQUEZ, Camilo. *Apropiación funcional de una celda de electrocoagulación con electrodos de hierro para el tratamiento de aguas residuales de la industria textilera*. Tesis (Título de Ingeniero Ambiental). Universidad Distrital Francisco José De Caldas. Bogotá, Universidad Distrital Francisco José De Caldas, 2022. Disponible en: <https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/30136>

[10]. CARHUANCHO, Hans et al. *Estudio del efecto de la electrocoagulación en el tratamiento de aguas residuales a nivel de laboratorio en la planta de tratamiento de aguas residuales covicorti en la ciudad de Trujillo – La Libertad*, Tesis (Título de Ingeniero Química). Trujillo: Universidad Nacional de Trujillo, 2015.

Disponible en: <https://dspace.unitru.edu.pe/handle/UNITRU/3590?show=full>

[11]. AGUILAR, Edward. *Evaluación de la eficiencia de una celda de electrocoagulación a escala laboratorio para el tratamiento de agua*, Tesis de Maestría (Para optar el Grado Académico de Magíster en Ciencias Ambientales con Mención en Control de la Contaminación y Ordenamiento Ambiental). Lima, 2015.

Disponible en: <https://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/20.500.12672/4303>

[12]. SERRANO, Alfonso. *Influencia de la densidad de corriente y la distancia entre electrodos en la remoción del color y demanda química de oxígeno de efluentes de recurtido usando la electrocoagulación - ozonificación*. Tesis (Título de Ingeniero Ambiental). Trujillo: Universidad Nacional de Trujillo, 2017.

Disponible en: <http://dspace.unitru.edu.pe/handle/UNITRU/9884>

[13]. PACHECO, Nilda. *Remoción de colorantes en soluciones acuosas sintéticas por electrocoagulación aplicando energía generada por un panel solar*, Tesis (Título de Ingeniero Química). Arequipa: Universidad Nacional de Arequipa, 2019.

Disponible en: <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/10648>

[14]. HUAMAN, Aldo et al. *Influencia del tiempo y densidad de corriente para la remoción de DBO y turbidez de efluentes de industria papelera por electrocoagulación*. Tesis (Título de Ingeniero Ambiental). Trujillo: Universidad Nacional de Trujillo, 2019. Disponible en:

<http://dspace.unitru.edu.pe/handle/UNITRU/14063>

[15]. GALLEGOS, Blanca et al, *Estudio comparativo y medición de la eficiencia entre los electrodos de sacrificio de hierro (Fe) y aluminio (Al) en la remoción de aceites y grasas por el proceso de electrocoagulación de aguas residuales*, Tesis para optar el título de Ing. Químico, Arequipa 2022. Disponible en:

<http://hdl.handle.net/20.500.12773/14702>

[16]. MATTOS, Jonanna. *Estudio de los parámetros operacionales en el proceso de sinergia (electrocoagulación/uv) para la remoción de la turbiedad en aguas provenientes de lavadoras domésticas Huánuco 2020*, Tesis (Título de Ingeniería Ambiental) Huánuco 2022.

Disponible en: <http://repositorio.udh.edu.pe/handle/123456789/3577>

- [17]. MANRIQUE, Luis. *Electrocoagulación de efluentes con colorantes sintéticos de industria textil para la disminución de la demanda química de oxígeno*. Tesis (Titulo de Ingeniería Ambiental) Universidad Nacional Agraria De La Selva ,Tingo María 2022. Disponible en: <https://repositorio.unas.edu.pe/handle/UNAS/2207>
- [18]. ZARUMA, Pablo et al. *Los Colorantes Textiles Industriales Y Tratamientos Óptimos De Sus Efluentes De Agua Residual*. Revista de la Facultad de Ciencias Químicas. Durango.2018. Disponible en:
<https://publicaciones.ucuenca.edu.ec/ojs/index.php/quimica/article/view/2216>
- [19]. KUHAD,R et al. *Developments in Microbial Methods for the Treatment of Dye Effluents*.Adv. appl. Microbiol.New Delhi .2004. Disponible en:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0065216404560069?via%3Dihub>
- [20]. BARRERA, Carlos. *Aplicaciones Electroquímicas al Tratamiento de Aguas Residuales*. MÉXICO, Editorial REVERTÉ .2014, ISBN: 978-607-7815-13-6. Disponible en:
http://ri.uaemex.mx/bitstream/20.500.11799/52617/1/Barrera+D%C3%ADaz_trip+2014.pdf
- [21]. FERNANDEZ, Jesus y DOLORES, Maria. *Métodos Analíticos para aguas residuales. Manual de fitodepuración. Filtros de macrofitas en flotación*. España.1998
- [22]. PEREA MORA, B, “*Estudio de tratabilidad de agua residual de industria textil a escala laboratorio*”. Universidad de Cantabria. 2012.Disponible en:
<https://repositorio.unican.es/xmlui/handle/10902/751>

- [23]. LOPEZ GRIMAU, V., CRESPI ROSELL, M. "Gestión de los efluentes de la industria textil". Cuaderno Tecnológico del Instituto Nacional de Tecnología Industrial. Buenos Aires. 2015. Disponible en:
<https://upcommons.upc.edu/handle/2117/87574>
- [24]. LUNA, C. Mabel. *Fundamentos teóricos básicos sobre las fibras textiles y su tintura*. Informe de investigación. Universidad Nacional del Callao. Lima. Perú. 2014.
- [25]. MERINO, Ericka Y PASSO Alejandro. "*Plan Estratégico Textil El Amazonas S.A. 2014-2018*". Universidad del Pacífico. Lima 2014
Disponible en: <https://repositorio.up.edu.pe/handle/11354/3504?show=full>
- [26]. CORTAZAR, Martinez et al . *Biotechnology applied to the degradation of textile industry dyes*. *Revista Universidad y ciencia*, Vol.28, N° 2. Cuernavaca, México 2012. Disponible en: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0186-29792012000200009&script=sci_abstract&tlng=en
- [27]. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. Decreto Supremo N.º 010-2019-VIVIENDA. Disponible en:
<https://www.gob.pe/institucion/vivienda/normas-legales/272120-010-2019-vivienda>
- [28]. CHEN, Guohua. *Electrochemical technologies in wastewater treatment*. *Revista Separation and Purification Technology*, Vol 38, N°1 Hong Kong, China. 2004.
Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2003.10.006>
- [29]. VILASECA et al. Métodos de eliminación del color en efluentes de tintura textil. "Revista de Química e Industria Textil", 2015. Disponible en:
<https://upcommons.upc.edu/handle/2117/28332?locale-attribute=es>

- [30]. RESTREPO, Ana et al. *La Electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas*. Colombia,2006
- [31]. CHATURVEDI, Satish. *Electrocoagulation: A Novel Waste Water Treatment Method*. Revista Modern Engineering Research. Vol.3, N°1. Gujarat, India
Disponible en: http://www.ijmer.com/papers/Vol3_Issue1/AP3193100.pdf
- [32]. MOLLAH, Mohammad et al. *Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation*, Revista Hazardous Materials, Volumen 114, N°1–3, Bangladesh,2004. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2004.08.009>
- [33]. MOUSSA, Dina et Al. *A comprehensive review of electrocoagulation for water treatment: Potentials and challenges*. Revista Environmental Management. Vol 186, N°1. Doha, Qatar .2017
Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.10.032>
- [34]. CHEN, Guohua. *Electrochemical technologies in wastewater treatment*. Revista Separation and Purification Technology, Vol 38, N°1 Hong Kong, China.2004
Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2003.10.006>
- [35]. ARANGO, Álvaro. *La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales*. Revista Lasallista de investigación, vol. 2, Antioquía ,2005.
Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/695/69520109.pdf>
- [36]. CAMACHO, Aurora. *Diccionario de términos ambientales*. Editorial NOVI. La Habana,2000. ISBN: 959-7071-16-9
- [37]. LENNTECH, España 2022. Disponible en:
<https://www.lenntech.es/glosario-agua.htm>

[38]. PINZON, Erick. *Remoción de color de origen textil por medio de electrocoagulación*. Guatemala, 2010

Disponible en: http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_1161_Q.pdf

[39]. REAL ACADEMIA ESPAÑOLA. *Definición de porcentaje*. 2023 Disponible en: <https://dle.rae.es/porcentaje>

[40]. Propiedades fisicoquímicas. 2023. Disponible en : https://www.edu.xunta.gal/espazoAbalar/sites/espazoAbalar/files/datos/1464947174/contido/21_propiedades_fisico_quimicas.html#:~:text=Son%20las%20que%20nos%20informan,el%20ataque%20de%20productos%20qu%C3%ADMICOS.

[41]. REAL ACADEMIA ESPAÑOLA. *Definición de parámetro*. 2023. Disponible en: <https://dle.rae.es/par%C3%A1metro>

[42]. HERNANDEZ, Roberto *Metodología de la investigación*. 6ta edición ISBN: 978-1-4562-2396-0. México. 2014. Disponible en: <https://www.uca.ac.cr/wp-content/uploads/2017/10/Investigacion.pdf>

[43]. ÑAUPAS Humberto et al. *Metodología de a investigación de tesis Cuantitativa y cualitativa y Redacción de la tesis*. ISBN 978-958-762-877-7. Bogotá. Colombia 2018 Disponible en: http://www.biblioteca.cij.gob.mx/Archivos/Materiales_de_consulta/Drogas_de_Abuso/Articulos/MetodologiaInvestigacionNaupas.pdf

[44]. SMEWW-APHA-AWWA-WEF. *Métodos Normalizados Para el análisis de aguas potables y residuales* Edición de santos. España. 2017

ANEXOS

Anexo 1: Matriz de Consistencia

Remoción de los contaminantes en efluentes líquidos de una planta textil mediante el método de electrocoagulación

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES	METODOLOGÍA
PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL	VARIABLE DEPENDIENTE			
¿Es posible remover los contaminantes de color, DQO y SST en efluentes líquidos de una planta textil mediante el método de electrocoagulación?	Remover los contaminantes de color, DQO y SST en efluentes líquidos de una planta textil mediante el método de electrocoagulación.	La eficiencia de remoción de la carga contaminante de color, DQO y SST en efluentes líquidos de una planta textil mediante el método de electrocoagulación permitirá resultados mayores al 70%	Y= Porcentaje de remoción de color DQO y SST en efluentes líquidos de una planta textil mediante el método de electrocoagulación.	Porcentaje de Remoción	Color DQO SST	
PROBLEMAS ESPECÍFICOS	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	HIPÓTESIS ESPECÍFICA	VARIABLE INDEPENDIENTE	DIMENSIONES	INDICADORES	
a) ¿Cuáles son las características fisicoquímicas en el efluente líquido de una planta textil?	a) Caracterizar fisicoquímicamente el efluente líquido de una planta textil	a) Las características fisicoquímicas del efluente líquido de una planta textil permitirán conocer el grado de contaminantes para seleccionar las mejores condiciones de remoción.	X1= Características fisicoquímicas del efluente líquido de una planta textil	Características fisicoquímicas	DQO Color SST Turbidez Conductividad pH Temperatura	Investigación aplicada, enfoque cuantitativo, diseño experimental, nivel explicativo (causa- efecto)
b) ¿Cuáles son los parámetros operacionales de proceso de electrocoagulación para lograr la remoción de los contaminantes de color, DQO y SST en el efluente líquido de una planta textil?	b) Determinar los parámetros operacionales del proceso de electrocoagulación para la remoción de contaminantes de color, DQO y SST en el efluente líquido de una planta textil.	b) Los parámetros de tiempo y voltaje influyen en el proceso de electrocoagulación permitiendo obtener una mayor remoción de contaminantes de color, DQO, y SST en el efluente líquido de una planta textil.	X2= Parámetros de Electrocoagulación	Tiempo Voltaje	20 min 40 min 60 min 5V 10V 15V	

Anexo 2:

Certificado de calibración de equipo multiparámetro

**CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN**
N° 004-2023

SOLUCIONES QUÍMICAS AMBIENTALES SAC

Solicitante: **SOLUCIONES QUÍMICAS AMBIENTALES SAC**
Dirección: **Simon Bolívar**
Expediente:
Instrumento de medición: **Medidor Multiparámetro**

DATOS DEL INDICADOR
Marca: **HACH**
Modelo: **HQ11D**
Serie: **15030001**
Intervalo de mediciones: **0 a 14 pH**

DATOS DEL ELECTRODO
Marca: **HACH**
Modelo: **PHC101**
Serie: **151112568015**
Procedencia: **USA**

Fecha de Calibración: **17/03/2023**
Lugar de calibración:
Instalaciones del Laboratorio de Metrología de SQA.

CONDICIONES AMBIENTALES

Temperatura	23.5 °C
Humedad Relativa	73%
Presión Atmosférica	1001 mbar

PATRONES DE REFERENCIA

Los resultados obtenidos tienen trazabilidad a la NIST / IUPAC	N° de lote
Material de referencia certificado Marca ROCKER Ph 4.01 @25°C	210824
Material de referencia certificado Marca ROCKER Ph 7.00 @25°C	210827
Material de referencia certificado Marca ROCKER Ph 10.01 @25°C	210951

RESULTADOS

Indicación (pH)	Valor de referencia (pH)	Corrección (pH)	Incertidumbre (pH)
4.03	4.01	0.02	0.012
7.01	7.00	0.00	0.012
10.03	10.01	0.02	0.012

Nota: Los resultados están dados a la temperatura de referencia de 25° C

INCERTIDUMBRE
La incertidumbre reportada en el presente certificado es la incertidumbre expandida de medición que resulta de multiplicar la incertidumbre estándar por el factor de cobertura $k = 2$ La incertidumbre fue determinada según la guía para la expresión de la incertidumbre de la medición generalmente el valor de magnitud está dentro del intervalo de los valores determinados con la incertidumbre expandida con una probabilidad de aproximadamente 95%.

OBSERVACIONES

- Los resultados del presente documentos son válidos únicamente para el objeto calibrado y se refieren al momento y a las condiciones en que fueron ejecutadas las mediciones al solicitante le corresponde definir la frecuencia de calibración en función al uso conservación y mantenimiento del instrumento de medición
- Con fines de identificación de condición de calibrado se ha colocado una etiqueta autoadhesiva

(*) Indicado en el manual de instrucciones del fabricante
(**) Unidades de pH

- Los resultados pertenecen al promedio de 3 mediciones.

Fecha de Calibración: **17 de febrero 2023**
Fecha de Emisión de Constancia: **09 de febrero 2023**
Elaborado por: **Ing. Ingeniería Electrónico: Ronny Miguel Jara Caballero**


Ronny Jara Caballero
Especialista Técnico
Jefe de Servicio Técnico

* EL USO INDEBIDO DE ESTE CERTIFICADO DE CALIBRACION CONSTITUYE DELITO SANCIONADO CONFORME LEY *

Calle Simón Grados N° 781 Urb Villa Sol, Los Olivos - Lima Lima, Perú.

Anexo 3:

Certificado de calibración de equipo colorímetro portátil



CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN
N° 002-2023

SOLUCIONES QUÍMICAS AMBIENTALES SAC

- Solicitante:** SOLUCIONES QUÍMICAS AMBIENTALES SAC
- Lugar de calibración:**
Instalaciones del Laboratorio de Metrología de SQA.
- Datos del Instrumento:**

Equipo	:	COLORIMETRO PORTATIL
Marca	:	HACH
Procedencia	:	U.S.A.
Modelo	:	DR900
Serie	:	181270001040
Rango	:	0 – 800 mg/L
Resolución	:	No indica
Tipo de indicación	:	Digital
- Procedimiento:**
Para la Calibración se creó la nueva curva patrón llamada "SQA DQO 2023" utilizando los patrones con valores de 0, 100, 200, 400, 600 y 800 mg/L respectivamente.
- Patrón utilizado:**
Se utilizaron diluciones de estándar primario de DQO de 1000 mg/L.
- Resultado de mediciones:**

Valor del patrón (mg/L)	Valor medido (mg/L)	Variación máxima permitida	Conclusión
0	0	±0.01	Dentro del rango
100	94	±5	Dentro del rango
200	208	±10	Dentro del rango
500	526	±25	Fuera del rango
- Observaciones y recomendaciones:**
 - Solicitar una evaluación semestral del instrumento para verificar el estado de sus componentes internos.
 - Recomendamos utilizar el equipo en el rango de cumplimiento (0 – 800 mg/L), ya que en valores mayores no puede asegurarse la exactitud de los valores medidos.

Fecha de Calibración: 16 de febrero de 2023
Fecha de Emisión de Constancia: 09 de febrero de 2023
Elaborado por Tec. Ingeniería Electrónico: Ronny Miguel Jara Caballero





Ronny Jara Caballero
Especialista Técnico
Jefe de Servicio Técnico

* EL USO INDEBIDO DE ESTE CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN CONSTITUYE DELITO SANCIONADO CONFORME LEY*

Calle Simón Grados N° 781 Urb Villa Sol, Los Olivos - Lima Lima, Perú.

Anexo 4:

Certificado de calibración de equipo Termo reactor

Temperatura del patrón (°C)	Temperatura medida (°C)	Variación máxima permitida	Conclusión
148	147.2	± 2	Dentro del rango
150	150.3	± 2	Dentro del rango
152	151.5	± 2	Dentro del rango

1. Solicitante: SOLUCIONES QUIMICAS AMBIENTALES

2. Lugar de calibración:
Instalaciones del Laboratorio de Metrología de SQA.

3. Datos del Instrumento:

Equipo	:	TERMOREACTOR
Marca	:	ROCKER SCIENTIFIC
Procedencia	:	TAIWAN
Modelo	:	CR - 25
Serie	:	179250
Rango	:	[30 - 200] °C
Resolución	:	No indica
Tipo de indicación	:	Digital

4. Procedimiento:
Para la Calibración se siguió el procedimiento indicado en el manual de operación del equipo, utilizando un rango de variación de [30 - 150] °C

5. Patrón utilizado:
Se utilizaron viales con glicerina.

6. Resultado de mediciones:

Temperatura del patrón (°C)	Temperatura medida (°C)	Variación máxima permitida	Conclusión
148	147.2	± 2	Dentro del rango
150	150.3	± 2	Dentro del rango
152	151.5	± 2	Dentro del rango

7. Observaciones y recomendaciones:

- Solicitar una evaluación semestral del Instrumento para verificar el estado de sus componentes internos.
- Recomendamos utilizar el equipo en el rango de cumplimiento [30 - 200] °C, ya que en valores mayores no puede asegurarse la exactitud de los valores medidos.

Fecha de Calibración: 16 de febrero 2023
Fecha de Emisión de Constancia: 09 de febrero 2023
Elaborado por Tec. Ingeniería Electrónico: Ronny Miguel Jara Caballero




Ronny Jara Caballero
Especialista Técnico
Jefe de Servicio Técnico

* EL USO INDEBIDO DE ESTE CERTIFICADO DE CALIBRACION CONSTITUYE DELITO SANCIONADO CONFORME LEY*

Calle Simón Grados N° 781 Urb Villa Sol, Los Olivos - Lima Lima, Perú.

Anexo 5:

Informe de ensayo realizado para los análisis promedios de Contaminantes en el efluente textil realizados en SQA S.A.C


SOLUCIONES QUÍMICAS AMBIENTALES SAC

INFORME DE ENSAYO N° 014-2023

I. DATOS DEL SERVICIO

CLIENTE	MARCA LUISA, TUPIA MONTES SUYEY SOFIA, VALERO CLAUDIO
MATRIZ	AGUA
PROCEDENCIA DE LA MUESTRA	INDUSTRIAL TEXTIL
MUESTREADO POR	CLIENTE
CANTIDAD DE MUESTRA	0
FECHA DE INICIO DE LOS ENSAYOS	02-03-2023
FECHA DE FIN DE LOS ENSAYOS	04-03-2023
FECHA DE EMISION DE INFORMES	30-03-2023


Ing. Eduardo Molina Rodriguez
CIP N°224227

Fecha: 30/03/2023 Página 1 de 4.
Correo: ventas@sqaperu.com



SOLUCIONES QUÍMICAS AMBIENTALES SAC

INFORME DE ENSAYO N° 014-2023

II. RESULTADOS

FECHA			02/03/2023
CÓDIGO DE MUESTRA			T - A
DESCRIPCION DE MUESTRA			EFLUENTE TEXTIL EL AMAZONAS
HORA DE MUESTREO			12:30 p.m.
ENSAYO	L.C.M	UNIDAD	RESULTADOS
pH	0.01	unidad	7.06
Color	3.0	Pt - Co	547.6
TSS	5.0	mg/L	156
TDS	1	mg/L	1981.6
DQO	3	mg/L	402
Conductividad	0.01	$\mu\text{S/cm}$	3920
Turbidez	0.01	NTU	83.3

L.C.M.: Limite 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.



SOLUCIONES QUIMICAS AMBIENTALES SAC

INFORME DE ENSAYO N° 014-2023

FECHA			04/03/2023								
CÓDIGO DE MUESTRA			T - A								
DESCRIPCIÓN DE MUESTRA			EFLUENTE TEXTIL EL AMAZONAS								
NRO. MUESTRA			1	2	3	4	5	6	7	8	9
ENSAYO	VMA	unidad									
DQO (Final)	1000	mg/L	170.33	135.33	109.33	120.33	93	72.67	76.33	63.33	54.33
Color (Final)	-	Pt - Co	183.67	145	114	135.67	108	86	45	31.67	23.33
TSS (Final)	500	mg/L	66	61.67	48.33	55	43.67	40.67	34	27.33	30.33
pH	6 - 9	unidad	7.2	7.9	8.3	7.25	7.87	8.1	7.3	8.51	9.04

"V.M.A": Valores Máximos Admisibles

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: 30/03/2023

Correo: ventas@sqa Peru.com

Página 3 de 4



SOLUCIONES QUIMICAS AMBIENTALES SAC

INFORME DE ENSAYO N° 014-2023

III. METODOS Y REFERENCIAS

TIPO DE ENSAYO	NORMA DE REFERENCIA	TÍTULO
Demanda Química de Oxígeno	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5220 D, 23 rd Ed. 2017	Chemical Oxygen Demand, Closed/Reflux, Colorimetric Method
Sólidos Suspendidos Totales	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540 D, 23 rd Ed. 2017	Solids, Total, Suspended Solids Dried at 103-105°C
pH	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-H+ B. 23rd Ed.	pH Value, Electrometric Method
Conductividad	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2510 B. 23rd Ed.	Conductivity, Laboratory Method
Sólidos Totales Disueltos	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540 C, 23rd Ed	Solids, Total, Dissolved Solids Dried at 180°C
Turbidez	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2130 B 23rd Ed. 2017	Turbidity, Laboratory Method
Color	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4508-SO42- E, 23 rd Ed	Colorimetric, Laboratory Method

Anexo 6:

Equipos usados en el Análisis

Equipo marca Hach DR 900



Equipo multiparámetro Hach HQ11D



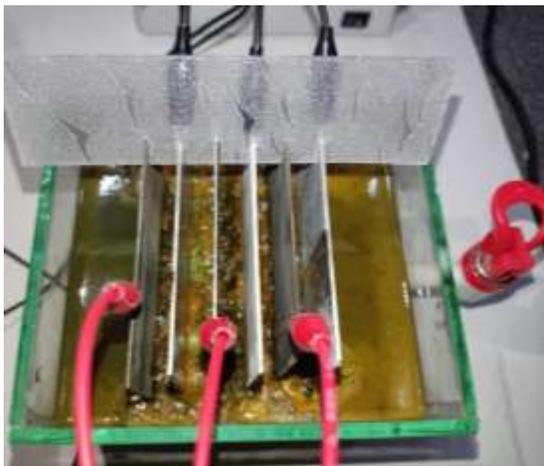
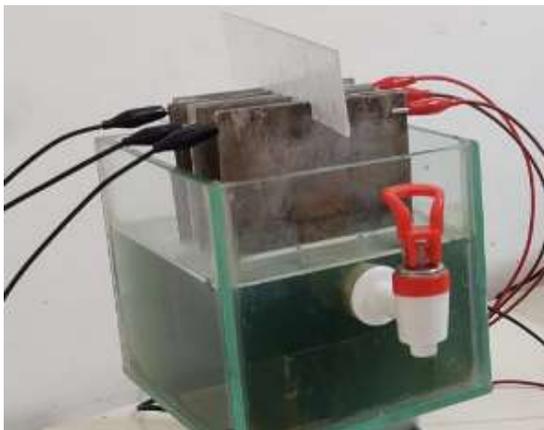
Equipo Termoreactor Rocker Cientific CR-25



Anexo 6:

Fotografías del proceso de electrocoagulación

Equipo de electrocoagulación



Llenado de muestra inicial



Análisis de muestra final



Muestras durante el tratamiento



Muestra inicial y final tratada

