

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA**

**FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**



**“ELECTROCOAGULACIÓN DE EFLUENTES CON COLORANTES SINTÉTICOS  
DE INDUSTRIA TEXTIL PARA LA DISMINUCIÓN DE LA DEMANDA QUÍMICA  
DE OXIGENO”**

**Tesis**

**Para optar el título de:**

**INGENIERO AMBIENTAL**

**PRESENTADO POR:**

**LUIS ANTONIO MANRIQUE GUERRA**

**Tingo María - Perú**

**2022**

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Luis Antonio Manrique Guerra', is written over a white rectangular background.



**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA**

Tingo María – Perú

**FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES**



**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N° 032-2022-FRNR-UNAS**

Los que suscriben, Miembros del Jurado de Tesis, reunidos con fecha 26 de agosto del 2022, a horas 4:00 p.m. a través de la plataforma virtual Ms Teams de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Recursos Naturales Renovables para calificar la Tesis titulada:

**“ELECTROCOAGULACIÓN DE EFLUENTES CON COLORANTES SINTÉTICOS DE INDUSTRIA TEXTIL PARA LA DISMINUCIÓN DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXIGENO”**

Presentado por el Bachiller: **MANRIQUE GUERRA, Luis Antonio**, después de haber escuchado la sustentación y las respuestas a las interrogantes formuladas por el Jurado, se declara **APROBADO** con el calificativo de **“EXCELENTE”**

En consecuencia, el sustentante queda apto para optar el Título de **INGENIERO AMBIENTAL**, que será aprobado por el Consejo de Facultad, tramitándolo al Consejo Universitario para el otorgamiento del Título correspondiente.

Tingo María, 08 de setiembre del 2022

Mblgo. M. Sc. **LUIS ALBERTO SÁNCHEZ ROMERO**  
PRESIDENTE

M. Sc. **LAURIANO ZAVALETA DE LA CRUZ**  
MIEMBRO

Ing. M. Sc. **RAIDA MATOS BUSTAMANTE**  
MIEMBRO



Ing. M. Sc. **JOSÉ LUIS PAREDES SALAZAR**  
ASESOR

# **UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA**

## **FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES**

### **ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**



#### **“ELECTROCOAGULACIÓN DE EFLUENTES CON COLORANTES SINTÉTICOS DE INDUSTRIA TEXTIL PARA LA DISMINUCIÓN DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXIGENO”**

Autor	: MANRIQUE GUERRA, Luis Antonio
Asesores	: Ing. MSc. PAREDES SALAZAR, José Luis Mg. HUAMAN PAREDES, Flora Elsa (UNALM)
Programa de investigación	: Tratamiento de aguas
Línea de investigación	: Ciencia y Tecnologías Ambientales
Eje temático de investigación	: Tratamientos avanzados
Lugar de ejecución	: Laboratorio de Tesis de la Facultad de Ciencias – Universidad Nacional Agraria La Molina
Duración	: 6 meses
Financiamiento	: S/ 3 100
Propio	: Si

**Tingo María - Perú**

**2022**

## **DEDICATORIA**

### **Primeramente a Dios.**

Por darme la vida, la fortaleza y la sabiduría para continuar con los objetivos en el campo profesional.

### **A mis maestros.**

Por todo el tiempo dedicado en compartir sus importantes conocimientos y experiencias únicas en el mundo laboral.

### **A mis padres.**

Por su incondicional apoyo en cada etapa de mi vida profesional; a mi papá por su inagotable perseverancia en la vida, a mi mamá por su inquebrantable fortaleza de lograr los objetivos con disciplina y dedicación.

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Nacional Agraria de la Selva, en especial agradecimiento a la Facultad de Recursos Naturales Renovables – Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, por su vital e importante aporte en mi formación profesional de pregrado.

A mi asesor de tesis el Ing. M. Sc. José Luis Paredes Salazar, docente de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, por el apoyo de sus importantes conocimientos en el tema de investigación y sugerencias en la ejecución del presente trabajo de tesis.

A mi coasesora de tesis la Mg. Flora Elsa Huamán Paredes, docente principal del Departamento de Química de la Universidad Nacional Agraria La Molina, por su apoyo en la ejecución de tesis y sus valiosos aportes académicos en la investigación.

A los miembros del jurado de tesis: Mblgo. M. Sc. Luis Sánchez Romero, Ing. M. Sc. Lauriano Zavaleta de la Cruz e Ing. M. Sc. Raida Matos Bustamante por su comprensión en la ejecución del trabajo de tesis.

## ÍNDICE GENERAL

	<b>Página</b>
I. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. Objetivo general.....	2
1.1.1. Objetivos específicos .....	2
II. REVISIÓN DE LITERATURA .....	3
2.1. La situación problemática de la industria textil en el mundo y en el Perú .....	3
2.2. Antecedentes de la investigación en tratamiento de efluentes textiles .....	4
2.3. Teoría relacionado al tema de investigación .....	8
2.4. Tratamiento de aguas residuales y metodologías de aplicacion .....	13
2.4.1. Tratamiento electroquímico.....	14
2.4.2. Definicion de electroquímica.....	14
2.5. Descripcion de la secuencia de reacciones químicas del aluminio y hierro .....	22
2.6. Aspectos importantes para la construcción y operación de una celda.....	24
2.7. Marco legal .....	25
2.8. Optimización.....	25
2.8.1. Definicion de superficie de respuesta .....	26
2.9. Definicion de la demanda química de oxígeno (DQO) .....	27
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	29

3.1. Descripción del lugar de ejecución .....	29
3.2. Material experimental.....	30
3.3. Descripción de los materiales y equipos .....	31
3.4. Metodología aplicada en la investigación .....	32
<b>IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>38</b>
4.1. Medición de los parámetros fisicoquímicos del efluente .....	38
4.2. Medición de la demanda química de oxígeno (DQO).....	43
4.3. Construcción del sistema de electrocoagulación a nivel de laboratorio.....	45
4.4. Cálculo de la disminución de la demanda química de oxígeno (DQO) .....	47
4.4.1. Disminución de la DQO en los tratamientos de electrocoagulación (EC) .....	47
4.4.2. Resultados del análisis estadístico para la muestra pura del efluente .....	49
4.4.3. Resultados del análisis estadístico para la disolución al 75% v/v .....	52
4.5. Resultados de la comparativa de los valores máximos admisibles (VMA).....	56
<b>V. CONCLUSIONES .....</b>	<b>57</b>
<b>VI. PROPUESTAS A FUTURO .....</b>	<b>58</b>
<b>VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>59</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>64</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla</b>	<b>Página</b>
1. Procesos realizados según el tipo de fibra. ....	8
2. Colorantes de acuerdo a su estructura química .....	10
3. Colorantes por su forma de utilización.....	11
4. Descripción del grado o nivel de fijación de colorantes.....	12
5. Valores máximos admisibles para descarga de agua residual no doméstico en el sistema de alcantarillado .....	25
6. Niveles y cuantificación de las variables independientes.....	32
7. Niveles del diseño factorial $2^k$ con puntos centrales .....	33
8. Niveles codificados del diseño factorial $2^k$ con puntos centrales.....	33
9. Tratamientos o ensayos para 2 variables en un diseño factorial $2^k$ con puntos centrales.....	34
10. Parámetros fisicoquímicos antes de electrocoagulación .....	38
11. Parámetros fisicoquímicos después de electrocoagulación.....	38
12. Demanda química de oxígeno previamente y posteriormente de aplicar la electrocoagulación (EC) del efluente con colorante sintético .....	43
13. Detalles específicos de la celda y sus accesorios a nivel de laboratorio .....	46
14. Disminución de la DQO (%) en los tratamientos de electrocoagulación (EC) .....	47
15. Descripción del análisis de varianza (ANOVA) para la reducción de la DQO.....	49
16. Niveles de los factores la cual maximiza DQO sobre la región indicada.....	51
17. Descripción del análisis de varianza (ANOVA) para la reducción de la DQO.....	52
18. Valor óptimo de DQO (%) .....	55

19. Comparativa de los valores máximos admisibles (VMA) y valores de la disminución de la DQO (mg O <sub>2</sub> / L) aplicando electrocoagulación (EC) .....	56
20. Diluciones del patron biftalato de potasio (KHP) para DQO .....	91
21. Valores de la ecuación de la curva de calibración para DQO .....	91
22. Calculo de DQO por colorimetria de la muestra pura del efluente antes de la electrocoagulacion .....	92
23. Calculo de DQO por colorimetria de la muestra pura del efluente después de la electrocoagulacion .....	92
24. Calculo de DQO de muestra disolucion 75% v/v efluente por colorimetría antes de la electrocoagulacion .....	92
25. Calculo de DQO de muestra disolucion 75% v/v efluente por colorimetria despues de la electrocoagulacion .....	93

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura</b>	<b>Página</b>
1. Colorantes azoicos .....	13
2. Proceso de la electrocoagulación en una celda.....	14
3. Proceso de coagulación química.....	15
4. Comportamiento de la electrocoagulación .....	16
5. Proceso de reacciones redox en simultaneo .....	17
6. Potencial Z en la electrocoagulación .....	18
7. Reacciones en el proceso de electrocoagulación.....	19
8. Diagrama de especiación del aluminio (Al) en función de la concentración y pH .....	20
9. Características de una celda para electrocoagulación.....	22
10. Configuración de los electrodos en una celda .....	24
11. Superficie de respuesta en una investigación .....	26
12. Tipos de modelos de primer plajo y segundo orden con curvatura.....	27
13. Localización del laboratorio de la Facultad de Ciencias .....	29
14. Planta industrial textil Mecano Color SAC .....	30
15. Flujograma de procesos de la planta industrial textil Mecano Color .....	31
16. Flujograma para la electrocoagulación del efluente .....	37
17. Comportamiento de la temperatura en la electrocoagulación .....	39
18. Comportamiento del pH en la electrocoagulación .....	40
19. Comportamiento de la conductividad en la electrocoagulación .....	41
20. Comportamiento del potencial redox en la electrocoagulación.....	42

21. Demanda química de oxígeno antes y después de aplicar la electrocoagulación.....	44
22. Comportamiento de la DQO antes y después de la EC con la disolución al 75% v/v del efluente .....	45
23. Comportamiento de la reducción de DQO (%) .....	48
24. Diagrama de pareto estandarizado para DQO .....	50
25. Gráfica de probabilidad normal para DQO .....	50
26. Comportamiento de superficie de respuesta para la reducción de DQO (%).....	51
27. Comportamiento de la gráfica de contornos para reducción de DQO(%).....	52
28. Diagrama de pareto estandarizado para DQO .....	53
29. Gráfica de probabilidad normal para DQO .....	54
30. Comportamiento de superficie de respuesta para la reducción de DQO (%).....	54
31. Comportamiento de la gráfica de contornos para reducción de DQO(%).....	55
32. Comparativa de los valores máximos admisibles (VMA) y valores de la disminución de la DQO .....	56

## RESUMEN

La industria textil es la segunda actividad mas contaminante en el mundo, ya que genera grandes cantidades de efluentes con colorantes sintéticos y altos niveles de demanda química de oxígeno (DQO), siendo de vital importancia el tratamiento de estos efluentes textiles. El presente trabajo tuvo como objetivo evaluar la disminución de la demanda química de oxígeno (DQO) de efluentes con colorantes sintéticos de una industria textil aplicando el método de electrocoagulación a escala de laboratorio con la muestra pura del efluente y una disolución de 75% v/v del efluente. Se realizó 22 tratamientos en diferentes combinaciones de voltaje y tiempo de acuerdo al diseño factorial  $2^k$  con puntos centrales. En el tratamiento estadístico se 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). Los resultados determinaron una máxima disminución del 95% de la demanda química de oxígeno (DQO) del efluente con colorantes sintéticos en el tratamiento EC-11 a un tiempo de 20 minutos y a un voltaje de 10 voltios con la muestra pura, y un 87% de la disminución de la DQO con la disolución al 75% v/v del efluente en el tratamiento EC-10 a un tiempo de 20 minutos y a un voltaje de 10 voltios; lo cual demuestra que la electrocoagulación es altamente efectiva para su aplicación en el tratamiento de efluentes con colorantes sintéticos.

**Palabras clave:** Voltaje, demanda química de oxígeno, tiempo, colorantes sintéticos.

## ABSTRACT

The textile industry is the second most contaminating activity in the world, since it generates large quantities of effluents with synthetic dyes and high levels of chemical oxygen demand (COD; DQO); thus, it is of vital importance that these textile effluents be treated. The objective of the present work was to evaluate diminishing the chemical oxygen demand (COD) of effluents with synthetic dyes from the textile industry by applying the electrocoagulation method on a laboratory scale, with a sample of pure effluent and a dissolution of 75% v/v of the effluent. Twenty two treatments were carried out with different combinations of voltage and time, according to the  $2^k$  factorial design with central points. For the statical treatment, the variance analysis and surface response were used in order to evaluate the behavior of the decrease in the COD (%) in relation to the voltage and the electrocoagulation (EC) time. From the results, it was determined that a maximum decrease of 95% of the chemical oxygen demand (COD) for the effluent with synthetic dyes was achieved with treatment EC-11 at a time of twenty minutes and a voltage of ten volts used to treat the pure sample; and an 87% decrease in the COD with a 75% dissolution v/v of the effluent was achieved with treatment EC-10 at a time of twenty minutes and a voltage of ten volts. This demonstrated that electrocoagulation was highly effective in its application to treat the effluents with synthetic dyes.

**Keywords:** voltage, chemical oxygen demand, time, synthetic dyes

## I. INTRODUCCIÓN

Actualmente la humanidad se encuentra en una época marcada por el creciente consumismo de productos de cortos tiempos de uso, uno de ellos es el consumo de las prendas de vestido perteneciente al rubro de las industrias textiles, esto genera la eliminación de aguas residuales sin tratar produciendo impactos ambientales negativos y un alto grado de contaminación en la vida acuática, siendo el efluente más contaminante los colorantes utilizados en el proceso de teñido, estos presentan altos valores de Demanda Química de Oxígeno (DQO) entre 900 – 5000 mg O<sub>2</sub>/L (Cheshmeh y Safari, 2016). La Organización de las Naciones Unidas (ONU) señaló en un reporte que la industria textil es responsable del 20% de las aguas residuales globales y del 10% de las emisiones globales de carbono. La industria textil utiliza 93 000 millones de metros cúbicos de agua cada año, una cantidad suficiente para que sobrevivan 5 millones de personas (Organización de las Naciones Unidas, 2019).

En Perú, la industria textil genera millones de metros cúbicos de aguas residuales cada año, que se descargan en alcantarillas o aguas superficiales (por ejemplo, ríos). Los compuestos contaminantes más importantes en estas aguas residuales de teñido de textiles son 20 compuestos orgánicos fácilmente contenidos como colorantes, sustancias tóxicas, compuestos inhibidores, tensioactivos y sales que en conjunto conducen a un valor de pH extremadamente alto (Sen y Demirer, 2003).

En los tintes textiles el 30% es del grupo azoico, siendo el tinte que mayormente se utiliza, representando alrededor del 71% del total de producción. Por consiguiente, al aumentar el uso de tintes, aumenta la cantidad de agua a usar, ya que la fijación de los tintes en el tejido se realiza en una solución de tipo acuosa. Se necesitan unos 200 litros de recurso hídrico en la producción 1000 mg de productos textiles. Adicionalmente, el 51% de tintes usados en el sector textil acaban con agua liberada por esta industria (Ghaly, 2014).

Actualmente, el uso de un proceso electroquímico en el tratamiento de efluentes textiles brinda una opción eficaz en acorde del medio ambiente y también en lo económico, en comparación con otros métodos clásicos; se induce una corriente eléctrica en el efluente mediante electrodos metálicos, generando in situ el coagulante, así como también radicales

transitorios altamente oxidantes y desestabiliza las partículas contaminantes existentes (Apaza, 2016).

El presente trabajo de investigación esta dirigida a determinar la disminución de DQO de efluentes con colorantes sintéticos de una industria textil mediante electrocoagulación a escala de laboratorio.

En efecto el problema planteado de este trabajo radica entorno a la siguiente interrogante: ¿Cómo influye la electrocoagulación a escala de laboratorio en la disminución de la demanda química de oxígeno del efluente con colorantes sintéticos de una industria textil?. Con relación al problema planteado, se formula las siguiente hipótesis:

H0: “Que la electrocoagulación a escala de laboratorio no influye en la disminución de la demanda química de oxígeno del efluente con colorantes sintéticos de una industria textil”.

H1: “Que la electrocoagulación a escala de laboratorio influye en la disminución de la demanda química de oxígeno del efluente con colorantes sintéticos de una industria textil”.

### **1.1. Objetivo general**

Evaluar la disminución de la demanda química de oxígeno (DQO) del efluente con colorantes sintéticos de una industria textil mediante el método de electrocoagulación a nivel de laboratorio.

#### **1.1.1. Objetivos específicos**

- Caracterizar los parámetros fisicoquímicos del efluente con colorantes sintéticos antes y después de aplicar la electrocoagulación con la muestra pura del efluente y la disolución al 75% v/v del efluente.
- Construir y operar una celda para la aplicación de la electrocoagulación a nivel de laboratorio.
- Calcular la máxima disminución de DQO del efluente con colorantes sintéticos con la muestra pura y la disolución al 75% v/v del efluente.
- Comparar los resultados de la demanda química de oxígeno (DQO) después de la electrocoagulación del efluente y los valores máximos admisibles (VMA).

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. La situación problemática de la industria textil en el mundo y en el Perú

La industria textil consume grandes cantidades de agua durante la fabricación de productos textiles, durante el teñido y el acabado (ya que se usa el agua como solvente para la fijación de tintes), y también en el proceso de ser utilizado en el lavado en casa. Cerca del 54% del área aldonera es de riego, lo que supone el 73% de la producción aldonera mundial gracias a esta técnica agrícola. De acuerdo a la UNESCO, la producción de materia prima como el algodón genera el 2,7 % del consumo de agua en el mundo, y el 21 % de la contaminación industrial del agua dulce es originado por el procesamiento y teñido de productos textiles. Se calcula que el consumo promedio de agua durante los procedimientos de lavado, blanqueado, tintura, estampación y acabado final; promediando unos 150 000 litros de agua por cada 1000 kg de tejido, otros estudios indican que se requiere unos 12 000 litros de agua para producir 1 kg de tejido textil (Gautama, 2006).

La industria textil se caracteriza por su alto consumo de agua, energía y productos químicos de prueba. Cada fábrica textil no usa el mismo proceso de fabricación, no usa los mismos productos químicos y no usa la misma cantidad de agua. En 2015, la población alcanzó los 7 400 millones y el consumo per cápita textil llegó a 13,1 kg/persona/año. He aquí datos importantes a destacar de esta industria (Carrera, 2016):

- Cada año se consumen 54 millones de toneladas de fibras naturales, un millón de toneladas de tintes y 7 millones de productos químicos para el procesamiento textil/año. El algodón es la fibra que más agua consume en el proceso de tintura: 30 - 150 L/kg de materia textil.
- Los jeans requieren un mínimo de 42 litros de agua para teñir y lavar. En casa, usamos aún más agua; usamos 21 litros cada vez que los lavamos.

En Perú, la industria textil genera millones de metros cúbicos de aguas residuales cada año, que se vierten en alcantarillas o aguas superficiales (por ejemplo, ríos). Los compuestos contaminantes más importantes en estas aguas residuales de teñido de textiles son 20 compuestos orgánicos fácilmente contenidos como colorantes, sustancias tóxicas,

compuestos inhibidores, tensioactivos y sales que en conjunto conducen a un valor de pH extremadamente alto (Sen y Demirer, 2003).

## **2.2. Antecedentes de la investigación en tratamiento de efluentes textiles**

Medrano (2021), refiere en su estudio de investigación de “Remoción de colorantes reactivos de efluentes de teñido textiles mediante el método de electrocoagulación con placas de aluminio” que su trabajo resolvió el problema de las aguas residuales de teñido de textiles y el método propuesto es la electrocoagulación mediante la cual se reciclan electrodos de aluminio (chatarra, perfiles de aluminio), se trabajó en un reactor discontinuo a escala de laboratorio con electrodos simples, los polos se conectan en paralelo con un volumen de 2 litros bajo la condición de una densidad de corriente de 4 A/dm<sup>2</sup>, amperaje de 17 A, voltaje promedio de 2,65 V y tiempo de 51 minutos, logrando una tasa de remoción de colorante reactivo total de 99,23% con valores similares para cada colorante presente en el agua residual, la turbidez fue de 99,65% y la DQO de 42%.

Alvarez (2019), menciona en su estudio “Determinación de los parámetros óptimos para el tratamiento de un efluente textil mediante coagulación-floculación química y electrocoagulación”, que su objetivo de trabajo fue la eliminación del colorante Violeta de Metilo (MV) de un efluente de teñido de textiles, en comparación de procesos químicos de floculación-floculación y el método de electrocoagulación a escala de laboratorio, las placas utilizadas fueron de material aluminio y acero inoxidable de alta pureza, la distancia entre ellos es de 1,5 cm en cada prueba, la entrada de corriente constante es de 2 A durante 5 min y 9 voltios. Los resultados muestran que la electrocoagulación tiene una mayor eficiencia de eliminación de DQO que la coagulación química, reduciendo más del 90% DQO en comparación con las aguas residuales sin tratar.

Lasso (2020), afirma en su estudio que contrastó la coagulación con Moringa con electrocoagulación aplicada a agua de colorante para determinar el tratamiento más práctico. Se tomaron muestras de agua de una planta en la ciudad de Guayaquil. Los parámetros de turbidez, color, DQO y pH se analizaron antes y después de aplicar los métodos. La dosis óptima de bio-coagulante fue de 1266,7 ppm con remoción de 95,395% de turbidez, 96,718% de color, 62,727% de DQO y pH de 7, mientras que para electrocoagulación se trabajó 23,8 V y 3 A y el tiempo de 10 minutos, una remoción de 100% turbiedad, 99,615% color, 89,5% de DQO y pH 7. Se concluyó que el método de tratamiento más adecuado es la electrocoagulación.

Zaldumbide (2016), afirma en su investigación que evaluó dos métodos de electrocoagulación y electrocoagulación en combinación con Fenton. Las pruebas

experimentales de los dos procedimientos se realizaron a escala de laboratorio, en una celda batch con electrodos de Fe como ánodo y Al como cátodo. El porcentaje de remoción de DQO, después de 60 minutos de tratamiento con una densidad de corriente de 125 A/m<sup>2</sup> fue de 95,70%. Durante la combinación, la tasa de remoción de DQO después de 15 min fue de 94,14%, con una densidad de corriente de 52,08 A/m<sup>2</sup> y una concentración de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> de 5,25 mM.

González (2016), menciona en su trabajo de investigación “Tratamiento por electrocoagulación O<sub>3</sub>/uv para la degradación de índigo carmín presente en agua contaminada”, que realizó el tratamiento por el método electrocoagulación, ozonización y UV, en aguas contaminadas con colorante índigo carmín y aguas residuales de tintura textil. . El tratamiento de coagulación se aplicó a cuatro lotes de 2 L de solución acuosa de índigo (IC), a una conductividad inicial de 5 μS/cm, 500 S/cm, 1000 S/cm y 1500 μS/cm determinada; la conductividad óptima es de 1000 μS/cm y una hora de electrocoagulación; se obtuvieron índices de remoción de colorantes de 94,2%; 82,7% y 87,07%, respectivamente, de igual forma se trató el agua residual de las lavadoras textiles (mezclilla) para obtener una disminución de 65,12 DQO%; así para el caso de estudio, la conductividad inicial, densidad de corriente y tiempo de procesamiento fueron consideradas como importantes variables de proceso.

Clara (2021), refiere en su investigación “Evaluación a escala laboratorio del sistema electrocoagulación como propuesta para la remoción de color, turbiedad y dco en aguas residuales de origen textil”, que el tratamiento de aguas residuales de teñido de textiles por electrocoagulación incluyó una evaluación a escala de laboratorio para eliminar el color, turbiedad y demanda química de oxígeno (DQO) en la unidad de coagulación, donde se obtienen muestras de aguas residuales textiles, consistió en utilizar como electrodos placas de aluminio de las dimensiones recomendadas, separadas a una distancia de 1,25 cm, a 1 A y 35 V durante un tiempo de una hora en el equipo de electrocoagulación, se ha determinado que la electrocoagulación elimina hasta el 97 % del color, el 96 % de la turbidez y el 69 % de la demanda química de oxígeno (DQO) del agua contaminada con colorantes derivados de textiles.

Tinoco (2016), menciona en su trabajo de investigación “Remoción de colorantes de efluente sintético de industria textil aplicando tecnología avanzada de electrocoagulación”, que el objetivo de su investigación fue remover colorantes de efluente sintético en aguas residuales textiles, aplicando procesos avanzados, para lo cual se empleó la electrocoagulación y se utilizaron electrodos de hierro con 0.8 mm de distancia entre placas.

La metodología aplicada se basa de acuerdo a las variaciones de densidad de corriente, pH y tiempo de electrocoagulación. Las variables de respuesta son porcentaje de remoción de color y la demanda química de oxígeno. Como resultado de las pruebas de laboratorio, se obtuvo una remoción del 97,57 % de demanda química de oxígeno y 99,11 % de color a densidad de corriente 27,9 A/m<sup>2</sup>, pH de 10 y en un tiempo de 8 minutos, a 15 A y 18 V, concluyendo que el método de electrocoagulación puede ser aplicada con otro tipo de efluentes de diferentes actividades industriales.

Gómez (2013), refiere en su investigación “Estudio de Optimización de Variables de Funcionamiento de un Sistema de Electrocoagulación para tratar aguas de la industria textil”, que realizó pruebas de optimización en el reactor de electrocoagulación, formado por compartimientos de reacción que contienen como electrodos hierro y aluminio conectados a una fuente de poder de corriente continua, mediante las pruebas y el análisis de parámetros físico-químicos se determinaron los valores óptimos de las variables estudiadas: intensidad de corriente, tipo de electrodo, caudal y número de celdas. Los resultados de los parámetros físico-químicos como DQO y turbidez presentaron porcentajes de remoción superiores al 70%. En el caso de DQO la remoción fue de 87,4% a 8 A, 100 minutos y 25 voltios con ánodo de aluminio.

Bermeo (2016), sostiene en su estudio “Reducción de colorantes de efluente sintético de industria textil mediante electrocoagulación”, que el objetivo de su investigación fue reducir el colorante de un efluente sintético de una industria textil aplicando el método de electrocoagulación. Las pruebas se iniciaron con la preparación de muestra sintética y su caracterización; se realizan pruebas en lotes con 3 litros de muestra, a diferentes configuraciones de las celdas, con amperajes de 5A, 10A y 15A en tiempos determinados a pH de 10, utilizando electrodos de hierro. Los resultados óptimos obtenidos fueron con la configuración de 4 celdas y 2 paquetes a 10 amperios y 15 voltios, con un tiempo de 3 minutos; concluyendo que se obtuvo una remoción de 90% de Demanda Química de Oxígeno y 97% de color.

Rodríguez (2016), argumenta en su estudio “Determinación de la eficiencia de remoción de colorantes presentes en el efluente de una Industria de Textiles de tela de algodón mediante electrocoagulación” que los parámetros de operación óptimos para su investigación fue cuando se utilizó la disposición de 3x2, intensidad de 10 A, voltaje de 20 V, separación de placa a 1,2 cm, 3670  $\mu$ S/cm y el tiempo de electrocoagulación de 8 minutos en la muestra 3, en la cual alcanzó una eficiente reducción empleando placas de hierro; se realizó ensayos de tratabilidad para evaluar la disposición más eficiente para el procedimiento,

alcanzando una reducción en la DQO del 96,2% y una disminución del color de aproximadamente un 99,8%.

Armijos (2015), menciona en su estudio de investigación “Aplicación de tratamiento a efluentes de Industrias Textil mediante Electrocoagulación”, que utilizó el método de electrocoagulación para tratamiento de efluentes con colorantes textiles, utilizando electrodos de hierro con distintas disposiciones hasta llegar a la adecuada para ejecutar los ensayos y se determinó los niveles de eficiencia de este proceso en la reducción de la carga orgánica contaminante, en cuanto a la temperatura en la prueba batch 5 se registró un incremento de 21,1 °C a 26,9 °C. En específico se tiene como rango óptimo de trabajo cuando la disposición es de 2 placas de 4 celdas y 2 paquetes, la corriente a 20 A, voltaje de 15 V y el tiempo de 3 minutos, se alcanzó una reducción de DQO de 94% y de disminución de color de 96%

Bermeo (2017), realizó el estudio “Remoción eficiente de colorante refractario azul MNO reactivo en combinación con vinil sulfónico en aguas residuales mediante técnicas de electrocoagulación y adsorción”, en la cual se realizaron ensayos en batch, las condiciones de operación se usaron en el flujo continuo, luego se utilizó un proceso de adsorción con carbón activo; pH de 8,93 a 15 amperios, tiempo de 4 minutos y 25 voltios. Se determinó 31 mg/l de Demanda Química de Oxígeno que es equivalente a una remoción del 97,54% y 32 unidades de color que equivale al 99,11% de remoción, en la electrocoagulación y adsorción se consiguió una remoción de 97,95% para Demanda Química de Oxígeno y 99,20% para color, lo que facilita su reutilización o descarga al sistema de alcantarillado.

Mamani (2021), sostiene en su estudio “Modelamiento en el tratamiento fisicoquímico de aguas de lavado de lana por electrocoagulación para el cumplimiento de valores máximos admisibles (VMA)”, que utilizó un reactor tipo Batch que consistía en una celda de templada de 28,5 litros de capacidad con 20 electrodos de hierro, se determinó el tiempo adecuado de tratamiento y se estudiaron el efecto de las variables: potencial eléctrico (4, 5 y 6 V) y distancia entre electrodos (2, 4 y 6 cm.) sobre el porcentaje de Demanda Química de Oxígeno eliminada (DQO<sub>e</sub>); aplicando un diseño factorial 32, el pH fue de 3 hasta 4,7 en la electrocoagulación. Los resultados indicaron que las variables estudiadas presentaron efecto significativo sobre la DQO cuando el potencial eléctrico fue de 5 V, separación entre electrodos 2 cm y 30 minutos de tiempo de electrocoagulación.

Terán y Banchon (2015), refiere en su estudio “Dosificación mínima del reactivo Fenton para la remediación de agua contaminada con colorantes”, que se utilizó dos tipos de oxidantes (hipoclorito de sodio comercial al 5% y peróxido de hidrógeno al 30%) para comparar su eficiencia en la remoción de colorantes con el reactivo Fenton; de ambos

tratamientos el reactivo Fenton permitió la remoción del 99,9% de DQO; y en un rango de pH de 9 a 7 el potencial redox presenta un incremento de 124 mV a 449 mV, tomando en cuenta que el pH controla la calidad de la reacción de oxidación, la remoción fue de 100% de turbidez, en comparación con el cloro y el peróxido de hidrógeno los cuales no removieron ni el 50% de la contaminación.

### 2.3. Teoría relacionado al tema de investigación

#### 2.3.1. Procesos en la industria textil

Una vez fabricado, el tejido se somete a una serie de procesos húmedos que incluyen condiciones de preparación, teñido y acabado. Estos procesos son la fuente de la mayoría de las aguas residuales de la industria textil. En la tabla 1, se presentan las diferentes actividades de consumo de agua realizadas según el tipo de fibra utilizada (algodón, lana o poliéster) (López, 2015).

**Tabla 1.** Procesos realizados según el tipo de fibra.

Fase	Proceso	Tipo de Fibra		
		Algodón	Lana	Poliéster
Preparación	Desencolado	*		*
	Desengrasado		*	
	Carbonización		*	
	Batanado		*	
	Descrudado	*		*
	Mercerizado	*		
	Blanqueo Químico	*	*	
Tintura	Teñido/Estampación	*	*	*
Acabado	Acabados	*	*	*

Fuente: López (2015).

Las características de las aguas residuales generadas en una fábrica textil dependerán de las operaciones específicas que se realicen, principalmente del tipo de hilo a tratar y de la maquinaria utilizada. A pesar de la gran variedad de procesos y productos químicos utilizados, las aguas residuales producidas en la industria de fibras naturales tienen varias características en común, a excepción del lavado de lana. Las aguas residuales de fibra natural se caracterizan por una alta variabilidad en la descarga y carga de contaminantes, así como por un bajo contenido en suspensión y coloidal. Por lo general, son de color, tienen una carga orgánica promedio de aproximadamente el doble que las aguas residuales municipales y, por lo general, no contienen productos tóxicos ni microorganismos patógenos. Además, suelen carecer de nutrientes, principalmente nitrógeno (López, 2015).

### **2.3.2. Proceso de teñido en la industria textil**

El teñido es un procedimiento químico para teñir diversas fibras textiles, es necesario en las operaciones textiles ya que aumenta de forma relevante el valor monetario del producto (Castillo, 2019).

Actualmente, casi todas las organizaciones textiles implementan dos técnicas de tintura, las cuales son el teñido en Foulard y el teñido por agotamiento (Castillo, 2019):

- Teñido en Foulard: En este procedimiento el colorante se aplica de forma mecánica al sustrato y luego se fija con vapor en un sistema semicontinuo. Este proceso no se usa con frecuencia ya que el colorante se impregna a la fibra entre un 50 a un 80% y requiere de instalaciones especializadas.
- Teñido por agotamiento: Es un procedimiento discontinuo, en el cual la fibra de teñido se lleva a un equilibrio con una solución que contiene los colorantes y auxiliares de tintura por unos minutos o por unas horas, los cuales se fijan en el material textil como resultado de una transferencia del colorante a la fibra debido a la intervención de las fuerzas de afinidad entre el colorante y el material textil a ser teñido.

### **2.3.3. Colorantes textiles**

El procedimiento de fabricación de manufacturas textiles implica una secuencia de actividades utilizando diversos materiales como lana, tinturas, fibras sintéticas y algodón. Las aguas residuales líquidas generadas después de varios procedimientos están compuestas de carga contaminante de diferente origen y diversas estructuras. Actualmente se utilizan en las industrias diferentes tipos de colorantes, categorizado en dos clases; pigmentos y colorantes (Zaruma, 2018).

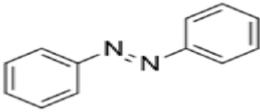
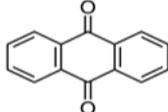
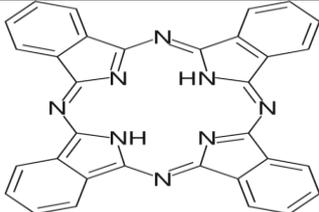
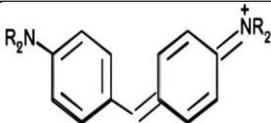
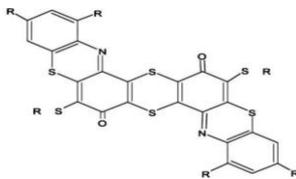
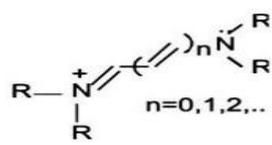
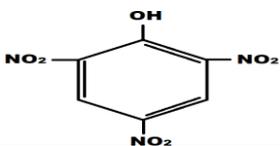
### **2.3.4. Clasificación de Colorantes**

En la actualidad se puede encontrar una diversa cantidad de colorantes, así como también una amplia gama de colorantes, se puede clasificarlos según su estructura química y de acuerdo al método de empleo por el que se utilizan en el rubro textil (Zaruma, 2018).

#### **2.3.4.1. Clasificación según el grupo químico**

Se presenta con importantes detalles en la Tabla 2, en la cual se reúne a los colorantes de mayor a menor relevancia de utilización en el sector textil (Zaruma, 2018).

**Tabla 2.** Colorantes de acuerdo a su estructura química

Familia	Grupo Cromóforo	Descripción
Azoicos		Es el más importante en el sector textil con una producción cercana al 70% de los colorantes
Antraquinonas		Son quinonas tricíclicas procedente del antraceno compuesto de uno o más grupos hidroxilo
Ftalocianina		Se encuentran compuestos por la unión de cuatro grupos isoindol (dos anillos fusionados, uno bencénico y el otro; una piridina) por medio de cuatro átomos de nitrógeno.
Ion arilcarbonio		De acuerdo a sus características, esta compuesta por un átomo carbonilo unido a dos o tres anillos aromáticos.
Sulfuro		Son completamente insolubles en agua pero solubilizable por reducción. Suministra una serie de colores bajos y apagados.
Polimetino		Se clasifican en tintes neutros, catiónicos y aniónicos. En los extremos de su cadena poseen un grupo donador y un sustractor de densidad electrónica.
Nitro		Son incoloros cuando están separados. Su absorción esta próximo del campo visible por mezcla de grupos auxocromos débiles.

Fuente: Zaruma (2018).

El tipo de colorante mayormente usado son los colorantes azoicos, que se distinguen por su formación mediante un doble enlace de nitrógeno. Estos colorantes presentan baja biodegradabilidad, pero se han conseguido diversos entornos para que se degraden en su totalidad. Algunos de estos compuestos han demostrado ser cancerígenos y mutagénicos (Zaruma, 2018).

### 2.3.4.2. Clasificación según su forma de utilización

En el sector textil hay diversas variedades de fibras (algodón, poliéster, nylon, lana, etc.) a las que se les aplica distintos procedimientos de tinción debido a su capacidad y nivel de sujeción del tinte. En la Tabla 3, se presenta la clasificación de los tintes según su forma de utilización se emplean según el tipo de tejido (Zaruma, 2018).

**Tabla 3.** Colorantes por su forma de utilización

<b>Tipo</b>	<b>Fibras</b>	<b>forma de utilización</b>	<b>Grupos cromóforos</b>
Ácidos	lana, seda, papel, Nylon, tintas y piel	Usualmente para baños de tinte neutros a ácidos	antraquinona, trifenilmetano, Azoico, nitro y nitroso
Básicos	Papel, poliacrilonitrilos, nylon, poliéster y seda	Para baños de tinción básicos	trimetilmetano, antraquinona y azoico,
Directos	Algodón, rayón, piel y nylon	Sumersión de la fibra en un baño con una solución electrolito.	Azoico
Dispersos	Poliéster, poliamida, acetato, acrílico y plásticos	En configuración de presión coloidal con mayores temperaturas y presión.	Azoico, antraquinona y nitro
Mordiente	Lana, piel y algodón	Se da en conjunto con sales de Cr	Azoico y antraquinona
Reactivos	Algodón, lana, seda y nylon	reaccionan con los grupos funcionales de la fibra para enlazarse covalentemente	Azoico y antraquinona
En azufre	Algodón y rayón		Composición indeterminada
En la tina	Algodón, rayón y lana	disminución con hidrosulfito de sodio	Antraquinona e índigos

Fuente: Zaruma (2018).

La siguiente Tabla 4 muestra el porcentaje de fijación del tinte en los tejidos por diversos procedimientos de aplicación (Zaruma, 2018).

**Tabla 4.** Descripción del grado o nivel de fijación de colorantes

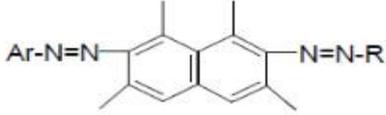
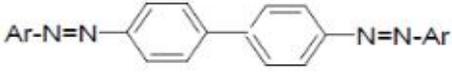
Procedimiento aplicado	Fibra	Grado o nivel de Fijación (%)	Vertido en efluentes (%)
Ácido	Poliamida	86-96	5-15
Básico	Acrílico	96-100	0-5
Directo	Celulosa	71-96	5-31
Disperso	Poliéster	91-100	0-12
Reactivo	Celulosa	51-91	10-51
Sulfuro	Celulosa	61-91	10-41
Tina	Celulosa	81-96	5-21

Fuente: Zaruma (2018).

El vertido de estos desechos en las fuentes de agua provoca una severa contaminación de los ríos y acuíferos próximos a las zonas industriales. Los colorantes no son biodegradables y se pueden aglomerar en los microorganismos vivos produciendo diferentes enfermedades. Por consiguiente, los efluentes compuestos por colorantes sintéticos se consideran uno de los tipos de aguas residuales más difíciles de tratar. Por esta razón, las aguas residuales que contienen esta sustancia deben ser debidamente tratadas previamente a su vertido a los cuerpos de agua, sino perjudicará significativamente a los componentes ambientales (Zaruma, 2018).

#### **2.3.4.3. Colorantes sintéticos directos**

Los colorantes sintéticos directos se denominan así porque tiñen la fibra sin necesidad de que un segundo producto actúe como aglutinante de la misma. Hay dos familias de colorantes directos; colorantes azo y colorantes tiazol (Zaruma, 2018).

Grupos azo	Color
<b>monoazo:</b>	
Alquilo-N=N-alquilo	Anaranjado claro
Alquilo-N=N-arilo	Amarillo
Arilo-N=N-arilo	Rojo anaranjado
<b>Bisazo:</b>	
	{ Café Azul Negro         }
	{ Amarillo Anaranjado Rojo         }
<b>Trisazo:</b>	
Ar-N=N-arilo-N=N-arilo-N=N-Ar	café-azul verdoso

Fuente: Zaruma (2018).

**Figura 1.** Colorantes azoicos

Las características principales de los colorantes sintéticos directos son los siguientes (Zaruma, 2018):

- Generalmente son solubles en agua, aunque algunos precisan para ello la presencia de carbonato sódico.
- Su solubilidad aumenta con el número de grupos sulfónicos y disminuye al aumentar su peso molecular.
- En frío forman soluciones coloidales.
- Los colorantes directos resisten bien a los ácidos, aunque tienden a enrojecer.
- En presencia de agentes reductores rompen su molécula hacia derivados aminados.

#### 2.4. Tratamiento de aguas residuales y metodologías de aplicación

Los efluentes de agua residual de diferentes industrias se producen como resultado de los distintos y múltiples procedimientos de cada sector industrial en sus diferentes vías de fabricación de productos. La variedad de efluentes de agua residual es de grandes cantidades, ya que abarcan diversos tipos de contaminantes. En casi todos los procedimientos de diferentes sectores en las industrias, emplean el agua como recurso vital en sus operaciones, después de cumplir su función en el proceso industrial; es necesario el tratamiento del efluente de agua residual mediante diferentes métodos de tratamiento de aguas residuales previo a la descarga al cuerpo receptor natural o al colector de aguas negras (Chen, 2004).

### 2.4.1. Definición de tratamiento electroquímico

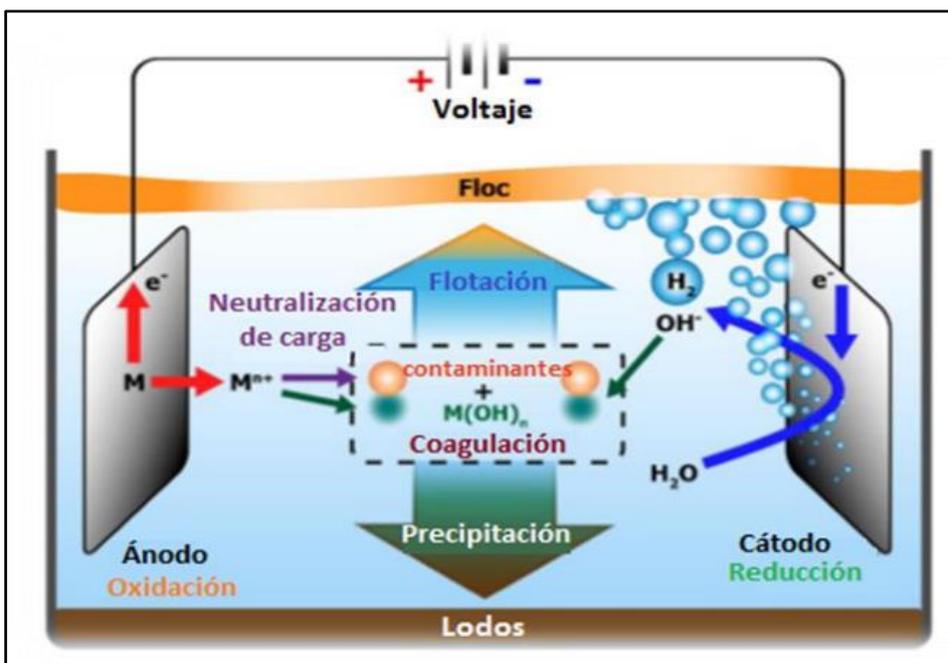
Es la parte de la química que se especializa en el estudio de las reacciones que involucran corrientes eléctricas que fluyen en los circuitos. El tratamiento consiste en pasar corriente continua a través de dos electrodos que pueden ser de aluminio, cobre, hierro, titanio, grafito, acero, platino, entre otros, sumergidos en las aguas residuales de salida requeridas del procesamiento (Collazos, 2008).

### 2.4.2. Definición de electroquímica

El concepto de electroquímica se define como el estudio de la interacción entre la química y la energía eléctrica; las reacciones químicas generan efectos eléctricos y también fenómenos químicos estimulados por la actividad de la corriente eléctrica, en su mayoría las técnicas usadas en el tratamiento de efluentes de agua residual son: electrocoagulación, flotación, electrooxidación y galvanoplastia (Zamora, 2011).

### 2.4.3 Definición del método de electrocoagulación

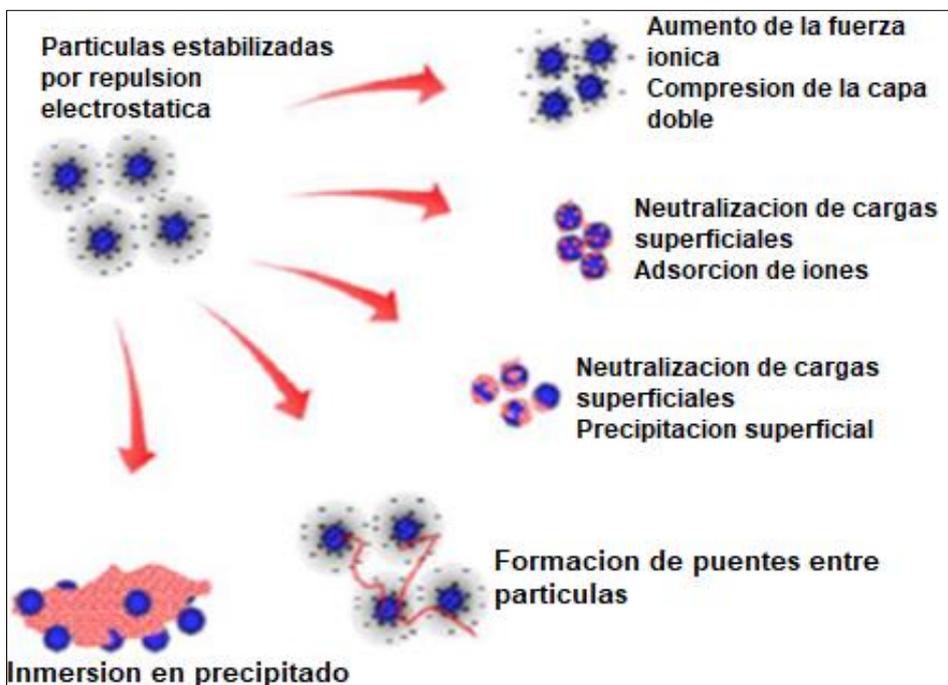
Se define como un procedimiento electroquímico que se fundamenta en el suministro de electricidad a electrodos de diferentes materiales; estos producen coagulantes in situ como resultado de la disolución de un ánodo o también llamado electrodo de sacrificio, las partículas contaminantes del medio acuoso se juntan entre sí, lo cual permite transformarla en suspensión y dividirla del medio acuoso por diferentes técnicas las cuales pueden ser; separación sólido/líquido mediante filtración, por flotación y luego sedimentación (Restrepo, 2006).



Fuente: Restrepo (2006).

**Figura 2.** Proceso de la electrocoagulación en una celda

La expresión llamada coágulo relaciona a las reacciones que se producen cuando se incorporan reactivos químicos en el efluente de agua residual, generando productos insolubles; el proceso de coagulación empieza cuando se añade coagulante en el efluente para favorecer la unión en las partículas; su forma de acción es produciendo una reacción química que suprime la carga negativa generando que las contaminantes sean separados entre ellos para una coagulación. Actualmente, el método electroquímico de electrocoagulación es una técnica altamente eficiente en tratamientos de efluentes de aguas industriales (Restrepo, 2006).



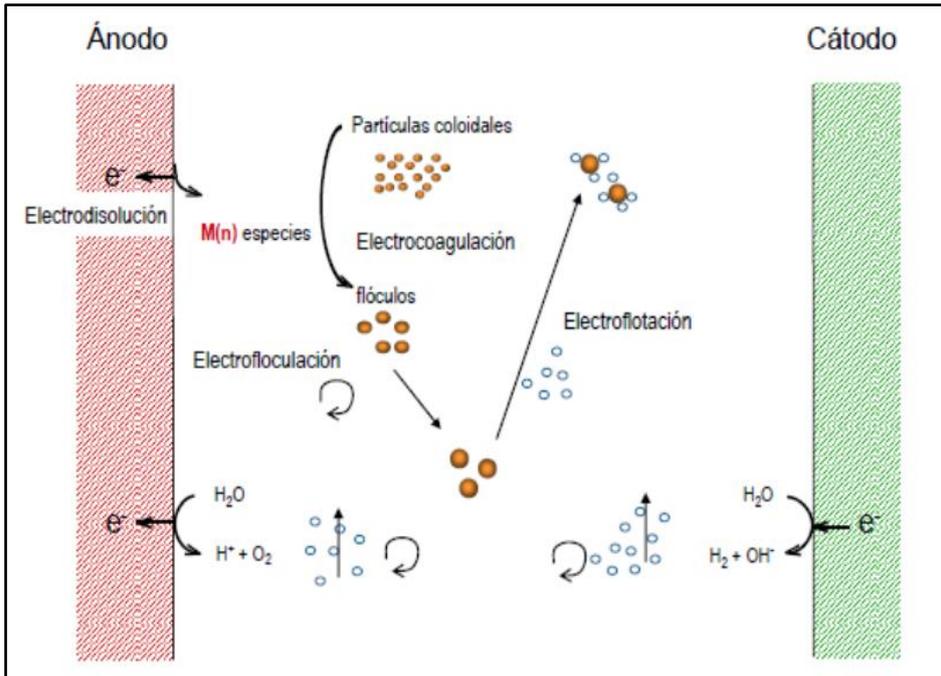
Fuente: Collazos (2008).

**Figura 3.** Proceso de coagulación química

#### 2.4.4. Fundamento del método de electrocoagulación

Es una técnica utilizada para tratar los efluentes residuales, la carga contaminante de muchos tipos de aguas residuales se eliminan aplicando el principio de coagulación, pero en este caso no se utiliza ningún coagulante químico, la función la realiza una corriente eléctrica que se introduce en el medio líquido contaminado (Chen, 2004).

La electrocoagulación se puede definir entonces como un proceso en el cual las partículas contaminantes suspendidas, emulsionadas o disueltas en un medio acuoso son desestabilizadas, induciendo corrientes eléctricas en el agua a través de placas metálicas paralelas (Restrepo, 2006).



Fuente: Chaturvedi (2013).

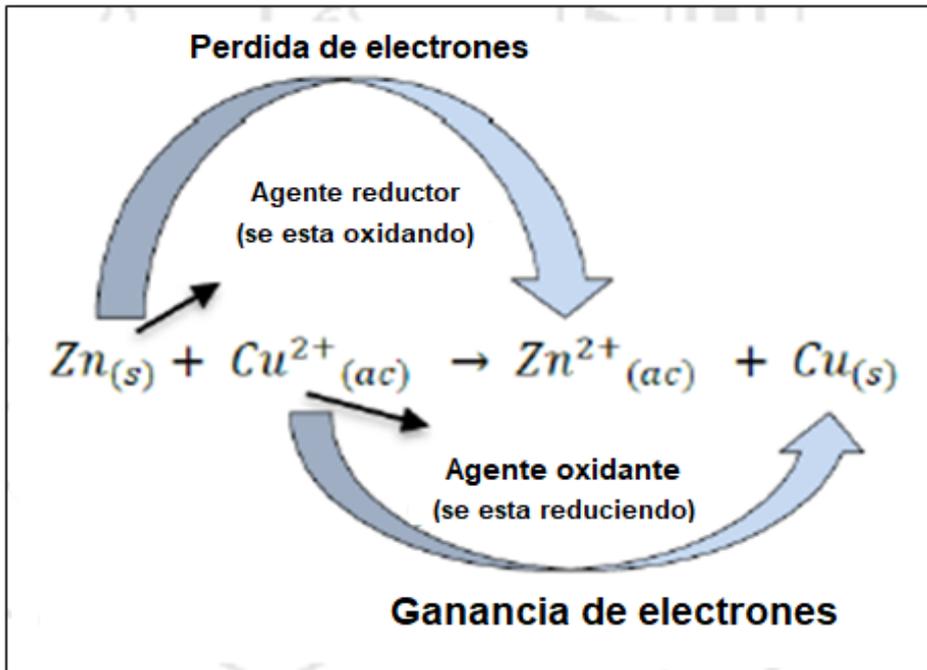
**Figura 4.** Comportamiento de la electrocoagulación

Las características de las reacciones redox son las siguientes (Nanseu, 2009):

### 1) Características de las reacciones redox

Las reacciones redox se producen a través de transferencia de electrones. Las reacciones redox presentan las siguientes propiedades:

- El intercambio de electrones está dirigido desde una especie hacia la otra, por intermedio de conductores, y fluyen siempre desde el ánodo hacia el cátodo y van en una sola dirección.
- Se producen en una interface de tipo sólido – disolución y puede ser de origen acuosa o también no, por ejemplo una membrana, se les denomina reacciones en forma heterogénea.
- En las reacciones redox, se producen de forma simultánea las semirreacciones de oxidación y reducción.



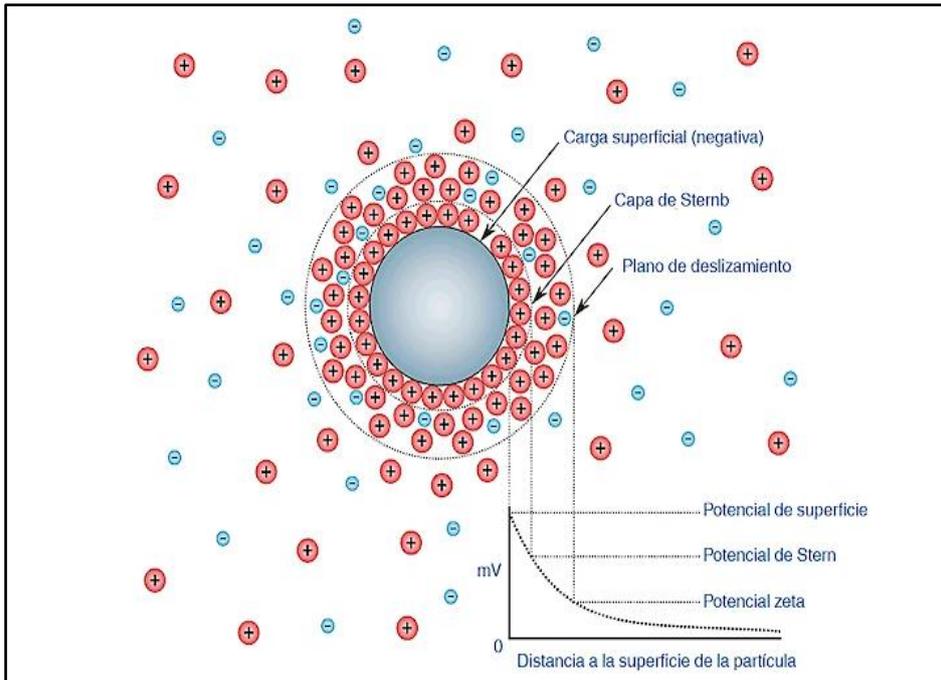
Fuente: Nansu (2009).

**Figura 5.** Proceso de reacciones redox en simultaneo

#### 2.4.5. Descripción del sistema de electrocoagulación

En el proceso denominado como electrólisis se produce una secuencia de procesos de tipo físicoquímico las cuales facilitan la eliminación de las partículas contaminantes en el medio acuoso. Primero se genera una secuencia de reacciones en los materiales conductores que proporcionan iones tanto de carga positiva como también de carga negativa, generalmente el electrodo de sacrificio o ánodo es el que suministra los iones del metal conductor ya que se disuelve lentamente, por otro lado el electrodo denominado cátodo queda permanece de forma pasiva (Restrepo, 2006).

Los iones generados cumplen la función de desestabilizar las cargas que poseen las partículas contaminantes presentes en el agua. Una vez que estas cargas han sido neutralizadas, los sistemas que mantienen las partículas en suspensión desaparecen, lo que permite que se formen agregados contaminantes y, por lo tanto, se inicie la coagulación. Los iones suministrados por los electrodos desencadenan la remoción de contaminantes que puede ocurrir de dos formas: primero por reacción química y precipitación, y segundo por proceso físico de aglomeración de partículas. Los coloides, dependiendo de su densidad, pueden flotar o precipitar (Chaturvedi, 2013).

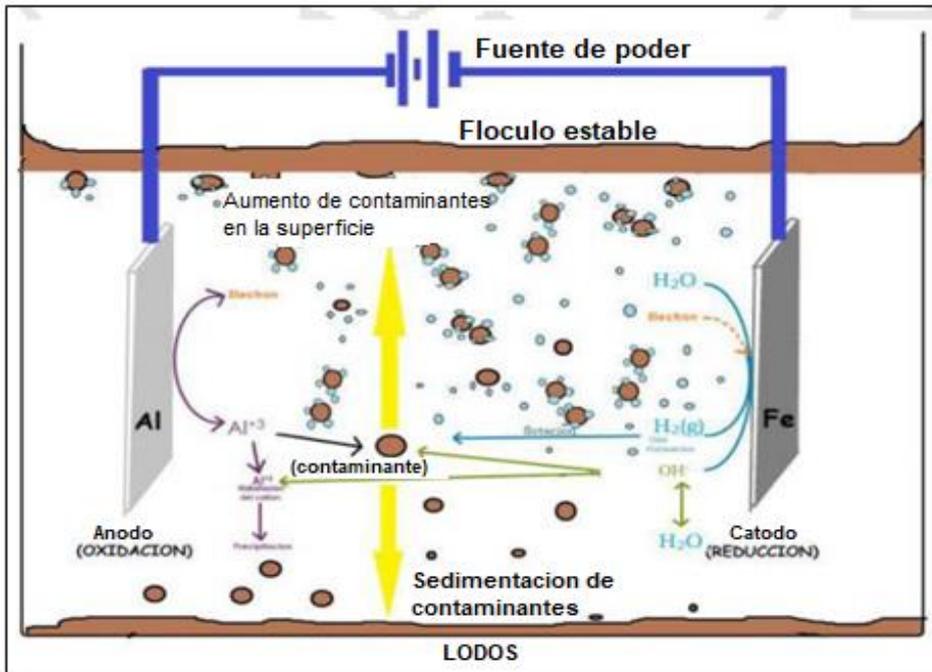


Fuente: Chaturvedi (2013).

**Figura 6.** Potencial Z en la electrocoagulación

Las reacciones más importantes que pueden sufrir las partículas contaminantes son: hidrólisis, electrólisis, reacción de ionización y formación de radicales libres. Estas reacciones alteran las propiedades del sistema contaminante del agua, provocando la remoción de la carga contaminante del agua (Restrepo, 2006).

La electrocoagulación presenta la siguiente secuencia; en principio se produce el coagulante mediante la oxidación del ánodo compuesto de un metal conducto al inducir corriente eléctrica a la celda, seguidamente se genera una desestabilización de las partículas y las emulsiones, después se da origen a la formación de flóculos mediante la aglomeración de contaminantes y/o adherencia en el mismo coagulante (Chaturvedi, 2013).



Fuente: Chaturvedi (2013).

**Figura 7.** Reacciones en el proceso de electrocoagulación

#### 2.4.6. Parametros que intervienen durante la electrocoagulación

##### 1) Comportamiento de la temperatura

Cuando se induce la corriente eléctrica en la celda, la temperatura aumenta en principio hasta los 59 °C aproximadamente, instante que llega a un nivel alto y después disminuye. El incremento de la temperatura se debe a un aumento de la actividad destructiva de la capa de óxido de aluminio sobre el área del electrodo (Collazos, 2008).

##### 2) Comportamiento del voltaje

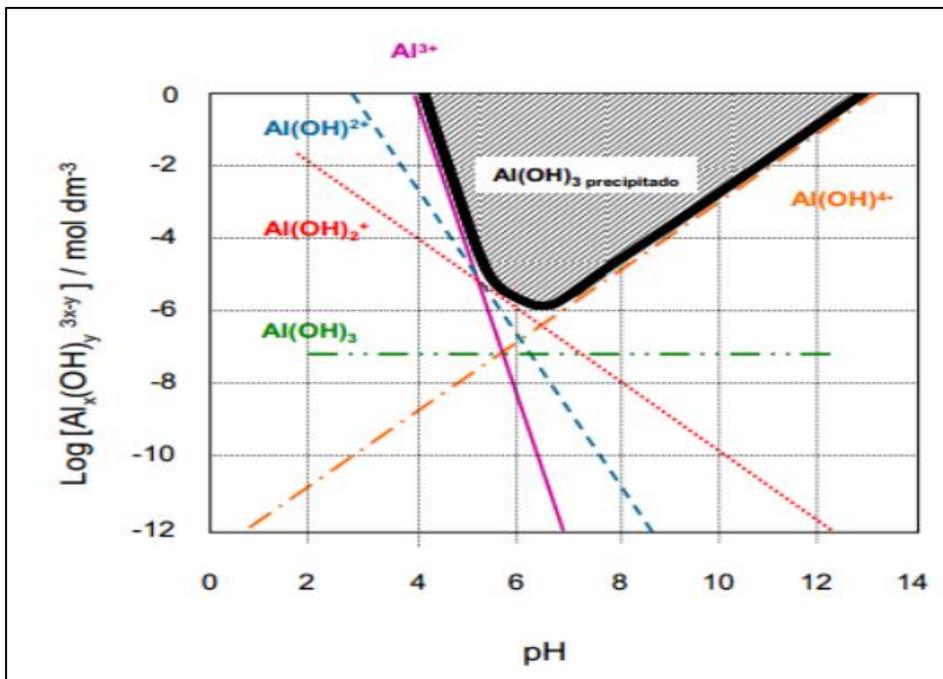
El voltaje en la celda de electrocoagulación establece la especie que prevalece en la reacción que ocurre en el ánodo, la diferencia de potencial eléctrico es equitativo al costo de la energía y puede cambiar dependiendo de otros parámetros como la conductividad eléctrica, separación de placas, los materiales; así como también otras características importantes (Chen, 2004).

##### 3) Comportamiento de la densidad de corriente eléctrica

Establece la proporción calculada de iones metálicos en la solución acuosa, así como también la concentración de microburbujas generadas en la celda, de acuerdo a los reportes de investigaciones mencionan una extensa serie de densidades de corriente suministrada que van desde 2 hasta 101 mA/cm<sup>2</sup> lo cual está sujeto al tipo de solución acuosa a investigar (Chen, 2004).

#### 4) Comportamiento del pH

El potencial de hidrogeno de la solución acuosa durante el tratamiento electroquímico se refleja en la respectiva eficacia de la corriente eléctrica y el comportamiento de los hidróxidos formados a partir del metal conductor y la electrolisis del agua. La actividad de tratamiento depende de la naturaleza del contaminante con una mejor eliminación del contaminante más cerca de pH 7,1. Por otro lado, el gasto de energía es mas alto para pH neutro debido a los cambios en la conductividad eléctrica. Cuando la conductividad eléctrica es elevada, el efecto del pH es despreciable. El potencial de hidrógeno (pH) de las aguas residuales después del tratamiento de electrocoagulación aumentará para las aguas residuales ácidas, pero disminuirá para las aguas residuales alcalinas (Chen, 2004).



Fuente: Chen (2004).

**Figura 8.** Diagrama de especiación del aluminio (Al) en función de la concentración y pH

#### 5) Comportamiento del tipo de electrolito

En su mayoría se utiliza el cloruro de sodio con la finalidad de aumentar la concentración de la conductividad de los efluentes industriales antes de realizar las pruebas experimentales; la conductividad eléctrica afecta directamente a la producción faradica, la diferencia de potencial eléctrico y por consiguiente el gasto de energía en la celda. De igual forma, un aumento en la conductividad eléctrica utilizando cloruro de sodio presenta otros beneficios, los aniones de cloruro puede disminuir de forma relevante los efectos desfavorables de otros aniones como por ejemplo el anion bicarbonato y el anion sulfato. Por otro lado, altas concentraciones de cloruro de sodio (NaCl) origina un mayor gasto de las

placas de material de aluminio a causa de la corrosión por picaduras; por lo tanto se genera de forma irregular el suministro de iones del metal conductor (Kabdash, 2012).

#### **6) Comportamiento del tipo de material de electrodo**

Según los estudios reportados se han usado en su mayoría electrodos de materiales como por ejemplo el aluminio, acero dulce, acero inoxidable y hierro, la efectividad de los electrodos esta relacionado con el potencial estándar de reducción; en aspectos de costos y una rápida disposición, los materiales de metal conductor como el aluminio y el hierro son los metales que se usan mayormente en la electrocoagulación, siendo el material de aluminio el mas utilizado debido a la formación del hidróxido de aluminio, un coagulante de alta efectividad en la electrocoagulación (Collazos, 2008).

#### **7) Comportamiento del tiempo de residencia**

Las revisiones científicas reportan que a mayores tiempos de electrocoagulación se obtiene mas cantidad de lodos, se genera mayores cantidad de microburbujas que al momento de subir desplaza las partículas contaminantes hacia la parte superior en forma de lodos en forma de espumas, de igual forma propicia el incremento de formación de flóculos y finalmente la precipitación de las particulas contaminantes (Nanseu, 2009).

#### **8) Comportamiento de la conductividad electrica**

Los autores reportan que un incremento del parámetro conductividad produce una mayor densidad de corriente eléctrica, en cuanto a la diferencia de potencial eléctrico aplicado en la celda permanece continuo, al incrementar la conductividad eléctrica, al mantener de forma continua la densidad de corriente, la diferencia de potencial eléctrico suministrado disminuye (Kabdash, 2012).

### **2.4.7. Descripción de los reactores utilizados en la electrocoagulación**

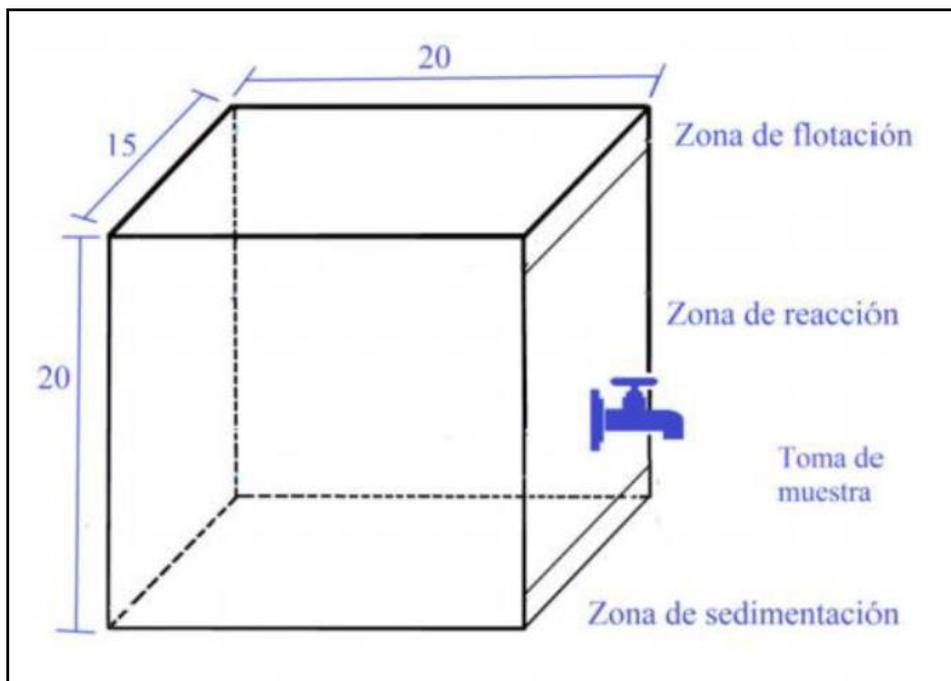
Diversas investigaciones científicas mencionan que los reactores de electrocoagulación se dividen esencialmente como reactores de tipo lote o discontinuo y reactores de sistema de flujo constante. La utilización de los reactores esta sujeto a las características de las particulas del efluente de agua residual, así como el volumen de efluente a utilizar en la electrocoagulación (Restrepo, 2006).

#### **1) Características del reactor de tipo lote o discontinuo:**

En su configuración más básica, un reactor de flujo discontinuo o de lote esta compuesto de una celda en la cual tanto el ánodo como el cátodo están ubicados en disposición vertical y acoplado a una fuente de poder (Arango, 2007).

## 2) Características de las zonas de electrocoagulación

- **Fase de reacción:** Es la fase en la cual están inmersos las placas del metal conductor y se origina las reacciones de electrocoagulación.
- **Fase de sedimentación:** Es la fase en la cual se produce la precipitación de los lodos generados en la fase de reacción.
- **Fase de Flotación:** Es la fase en la cual se aglomeran los lodos como resultado de la flotación de las microburbujas de hidrogeno y oxigeno.



Fuente: Restrepo (2006).

**Figura 9.** Características de una celda para electrocoagulación

### 3) Descripción de la fuente de alimentación eléctrica

La fuente de alimentación es usado en los ensayos para ajustar la densidad de corriente aplicada en la celda, siendo el caso de una fuente de poder de 11 A y un voltaje de 0 a 30 voltios, que puede ser monitoreada con amperímetros y voltímetros analógicos; para suministrar corriente directa continua a las placas se emplean un cable eléctrico conectado a caimanos para acoplarlos a los electrodos aluminio y de hierro (Arango, 2007).

#### 2.5. Descripción de la secuencia de reacciones químicas del aluminio y hierro

El metal conductor como el hierro es utilizado en el tratamiento de efluentes de diferentes industrias, a continuación de detallan las reacciones cuando el hierro es usado como ánodo en la celda de electrocoagulación (Vidal, 2013).

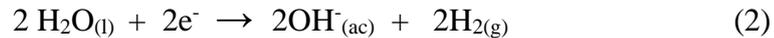
### 1) Reacciones del hierro cuando se utiliza como ánodo

- **Para disposición de hierro (Fe) como ánodo:**



- **En el cátodo se produce la siguiente reacción:**

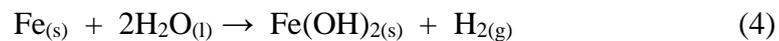
El proceso de electrolisis produce en el cátodo los iones hidróxidos y gas H<sub>2</sub>:



La producción de la especie insoluble Fe(OH)<sub>2</sub> se puede escribir como:



Y la reacción global para la secuencia de reacciones



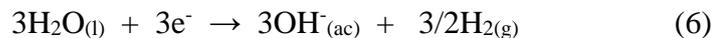
### 2) Reacciones del aluminio cuando se utiliza como ánodo

- **Para disposición del aluminio (Al) como ánodo:**



- **En el cátodo se produce la siguiente reacción:**

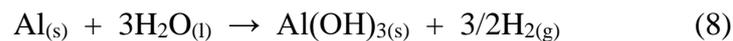
La electrolisis del agua produce en el cátodo los iones hidróxidos y gas H<sub>2</sub>:



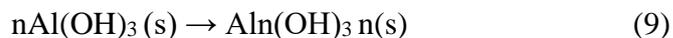
La producción de la especie insoluble Al(OH)<sub>3</sub> se puede escribir como:



La reacción global para dar el producto insoluble último es:



De forma simultánea el Al<sup>3+</sup> también se transforma en especies monoméricas y poliméricas, con la tendencia a su forma mas estable Al(OH)<sub>3(s)</sub>.

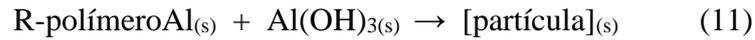


Las reacciones de precipitación producen el hidróxido de aluminio Al(OH)<sub>3(s)</sub>, tal como se evidencia en la reacción de ánodo. El hidróxido de aluminio es un compuesto amorfo de naturaleza gelatinosa, presenta una inmensa área en la superficie que lo conforma con características absorbentes, favoreciendo los procesos como la atracción y adsorción de los contaminantes del efluente de agua residual (Vidal, 2013).

De forma parecida a la electrocoagulación con ánodos de aluminio, la eliminación de los colorantes de efluentes se explica por complejación superficial y atracción electrostática (Vidal, 2013).

- La adsorción sobre Al(OH)<sub>3</sub> produce flóculos, se da esencialmente a pH > 6.5:





- Y con especies poliméricas a pH 5.0 – 6.0:



- Se da la precipitación por neutralización de cargas opuestas, dando lugar a la reacción de los contaminantes con especies monoméricas a pH < 5.0:

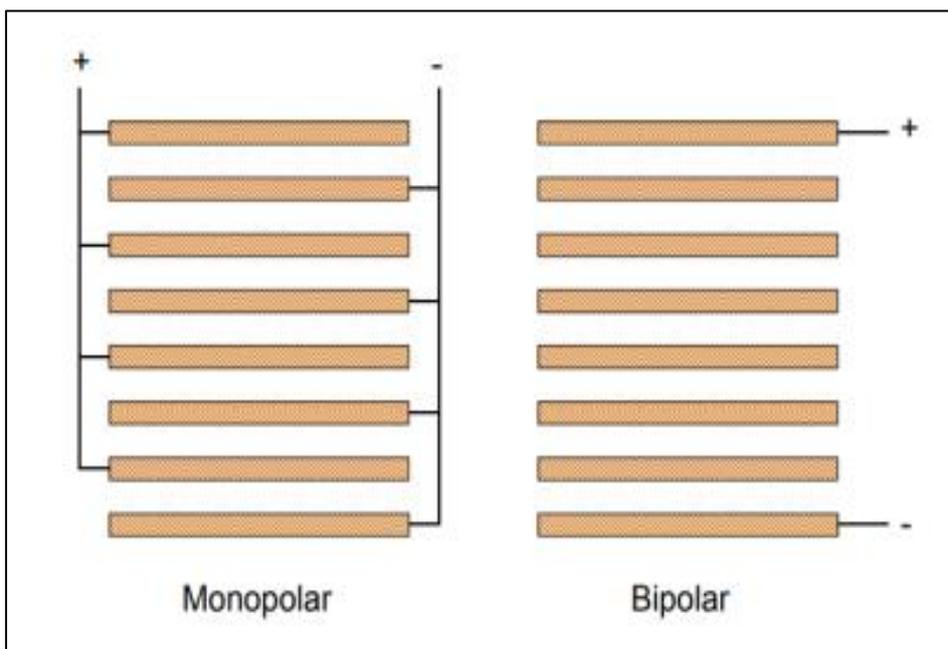


Adicionalmente, las superficies de flóculos amorfos recién producidos de  $\text{Al(OH)}_3$  también tiene la capacidad adsorber compuestos contaminantes solubles y/o partículas, que son separados de la solución acuosa, generando compuestos insolubles mas simples y sencillos (Vidal, 2013).

## 2.6. Aspectos importantes para la construcción y operación de una celda

Actualmente no existe un método fijo y establecido para la construcción y operación de una celda electrocoagulación, por lo cual es necesario tener en cuenta los aspectos físicos y químicos para garantizar el funcionamiento y la construcción del dispositivo. Las consideraciones más importantes se detallan a continuación (Arango, 2007):

- Forma del prototipo de celda
- Tipo de electrodo a utilizar
- Cantidad de electrodos



Fuente: Kabdash (2012)

**Figura 10.** Configuración de los electrodos en una celda

## 2.7. Marco legal

La descarga de aguas residuales industriales a la red de alcantarillado genera un problema importante para los métodos de tratamiento de efluentes de agua residual, por lo que no se tiene que superar la normativa de valor máximo permisible (MAV) para efluentes operando a la red de desagüe se ha dispuesto Decreto Supremo N° 010 -2019- Vivienda Sanitaria. Por ello, se aprobó el Decreto Supremo 010-2019-VIVIENDA, en el cual los VMA disponen la descarga de efluentes residuales no domésticas al alcantarillado sanitario para prevenir que las instalaciones e infraestructura, pisos de sanitarios, maquinaria y equipos sean deteriorados, y asegurar la operación normal, asegurando la sostenibilidad del drenaje y tratamiento de efluentes (Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento, 2019).

### 2.7.1. Definición de valores máximos admisibles

Se define como el valor de concentración de elementos, sustancias o parámetros físicos y/o químicos, que caracteriza a las aguas residuales no domésticas que serán vertidas al sistema de alcantarillado, causando perjuicios próximos o progreso para las instalaciones, infraestructura sanitaria, tratamiento de aguas residuales y tener repercusiones en el proceso de tratamiento de aguas residuales (Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento, 2019).

**Tabla 5.** Valores máximos admisibles para descarga de agua residual no doméstico en el sistema de alcantarillado

Parámetro	Unidad	Simbología	VMA para descargar al sistema alcantarillado
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO <sub>5</sub> )	mg/L	DBO <sub>5</sub>	500
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg/L	DQO	1000
Sólidos suspendidos totales	mg/L	S.S.T	500
Aceites y grasas	mg/L	A y G	100
Aluminio	mg/L	Al	10
Potencial Hidrógeno	unidad	pH	6 - 9
Temperatura	°C	T	<35

Fuente: Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento (2019).

## 2.8. Optimización

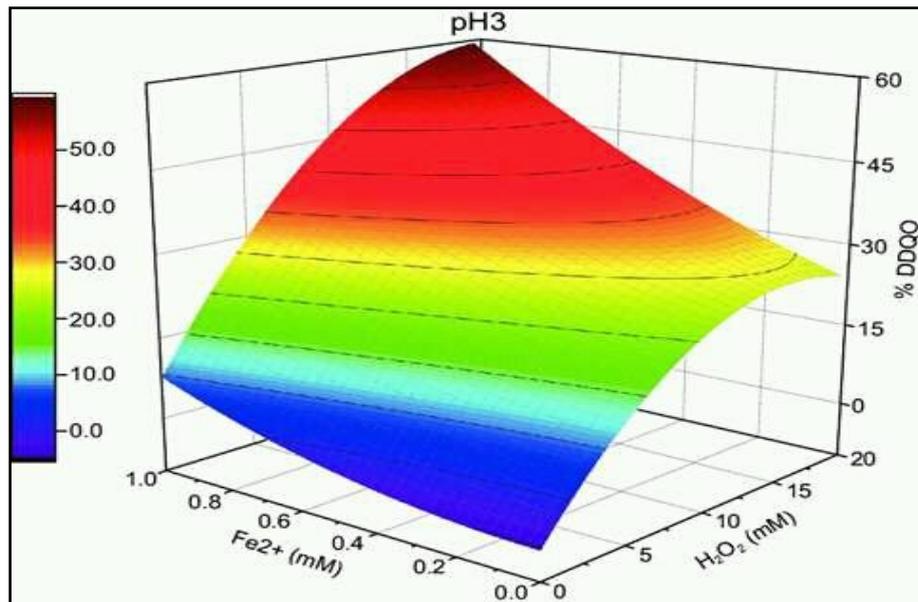
La optimización puede definirse como el proceso de seleccionar, entre un conjunto de posibles alternativas, la que mejor cumple con el(los) objetivo(s) propuesto(s). Sin embargo,

el óptimo procedimiento debe adaptarse a la secuencia de actividades, ingresos y salidas para ofrecer la más alta calidad al menor costo y dentro del plazo recomendado (Ozdemir, 2008).

### 2.8.1. Definición de superficie de respuesta

Es un conjunto de técnicas matemáticas y estadísticas utilizadas para modelar y analizar problemas en los que una variable de interés se ve afectada por otras variables de interés, cuyo objetivo es la optimización al máximo nivel la variable respuesta, una de las ventajas de la superficie de respuesta radica en la disminución de la cantidad de pruebas o ensayos necesarios para lograr resultados que sean aceptables en cuanto a la estadística, es rápido e informativo que otras estimaciones conocidas (Ozdemir, 2008).

- 1) **Definición de factores:** Se define como los parámetros del proceso que influyen en la variable de interés en la investigación, las cuales son cuantitativos o cualitativos.
- 2) **Definición de variable respuesta:** Se define como la cantidad medible, siendo alterado el valor determinado al modificar los diferentes niveles de los factores, el objetivo fundamental es la máxima optimización del valor cuantitativo o cualitativo.



Fuente: Restrepo (2006)

**Figura 11.** Superficie de respuesta en una investigación

### 2.8.2. Descripción de la metodología de superficies de respuesta

Esta metodología involucra elementos muy importantes tales como técnica de optimización, modelo y diseño; los dos últimos elementos se crean en tiempos paralelos y están sujetos al patrón de comportamiento de la variable de interés; los modelos resultantes son de primer así como también de segundo orden con característica plana y curvo respectivamente (Gutiérrez, 2008).

### 1) Tipos de modelo en la superficie de respuesta

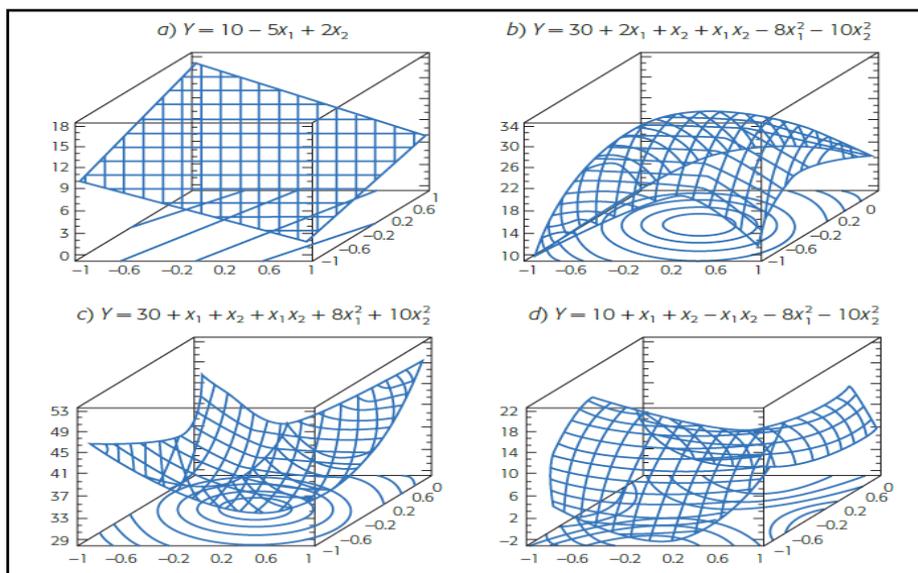
Los tipos de modelos que se emplean en la superficie de respuesta son principalmente polinomios, cuando se incluyen  $k$  factores, el modelo de tipo primer orden es la siguiente:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \varepsilon \quad (14)$$

y el modelo de segundo orden es:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (15)$$

La siguiente figura muestra la representación de los tipos de modelo de primer y segundo orden, en la cual se tiene en cuenta las variables independientes, también se cuenta con distintos valores en los parámetros de acuerdo al tipo de modelo, en la figura 12 las letras a, b, c, d se demuestran los tipos de modelo de primer orden y segundo orden de forma plana y con curvatura respectivamente (Gutiérrez, 2008).



Fuente: Gutierrez (2008).

**Figura 12.** Tipos de modelos de primer plajo y segundo orden con curvatura

### 2.9. Definición de la demanda química de oxígeno (DQO)

Se define como la determinación química de las cantidades de oxidantes fuertes necesarios para la oxidación de la parte orgánica de una muestra sensible al dicromato de potasio en un solución ácida y, como reacción de catálisis, se espera que esta cantidad sea equivalente a la materia orgánica oxidada. Para la determinación de DQO existen diferentes métodos, los cuales se dividen principalmente en tres categorías; el procedimiento de reflujo abierto, el procedimiento de reflujo cerrado y el procedimiento de aparato.

El procedimiento de reflujo abierto es adecuado para una amplia gama de desechos líquidos, en los que se prefieren muestras de gran tamaño cuando se realizan valoraciones de materiales oxidantes residuales. El método de reflujo cerrado es menos costoso en cuanto al uso de reactivos, la evaluación puede hacerse por titulación del oxidante residual o por colorimetría del ion producido cuando se reduce el componente oxidante (Vidal, 2013).

Los métodos de análisis de DQO instrumentales son muy rápidos y dan resultados reproducibles, donde se requieren tamaños de muestra pequeños para el análisis. Algunos de los métodos descritos son: prueba de oxidación de permanganato (reflujo abierto), método de oxidación de dicromato estándar (reflujo abierto), método de oxidación de dicromato estándar (reflujo estándar de hermeticidad), oxidación de dicromato estándar (reflujo colorimétrico cerrado), prueba rápida de evaluación de DQO (reflujo cerrado) y métodos instrumentales para la prueba de DQO (Vidal, 2013).

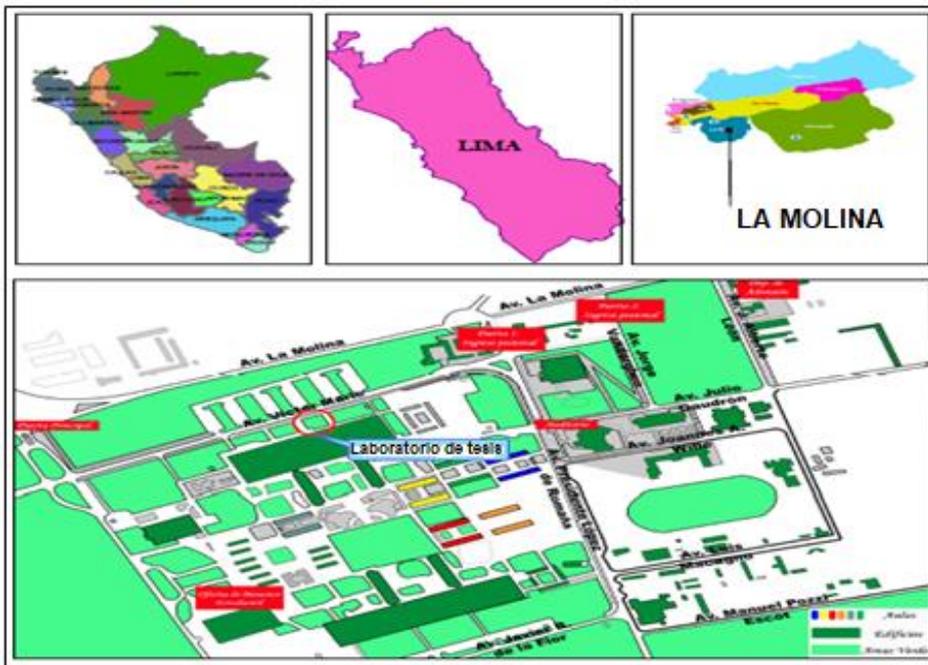
### III. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. Descripción del lugar de ejecución

El presente trabajo de investigación fue ejecutado en la Universidad Nacional Agraria la Molina en las instalaciones del laboratorio de Tesis de la Facultad de Ciencias.

##### 3.1.1. Datos meteorológicos del lugar de ejecución

- Coordenadas UTM: 287728 E, 8663467 N
- Altitud: 240 m.s.n.m
- Presión atmosférica: 988 mb
- Temperatura: 21 °C
- Humedad relativa: 83 %



Fuente: ArcGis (2022)

**Figura 13.** Localización del laboratorio de la Facultad de Ciencias

### 3.2. Material experimental

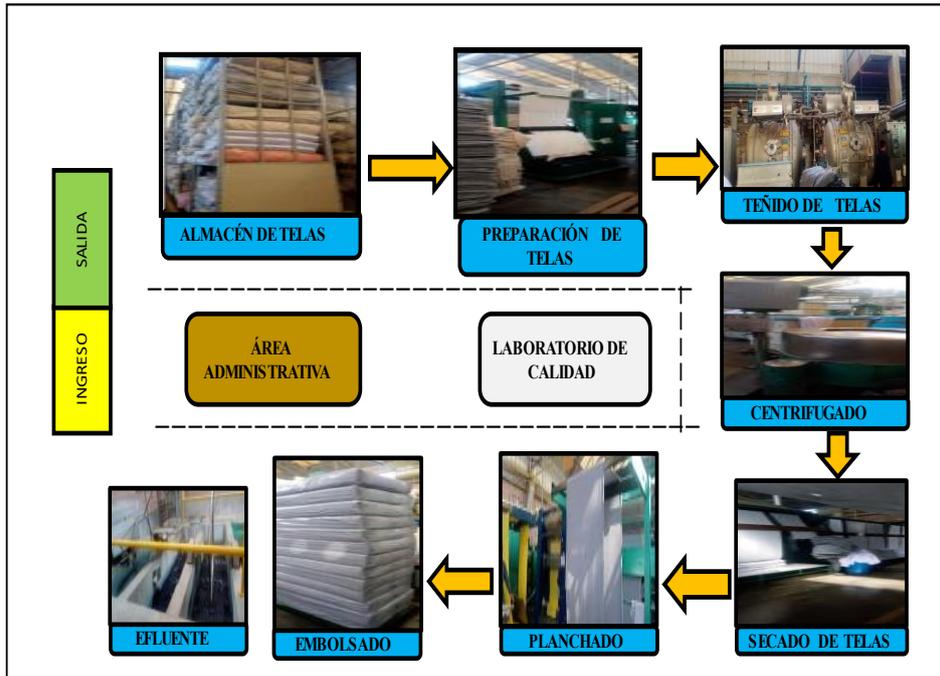
El efluente con colorantes sintéticos utilizado para los 22 tratamientos fueron recolectados de la industria textil Mecano Color SAC ubicado en calle Las Mimosas Mz. G1 Lt. 27 la Capitana Huachipa perteneciente al distrito de San Juan de Lurigancho. Estos efluentes con colorantes sintéticos provienen del proceso de teñido, y se recolectaron en horas de la mañana aproximadamente a las 11 am., para luego realizar las pruebas experimentales en la celda y finalmente continuar el análisis en el laboratorio; la muestra pura del efluente es la muestra que no se agregó agua destilada. La disolución al 75% v/v del efluente consiste en la muestra que se agregó 250 ml de agua destilada por cada 1000 ml de muestra pura de colorante sintético.



**Figura 14.** Planta industrial textil Mecano Color SAC

#### 3.2.1. Flujograma de procesos de la planta industrial textil Mecano Color

La planta industrial textil Mecano Color SAC cuenta con el siguiente flujograma de procesos para la obtención de su producto final.



**Figura 15.** Flujograma de procesos de la planta industrial textil Mecano Color

### 3.3. Descripción de los materiales y equipos utilizados

#### 3.3.1. Descripción de los materiales utilizados

Estos fueron los materiales que se usaron; 6 placas de aluminio, cables de conexión (puntas cocodrilo), 4 vaso de precipitado pírex de 100 ml y 500 ml marca Boeco, agua destilada, 2 galones de 4 L, 3 pipetas graduadas pírex de 5 y 10 ml, 2 matraz Erlenmeyer de 250 ml, 2 picetas, 2 embudos de vidrio, un arco de sierra, una cinta de 1,5 metros, papel filtro intermedio, una silicona, cables de conexión (puntas cocodrilo), un recipiente rectangular de 2,5 L y una válvula de paso de 1/2 pulgada.

#### 3.3.2. Descripción de los reactivos utilizados

Estos fueron los reactivos que se usaron; ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) contaminado con sulfato de mercurio ( $HgSO_4$ ), solución de digestión 0,0167M dicromato de potasio ( $K_2Cr_2O_7$ ) y sulfato de plata ( $Ag_2SO_4$ ).

#### 3.3.3. Descripción de los equipos utilizados

Estos fueron los equipos que se usaron; electrodo de pH marca HACH, electrodo de potencial redox marca HACH, multiparámetro modelo HQ 40D, electrodo de conductividad eléctrica marca HACH, multitester, reactor de digestión para DQO de la marca HACH modelo DRB200, fuente de energía regulable digital modelo UNI – T de 30 V y 5 A y un espectrofotómetro marca Thermoscientific modelo Genesys 150 UV-visible.

#### 3.3.4. Descripción de software utilizado

Estos fueron los software que se usaron; Statgraphics centurión 19, word 2019, ArcGis 10,4 y excel 2019.

### **3.4. Metodología aplicada en la investigación**

#### **3.4.1. Procedimientos para la medición de parámetros fisicoquímicos**

##### **3.4.1.1. Procedimiento para la medición del pH**

El procedimiento para la medición del pH se determinó con el método potenciometría detallado en la norma SM-4500-H+B; el mencionado procedimiento se encuentra en el Anexo 02.

##### **3.4.1.2. Procedimiento para la medición de la conductividad**

El procedimiento para la medición de conductividad eléctrica se determinó con la metodología de laboratorio detallado en la norma SM-2510-B; el mencionado procedimiento esta en el Anexo 03.

##### **3.4.1.3. Procedimiento para la medición del potencial redox**

El procedimiento para la medición del potencial redox se determinó con el método de electrodo detallado en la guía HACH - MTC30101; el mencionado procedimiento esta en el Anexo 06.

##### **3.4.1.4. Procedimientos para la medición de la Demanda Química de Oxígeno (DQO)**

El procedimiento para la medición de la DQO se determinó con el método reflujos cerrado- colorimetrico detallado en la norma SM-5220-D; el mencionado procedimiento se encuentra en el anexo 05 y el calculo de DQO por colorimetría se encuentra en el anexo 07.

##### **3.4.1.5. Procedimiento para la medición de la temperatura**

El procedimiento para la medición de la temperatura se determinó con la metodología de laboratorio detallado en la norma SM-2550-B; el mencionado procedimiento esta en el Anexo 04.

#### **3.4.2. Descripción de las variables de estudio**

##### **a) Descripción de variables independientes**

**Tabla 6.** Niveles y cuantificación de las variables independientes

<b>Variable</b>	<b>Unidades</b>	<b>Nivel bajo</b>	<b>Nivel alto</b>
Tiempo	minutos	10	30
Voltaje	voltios	5	15

### b) Descripción de la variable dependiente

#### ➤ Demanda Química de Oxígeno (%)

En el trabajo de investigación se utilizó el diseño factorial  $2^k$  con puntos centrales con tres repeticiones al centro. En la Tabla 07 se muestra el diseño factorial  $2^k$  con puntos centrales, a escala codificada y escala natural para la optimización de la variable respuesta.

**Tabla 7.** Niveles del diseño factorial  $2^k$  con puntos centrales

Nivel codificado (Xi)	Denominación
-1,4	Nivel mínimo
-1	Nivel bajo
0	Nivel medio
+1	Nivel alto
+1,4	Nivel máximo

Fuente: Gutierrez (2008).

El procedimiento a seguir es decodificar los niveles adaptandolo al diseño factorial  $2^k$  con puntos centrales.

**Tabla 8.** Niveles codificados del diseño factorial  $2^k$  con puntos centrales

Nivel codificado (Xi)	Nivel real	
	tiempo(minutos)	voltaje (V)
-1,4	9	4
-1	10	5
0	20	10
+1	30	15
+1,4	31	16

En la investigación las variables independientes se codifica en su nivel mínimo, bajo, medio, alto y máximo basado en el diseño factorial  $2^k$  con puntos centrales. Se determinó la cantidad de tratamientos o ensayos para 2 variables independientes ( $p= 2$ ) (Gutierrez, 2008).

$$N = 2^p + 2p_1 + C \quad (16)$$

$$N = 2^2 + 2 \cdot 2 + 3 = 11 \text{ tratamientos o ensayos}$$

Donde:

**N:** es la cantidad total de ensayos

**$2^p$ :** es el número de tratamientos básicos de parte factorial

**$2p_1$ :** Son los ensayos de la parte axial o puntos estrella

**C:** Es el ensayo central que se replica en una cantidad establecida

$P$ = número de variables independientes.

**Tabla 9.** Tratamientos o ensayos para 2 variables en un diseño factorial  $2^k$  con puntos centrales

N° tratamientos	Variables de estudio			
	Variables naturales		Variables codificables	
	variable A	variable B	tiempo(minutos)	voltaje (V)
1	-1	-1	10	5
2	-1	1	10	15
3	1	-1	30	5
4	1	1	30	15
5	-1,41	0	9	10
6	1,41	0	31	10
7	0	-1,41	20	4
8	0	1,41	20	16
9	0	0	20	10
10	0	0	20	10
11	0	0	20	10

Se puede describir la relación entre variables de la siguiente forma:

$$Y = f(X_{i,j}) \quad (17)$$

Donde:

$Y$  = Es la demanda Química de Oxígeno ( DQO%)

$X_{(i,j)}$  = Es el tiempo (minutos), voltaje (V),

**c) Modelo matemático**

$$y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_{12}X_1X_2 + \mathcal{E}_{ij} \quad (18)$$

Se describe a:

$y$ : es la variable dependiente (%DQO) ,  $X_1$ : es la variable independiente (tiempo) ,  $X_2$ : es la variable independiente (voltaje) ,  $\mathcal{E}_{ij}$ : es el error ;  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_{12}$ : es el coeficiente de correlación.

**d) Análisis estadístico**

Se realizó el análisis de varianza (ANOVA) y la superficie de respuesta utilizando el programa estadístico Statgraphics Centurión versión 19,4,01.

### **3.4.3. Construcción y operación de la celda de electrocoagulación a nivel de laboratorio**

#### **3.4.3.1. Procedimiento para la construcción de la celda de electrocoagulación**

En cuanto a la celda, estuvo basada en una distribución de volumen que consta de tres regiones; la parte superior, denominada región de flotación, la parte intermedia de reacciones electroquímicas, denominada región de reacción, y la parte inferior, denominada región de sedimentación (Arango , 2007).

Se tomaron en cuenta estas propiedades en la celda:

- Tipo de material de recipiente, separación de la placa a la cara lateral, separación de placas, tipo de metal conductor, capacidad total del recipiente, cantidad de electrodos o placas de metal conductor.

La cantidad de electrodos o placas se calculó tomando en cuenta el ancho de la celda, la separación de los electrodos al costado, distancia entre electrodos y el espesor de la placa; utilizando la ecuación (Arango, 2007):

$$\text{N}^\circ \text{ de placas} = \frac{(\text{largo total de la celda}) - 2(\text{distancia de electrodos a la cara lateral})}{\text{distancia entre electrodos} + \text{espesor de placa}} \quad (19)$$

#### **3.4.3.2. Proceso para ejecutar la operación de la celda de electrocoagulación**

##### **3.4.3.2.1. Secuencia de pasos para la operación de la celda**

Luego de ejecutar la caracterización inicial del efluente con colorantes sintéticos de una industria textil se procedió a la operación de la celda de electrocoagulación.

##### **1) Descripción del muestreo de efluente con colorantes sintéticos**

Se utilizaron galones de capacidad de 3.8 litros previamente lavadas, las muestras de efluente con colorantes sintéticos fueron tomados del área de control de aguas residuales a horas aproximadamente 11 am, después las muestras fueron puestos a refrigeración para su conservación hasta el instante de usarlos en los ensayos.

##### **2) Descripción del almacenamiento de las muestras**

Se realizó el almacenamiento de la muestra en galones de un volumen de 3.8 litros, después fueron llevadas al laboratorio para la medición de parámetros fisicoquímicos.

##### **3) Descripción del análisis del efluente con colorantes**

Se realizó el análisis inicial fisicoquímico del efluente con colorantes tales como: Demanda Química de Oxígeno (DQO), pH, potencial redox, conductividad eléctrica, color y temperatura.

#### **4) Descripción del sistema de electrocoagulación**

En principio se realizó la conexión de la fuente de alimentación con los cables eléctricos, luego la puesta de 6 placas de aluminio previamente limpias en la celda, se caracterizó los parámetros fisicoquímicos del efluente con colorantes sintéticos. Se realizó la medición de DQO, pH, potencial redox, conductividad y temperatura. Se procedió a ejecutar los ensayos al efluente de agua residual tomando en cuenta las combinaciones de voltajes y tiempos, tratamientos ejecutados en función del diseño factorial  $2^k$  con tres repeticiones; en total se realizó 22 tratamientos o ensayos, 11 para la muestra pura del efluente y 11 para la disolución al 75% v/v del efluente, se evaluó el comportamiento del tiempo y el voltaje en relación de la demanda química de oxígeno.

#### **5) Descripción de la precipitación después de la electrocoagulación**

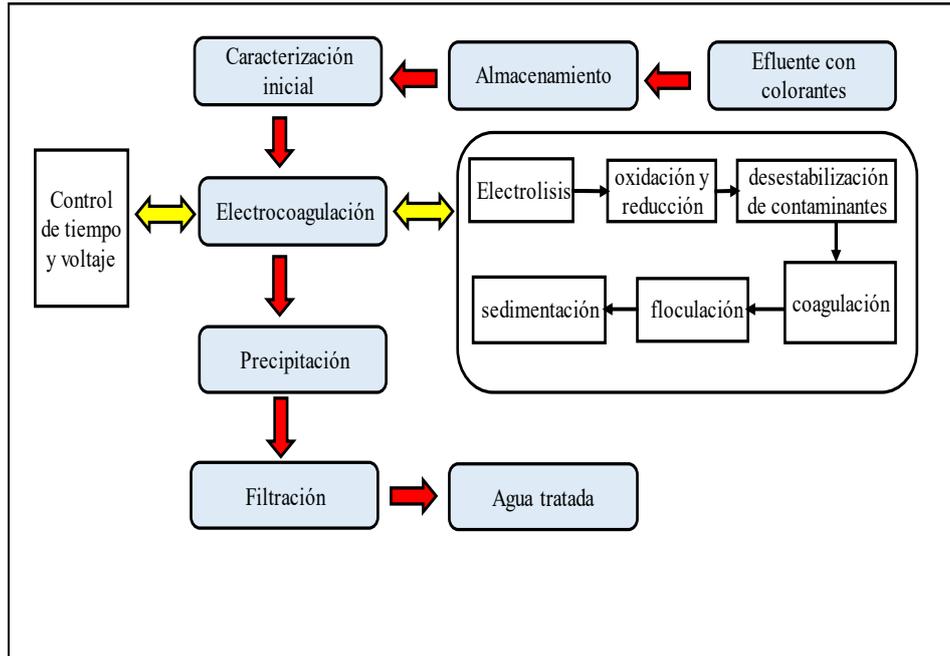
Después que se ejecutó la electrocoagulación, luego se dejó precipitar el efluente tratado por un tiempo de 50 minutos.

#### **6) Descripción del filtrado**

Se procedió a realizar la filtración del efluente tratado con la finalidad de separar el sólido – líquido utilizando papel filtro rápido, luego se procedió al análisis de los parámetros fisicoquímicos del efluente tratado.

#### **7) Descripción del análisis de efluente tratado**

Luego de que se procedió la filtración, se determinó los análisis finales de los parámetros fisicoquímicos tales como; potencial redox, DQO, conductividad, pH, y temperatura.



**Figura 16.** Flujograma para la electrocoagulación del efluente

#### 3.4.4. Procedimiento para el cálculo de la disminución de la DQO del efluente de agua residual

Se realizó el cálculo de la máxima reducción de la DQO con las mediciones previamente y posteriormente de la electrocoagulación. La reducción de la DQO en porcentaje se determinó empleando la ecuación:

$$n = \frac{DQO_i - DQO_f}{DQO_i} * 100 \quad (20)$$

Donde:

n: Disminución de DQO (%),  $DQO_i$ : Valor inicial de DQO,  $DQO_f$ : Valor final de DQO.

Los cálculos de porcentajes de disminución de la DQO con la muestra pura del efluente y la disolución al 75% v/v del efluente se registró en diferentes tablas que serán reportados en los resultados.

#### 3.4.5. Descripción de la comparación de resultados de electrocoagulación del efluente con los valores máximos admisibles

Después del cálculo de los valores finales de la reducción de la DQO mediante electrocoagulación se realizó la comparativa con los valores máximos admisibles (VMA) definidos para el vertido de aguas residuales al sistema alcantarillado de acuerdo al Decreto Supremo N° 010-2019-VIVIENDA.

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Medición de los parámetros fisicoquímicos del efluente con colorante sintético

#### 4.1.1. Caracterización del efluente antes de la electrocoagulación

**Tabla 10.** Parámetros fisicoquímicos antes de electrocoagulación

Muestra	T (°C)	pH	Conductividad (uS/cm)	Redox (mV)	DQO (mg/L)
pura	24,5	8,9	3317	43	2150
disolución al 75% v/v	24,3	8,6	3109	36	1980

En la Tabla 10 observamos los valores de las mediciones iniciales del efluente con colorante sintético previo a la electrocoagulación; se realizaron mediciones de pH, potencial redox, temperatura, demanda química de oxígeno y conductividad eléctrica.

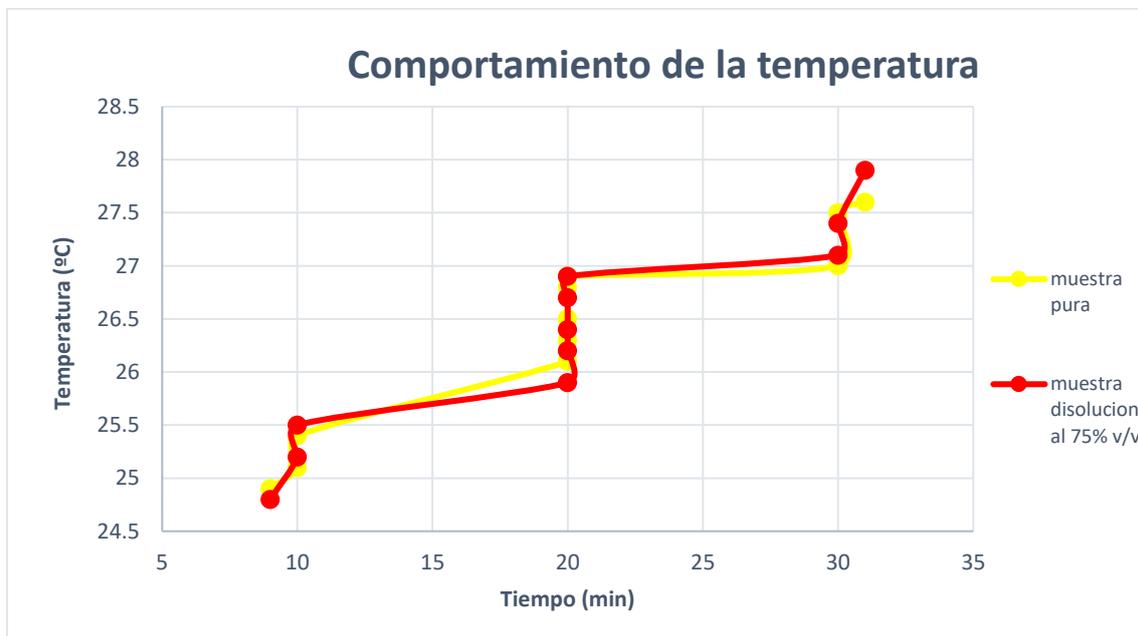
#### 4.1.2. Caracterización del efluente después de la electrocoagulación

**Tabla 11.** Parámetros fisicoquímicos después de electrocoagulación

Muestra	Tratamiento	Combinaciones		T (°C)	pH	Conductividad (uS/cm)	Potencial Redox (mV)
		Tiempo (min)	Voltaje (V)				
Pura	EC-1	10	5	25,1	8,5	3265	65
	EC-2	10	15	25,4	8,4	3148	70
	EC-3	30	5	27,0	6,7	2484	330
	EC-4	30	15	27,5	6,5	2415	340
	EC-5	9	10	24,9	8,6	3412	56
	EC-6	31	10	27,6	6,4	2382	364
	EC-7	20	4	26,1	7,9	2840	154
	EC-8	20	16	26,3	7,8	2756	160
	EC-9	20	10	26,5	7,5	2612	166
	EC-10	20	10	26,8	7,4	2578	171
	EC-11	20	10	26,9	7,3	2526	175

disolución al 75% v/v	EC-1	10	5	25,2	8,2	2994	57
	EC-2	10	15	25,5	7,8	2745	61
	EC-3	30	5	27,1	6,3	2148	296
	EC-4	30	15	27,4	6,2	2099	310
	EC-5	9	10	24,8	8,4	3186	45
	EC-6	31	10	27,9	6,1	2053	318
	EC-7	20	4	25,9	7,2	2423	136
	EC-8	20	16	26,2	7,0	2408	140
	EC-9	20	10	26,4	6,8	2401	144
	EC-10	20	10	26,7	6,7	2395	151
	EC-11	20	10	26,9	6,6	2389	158

En la Tabla 11, observamos los valores finales de las mediciones de pH, potencial redox, temperatura y conductividad eléctrica con la muestra pura del efluente y la disolución al 75% v/v del efluente realizada después de la electrocoagulación a escala de laboratorio.

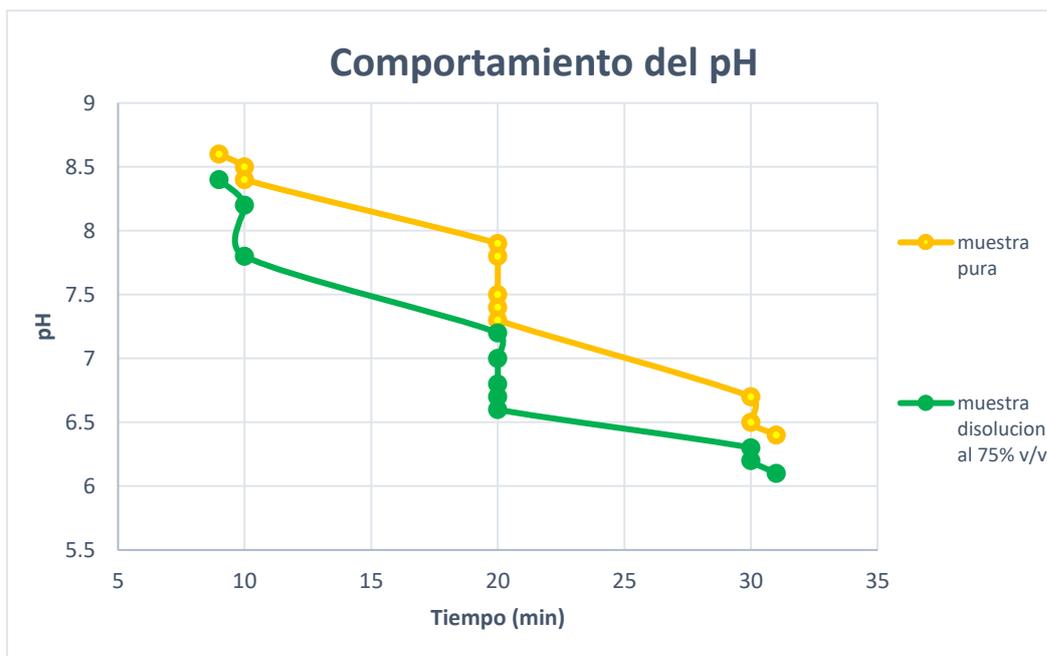


**Figura 17.** Comportamiento de la temperatura en la electrocoagulación

De acuerdo a la Figura 17, observamos el comportamiento del parámetro temperatura en la electrocoagulación (EC) después de realizar los 22 tratamientos, en específico en los tratamientos EC-3, EC-4 y EC-6 a un tiempo de 30 minutos presenta valores de 27,1 °C, 27,4 °C y 27,9 °C respectivamente; se observa que son los más altos valores de incremento de la temperatura en los tratamientos con la disolución al 75% v/v

del efluente, el comportamiento de la temperatura es similar con la muestra pura del efluente.

Armijos (2015), menciona en su trabajo de investigación que usó el método de electrocoagulación para el tratamiento de efluentes textiles con colorantes, empleando electrodos de hierro, en cuanto a la temperatura en la prueba batch 5 se registró un incremento de 21,1 °C a 27 °C a un voltaje de 15 voltios y 20 A. En nuestro trabajo realizado mediante electrocoagulación la temperatura presenta valores desde 24,5 hasta 27,9 °C a un rango de 5 a 15 voltios. En comparación con los resultados del autor se contrasta un comportamiento similar en la temperatura, ya que presenta la tendencia a incrementar durante la electrocoagulación, esto es debido al voltaje aplicado y la densidad de corriente ya que también la energía se libera en forma de calor en la celda de electrocoagulación.



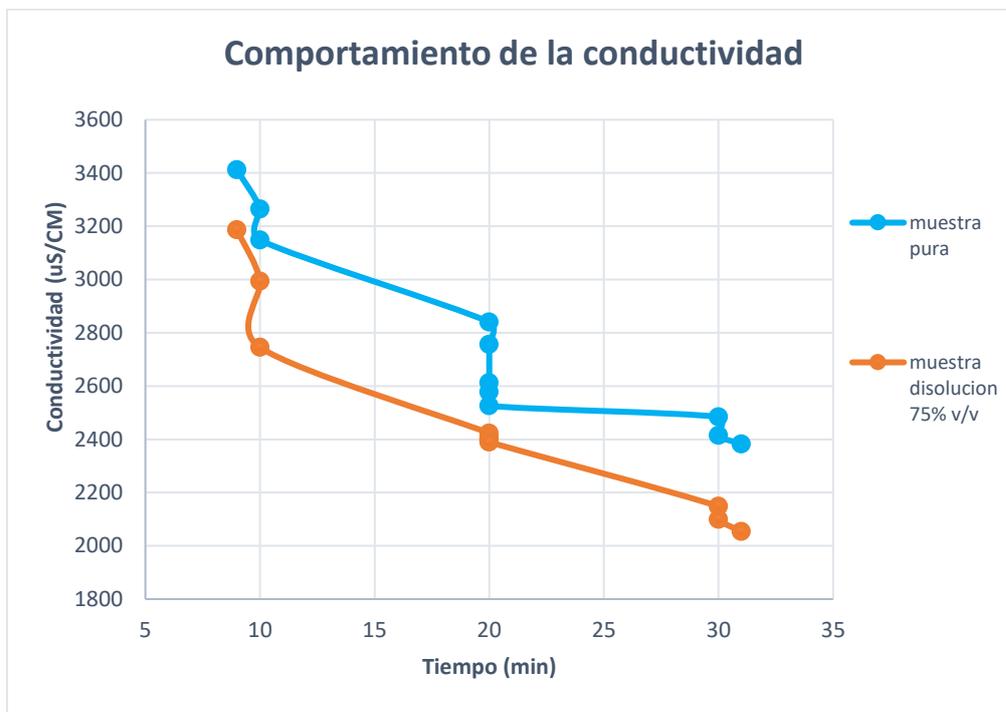
**Figura 18.** Comportamiento del pH en la electrocoagulación

De acuerdo a la Figura 18, observamos el comportamiento del parámetro pH en la electrocoagulación (EC) posteriormente de realizar los 22 tratamientos, en específico en los tratamientos EC-3, EC-4 y EC-6 a un tiempo de 30 minutos presenta valores de pH de 6,3; 6,2 y 6,1 respectivamente; se observa que son los valores más bajos de pH en los tratamientos con la disolución al 75% v/v del efluente, el comportamiento del pH es similar con la muestra pura del efluente.

Los resultados muestran que el pH disminuye desde 8,5 hasta 6,1 esto es debido al incremento del hidrógeno como producto de la electrolisis del agua en  $H^+$  y  $OH^-$

producido en el cátodo de la celda de electrocoagulación. Estos resultados se confirman de acuerdo a Lasso (2020), en su estudio realizado de contraste de metodologías usando un coagulante natural (moringa) y tratamiento de electrocoagulación aplicado a aguas contaminadas con colorantes textiles; en la cual menciona que el pH disminuye desde 9,5 hasta 6,5 como resultado del aumento del hidrógeno en el sistema de electrocoagulación.

Mamani (2021), refiere en su estudio de tratamiento de aguas de lavado de lana por electrocoagulación que el pH se incrementó en la electrocoagulación de 3 hasta 4,7 después de realizar los ensayos en la celda tipo batch. En la investigación realizada el pH presenta una disminución de 8,5 hasta 6,1. En comparación con los resultados del mencionado autor se observa un comportamiento diferente en el pH, esto es debido a que en medios ácidos el pH tiende a incrementarse durante la electrocoagulación.

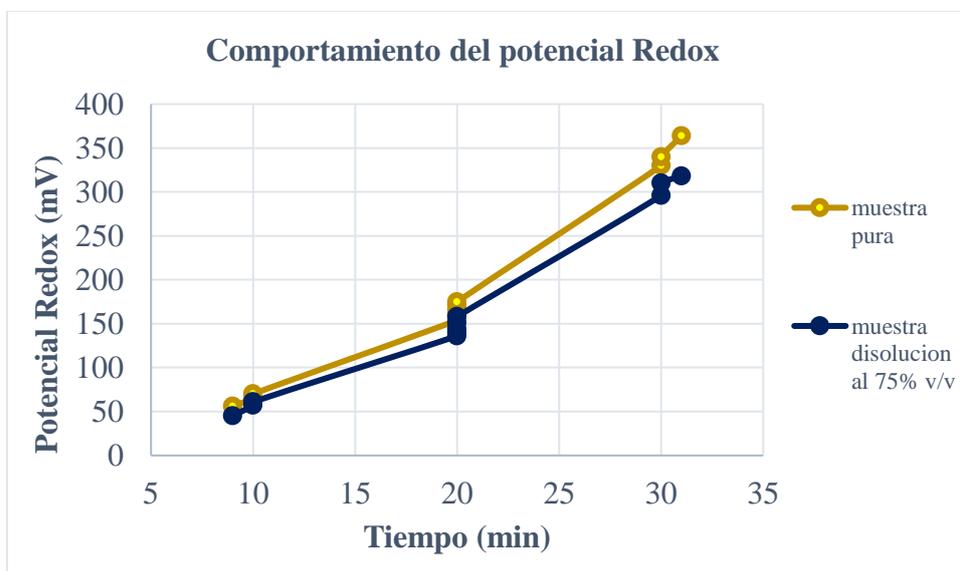


**Figura 19.** Comportamiento de la conductividad en la electrocoagulación

De acuerdo a la Figura 19, observamos el comportamiento del parámetro conductividad eléctrica en la electrocoagulación (EC) después de realizar los 22 tratamientos, en específico en los tratamientos EC-3, EC-4 y EC-6 a un tiempo de 30 minutos presenta valores de conductividad eléctrica de 2149 uS/cm, 2099 uS/cm y 2053 uS/cm respectivamente; se observa que son los valores más bajos de conductividad eléctrica en los tratamientos con la disolución al 75% v/v del efluente, el comportamiento de la conductividad eléctrica es similar con la muestra pura del efluente.

Rodríguez (2016), afirma en su investigación que las condiciones de operación que se estableció como óptimas para su investigación fue de conductividad eléctrica inicial de 3416  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , tiempo de residencia de 8 minutos y separación de electrodos de 1,2 cm. En nuestra investigación la conductividad eléctrica inicial de la muestra del efluente con colorantes sintéticos fue de 3317  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Al analizarlo con el resultado del autor mencionado, se contrasta valores muy similares, lo cual confirma que la conductividad eléctrica es uno de los factores importantes en la electrocoagulación de efluente con colorantes sintéticos de industria textil.

Gómez (2013), menciona en su trabajo de investigación para tratar aguas de la industria textil que la conductividad eléctrica presentó una disminución de 4000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  a 2300  $\mu\text{S}/\text{cm}$  después de aplicar el método de electrocoagulación. En nuestros resultados la conductividad eléctrica presenta valores desde 3347  $\mu\text{S}/\text{cm}$  hasta 2053  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . En comparación con lo mencionado por el autor se puede corroborar que la conductividad eléctrica disminuye y esto es debido al incremento de la temperatura como resultado del voltaje aplicado y la densidad de corriente en la celda electrocoagulación, y también debido a la floculación de las iones de cloruro de sodio, disminuyendo su concentración en el agua residual textil.



**Figura 20.** Comportamiento del potencial redox en la electrocoagulación

De acuerdo a la Figura 20, observamos el comportamiento del parámetro potencial redox en la electrocoagulación (EC) después de realizar los 22 tratamientos, en específico en los tratamientos EC-3, EC-4 y EC-6 a un tiempo de 30 minutos presenta valores de potencial redox de 330 mV, 340 mV y 364 mV respectivamente; se observa que son los valores más altos del potencial redox durante los tratamientos con la muestra

pura del efluente, esto es debido a que los valores de potencial redox aumentan cuando el pH de la solución es más bajo y disminuyen cuando el pH es más alto. El comportamiento del potencial redox es similar con la disolución al 75% v/v del efluente.

Terán y Banchón (2015), refiere en su estudio que se experimentaron dos tipos de oxidantes para comparar su eficiencia con el reactivo Fenton en agua contaminada con colorantes. De estos tratamientos, el reactivo Fenton permitió la remoción del 99,9% de DQO; y en un rango de pH de 9 a 7 el potencial redox presenta un incremento de 124 mV a 449 mV. En nuestro trabajo realizado mediante electrocoagulación el potencial redox presenta valores de potencial redox desde 43 mV hasta 364 mV en un rango de pH de 8,9 a 6,1. En contraste de resultados con lo mencionado por el autor, ambos trabajos presentan comportamientos similares, esto es debido a que el pH controla la calidad de la reacción de oxidación, los valores de potencial redox aumentan cuando el pH de la solución es más bajo y disminuyen cuando el pH es más alto.

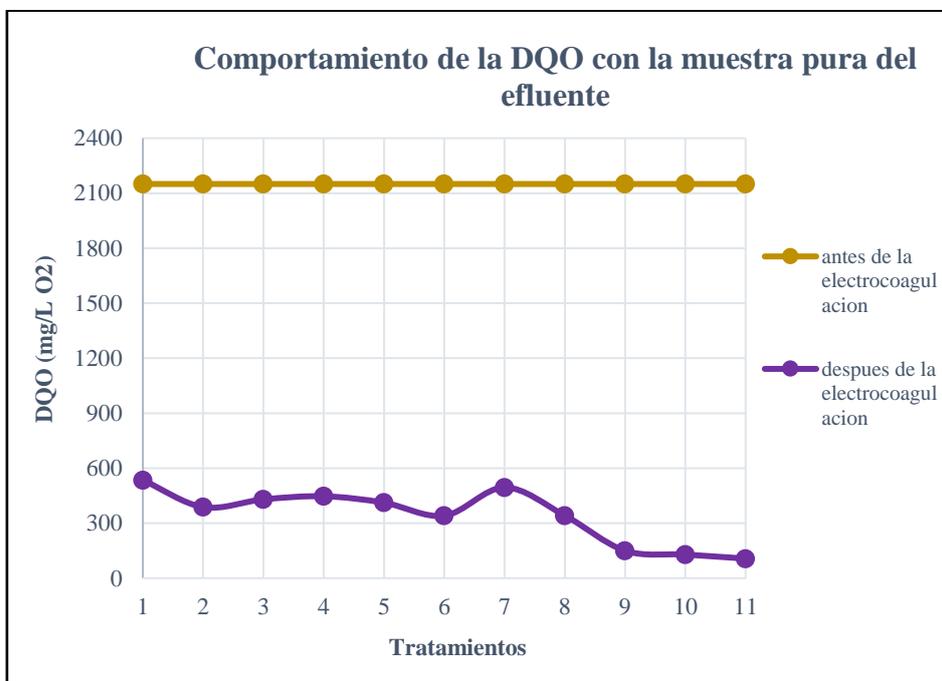
#### 4.2. Medición de la demanda química de oxígeno (DQO) antes y después de aplicar la electrocoagulación

**Tabla 12.** Demanda química de oxígeno previamente y posteriormente de aplicar la electrocoagulación (EC) del efluente con colorante sintético

Muestra	Tratamiento	Combinaciones		DQO (mg O <sub>2</sub> /L) antes de EC	DQO (mg O <sub>2</sub> /L) después de EC
		Tiempo (min)	Voltaje (V)		
	EC-1	10	5	2150	535
	EC-2	10	15	2150	388
	EC-3	30	5	2150	430
	EC-4	30	15	2150	447
	EC-5	9	10	2150	412
Pura	EC-6	31	10	2150	341
	EC-7	20	4	2150	495
	EC-8	20	16	2150	342
	EC-9	20	10	2150	150
	EC-10	20	10	2150	129
	EC-11	20	10	2150	107

Disolución al 75% v/v	EC-1	10	5	1980	714
	EC-2	10	15	1980	573
	EC-3	30	5	1980	594
	EC-4	30	15	1980	632
	EC-5	9	10	1980	574
	EC-6	31	10	1980	534
	EC-7	20	4	1980	652
	EC-8	20	16	1980	376
	EC-9	20	10	1980	316
	EC-10	20	10	1980	258
	EC-11	20	10	1980	297

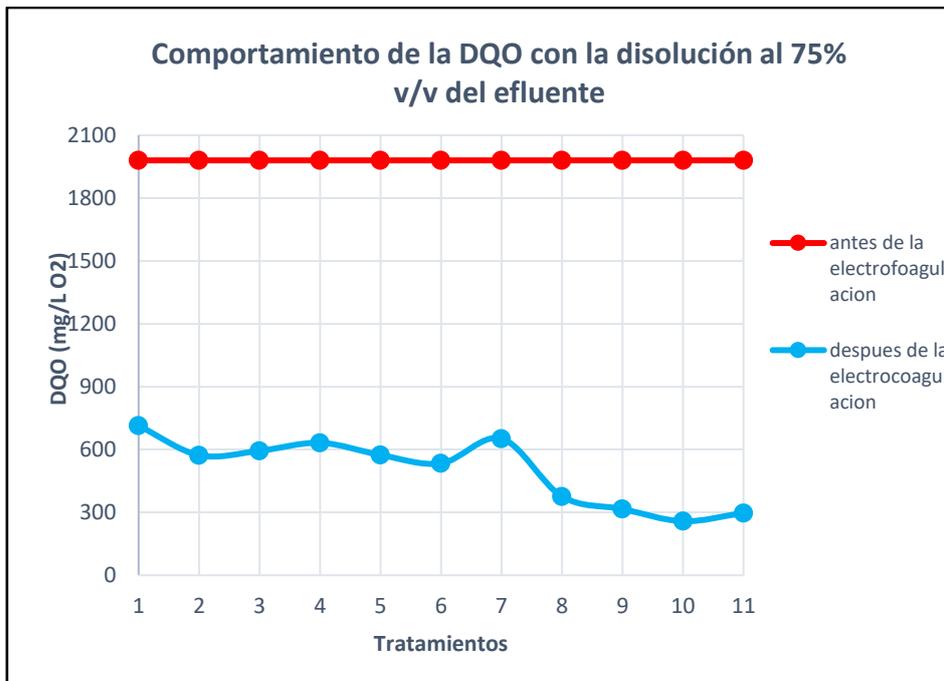
En la Tabla 12, observamos los valores de medición de la DQO con la muestra pura del efluente y la disolución al 75% v/v del efluente previamente y posteriormente de aplicar la electrocoagulación.



**Figura 21.** Demanda química de oxígeno antes y después de aplicar la electrocoagulación

De acuerdo a la Figura 21, observamos el comportamiento del parámetro demanda química de oxígeno en la muestra pura del efluente previamente y posteriormente a la aplicación de electrocoagulación (EC) con los 11 tratamientos, en específico en los

tratamientos EC-9, EC-10 y EC-11 presenta valores de DQO de 150 mg O<sub>2</sub>/L, 129 mg O<sub>2</sub>/L y 107 mg O<sub>2</sub>/L respectivamente; se observa que son los valores más bajos de la DQO durante los tratamientos con la muestra pura del efluente, esto es debido a que en las combinaciones de tiempo y voltaje aplicado en los tratamientos mencionados la reducción de la DQO es mayor en comparación con los otros tratamientos.



**Figura 22.** Comportamiento de la DQO antes y después de la EC con la disolución al 75% v/v del efluente

De acuerdo a la Figura 22, observamos el comportamiento de la DQO con la disolución al 75% v/v del efluente antes y después de la electrocoagulación (EC) con los 11 tratamientos, en específico en los tratamientos EC-9, EC-10 y EC-11 presenta valores de DQO de 316 mg O<sub>2</sub>/L, 258 mg O<sub>2</sub>/L y 297 mg O<sub>2</sub>/L respectivamente; se observa que son los valores más bajos de la DQO durante los tratamientos con la disolución al 75% v/v del efluente, esto es debido a que en las combinaciones de tiempo y voltaje aplicado en los tratamientos mencionados la reducción de la DQO es mayor en comparación con los otros tratamientos.

### 4.3. Construcción del sistema de electrocoagulación a nivel de laboratorio

#### 4.3.1. Especificaciones de la celda a nivel de laboratorio

**Tabla 13.** Detalles específicos de la celda y sus accesorios a nivel de laboratorio

<b>Especificaciones de la celda y sus accesorios a nivel de laboratorio</b>	
<b>Ítems</b>	<b>Detalle</b>
Tipo de material del recipiente	Polietileno
Largo del recipiente (cm)	20
Ancho del recipiente (cm)	12,5
Altura del recipiente (cm)	10
Capacidad total de la celda en litros (L)	2,5
Capacidad de trabajo en litros (L)	2
Tipo de metal para electrodos (placas) - ánodo y cátodo	Aluminio
Fuente de alimentación	Digital
Capacidad en voltaje de la fuente (V)	30
Capacidad en amperios de la fuente (A)	5
Conexión de los cables eléctricos (positivo y negativo)	alternado
Número de electrodos utilizados	6
Largo del electrodo (cm)	13
Ancho del electrodo (cm)	10
Superficie unitaria de electrodo (cm <sup>2</sup> )	130
Superficie total de electrodos (cm <sup>2</sup> )	780
Superficie de electrodos sumergidos (cm <sup>2</sup> )	540
Separación entre electrodos (cm)	1
Disposición de los electrodos	monopolar - paralelo
Separación a los laterales (cm)	6
Espesor del electrodo (cm)	0,3

De acuerdo a la Tabla 13, observamos las especificaciones de la celda y sus accesorios a nivel de laboratorio con las cuales se ejecutó la electrocoagulación de acuerdo a los 22 ensayos en sus combinaciones de tiempo y voltaje.

Según Tinoco (2016), menciona en su trabajo de electrocoagulación de aguas residuales textiles que se usaron placas de hierro con 0.8 cm de distancia, 9 electrodos en forma paralela, aplicando corriente directa alcanzando una reducción del 97% de DQO. En el trabajo realizado la operación de la celda de electrocoagulación fue de 1 cm de separación entre electrodos y un total de 6 placas de aluminio colocadas en paralelo, aplicando corriente directa a configuración monopolar. En comparación con nuestra investigación se observa

resultados similares a lo reportado por dicho autor, ya que a una separación menor se produce una película de floculos en la superficie de los electrodos durante la electrocoagulación disminuyendo la producción de ion de aluminio y una mayor separación genera un mayor voltaje en la celda de electrocoagulación.

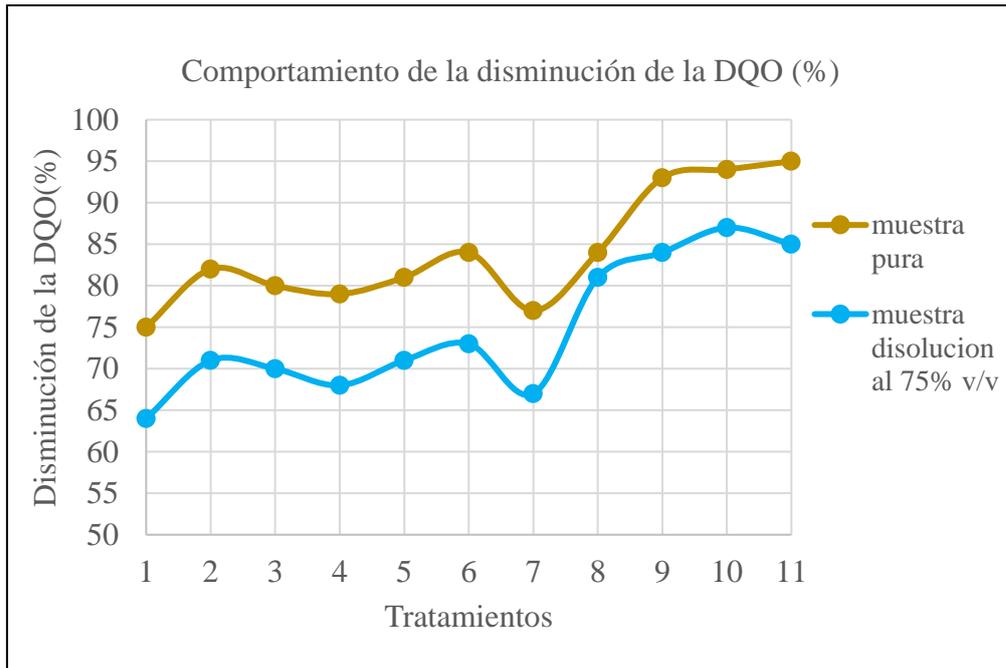
#### 4.4. Cálculo de la disminución de la demanda química de oxígeno (DQO) del efluente con colorantes sintéticos

##### 4.4.1. Disminución de la DQO en los tratamientos de electrocoagulación (EC)

**Tabla 14.** Disminución de la DQO (%) en los tratamientos de electrocoagulación (EC)

Muestra	Tratamiento	Combinación		DQO (mg/L) antes de EC	DQO (mg /L) después de EC	Disminución de DQO (%)
		Tiempo (min)	Voltaje (V)			
Pura	EC-1	10	5	2150	535	75
	EC-2	10	15	2150	388	82
	EC-3	30	5	2150	430	80
	EC-4	30	15	2150	447	79
	EC-5	9	10	2150	412	81
	EC-6	31	10	2150	341	84
	EC-7	20	4	2150	495	77
	EC-8	20	16	2150	342	84
	EC-9	20	10	2150	150	93
	EC-10	20	10	2150	129	94
	EC-11	20	10	2150	107	95
Disolución al 75% v/v	EC-1	10	5	1980	714	64
	EC-2	10	15	1980	573	71
	EC-3	30	5	1980	594	70
	EC-4	30	15	1980	632	68
	EC-5	9	10	1980	574	71
	EC-6	31	10	1980	534	73
	EC-7	20	4	1980	652	67
	EC-8	20	16	1980	376	81
	EC-9	20	10	1980	316	84
	EC-10	20	10	1980	258	87
	EC-11	20	10	1980	297	85

De acuerdo a la Tabla 14, observamos la disminución de la DQO (%) aplicando la electrocoagulación a la muestra pura del efluente y la disolución al 75% v/v del efluente.



**Figura 23.** Comportamiento de la reducción de DQO (%)

De acuerdo a la Figura 23, observamos el comportamiento de la disminución de la demanda química de oxígeno expresado en DQO (%) con la muestra pura y la disolución al 75% v/v del efluente después de realizar los 22 tratamientos de electrocoagulación, en específico en los tratamientos EC-9, EC-10 y EC-11 presenta valores de disminución de DQO (%) de 93%, 94% y 95% respectivamente en la muestra pura del efluente; y también valores de disminución de DQO (%) de 84%, 87% y 85% respectivamente con la disolución al 75% v/v del efluente, esto es debido a que en las combinaciones de tiempo y voltaje aplicado en los tratamientos mencionados anteriormente; la reducción de la DQO (%) es mayor en comparación con los otros tratamientos.

La disminución de la demanda química de oxígeno (DQO) del efluente con colorantes sintéticos fue de 95% a un tiempo de 20 minutos y a un voltaje de 10 voltios en el tratamiento EC-11 con la muestra pura del efluente. Según Medrano (2021), menciona en su estudio una disminución del 42% de DQO de colorantes reactivos de efluentes de teñido textiles aplicando un voltaje promedio de 2,65 voltios y un tiempo de residencia de 51 minutos. En comparación con la presente investigación se observa una notable diferencia en cuanto a lo manifestado por el autor, esto explica que a un voltaje óptimo aplicado se alcanza una mayor reducción de la DQO.

Alvarez (2019), sostiene en su estudio una reducción mayor al 90% de DQO de un efluente textil, los electrodos empleados fueron de aluminio y acero inoxidable a 5 minutos y 9 voltios. En la investigación realizada la disminución de DQO del efluente con colorantes

sintéticos fue de 95% a un tiempo de 20 minutos y a un voltaje de 10 voltios en el tratamiento EC-11 con la muestra pura. En contraste con el presente trabajo se confirma resultados similares en la disminución de DQO para el voltaje aplicado, en cuanto al tiempo de residencia el autor reporta 5 minutos una disminución del 90% de DQO debido a la excelente conductividad eléctrica del agua residual textil.

Zaldumbide (2016), afirma en su investigación que evaluó dos métodos electrocoagulación y electrocoagulación combinada con Fenton, para la descontaminación de los efluentes de una empresa textil. Los ensayos fueron en una celda “batch” con electrodos de Fe como ánodo y Al como cátodo. El porcentaje de remoción de la DQO fue 95,70 %, después de 60 minutos de tratamiento a un voltaje 4 voltios. En nuestra investigación la reducción de la DQO del efluente con colorantes sintéticos fue de 95% a un tiempo de 20 minutos y a un voltaje de 10 voltios en el tratamiento EC-11 con la muestra pura. Al analizar con los resultados del autor, se evidencia comportamientos similares en la reducción de la DQO.

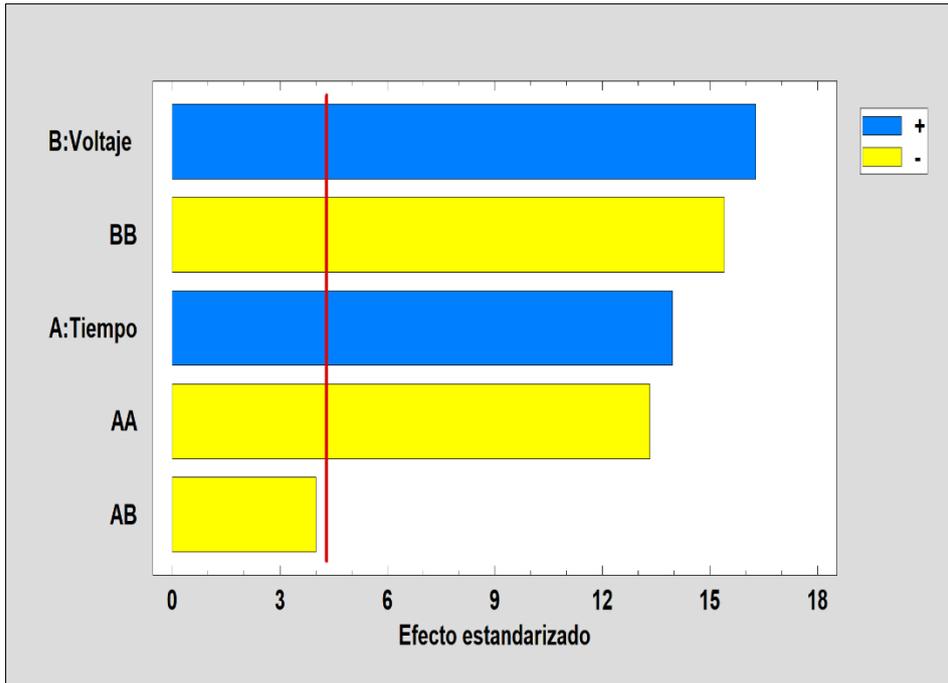
#### 4.4.2. Resultados del análisis estadístico para la reducción de la DQO (%) en la muestra pura del efluente con colorantes sintéticos

##### 1) Descripción del análisis de varianza (ANOVA) para la reducción de la DQO (%) en la muestra pura del efluente con colorantes sintéticos

**Tabla 15.** Descripción del análisis de varianza (ANOVA) para la reducción de la DQO

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Tiempo	194,55	1	194,55	194.55	0,0051
B:Voltaje	265,129	1	265,129	265.13	0,0038
AA	177,321	1	177,321	177.32	0,0056
AB	16,0	1	16,0	16.00	0,0572
BB	237,177	1	237,177	237.18	0,0042
Falta de ajuste	20,7867	3	6,92891	6.93	0,1287
Error puro	2,0	2	1,0		
Total (corr.)	486,0	10			

Puesto que el valor-P en la tabla de análisis de varianza es un valor inferior a 0,05; existe una correlación significativa validado estadísticamente entre los factores independientes denominados voltaje y tiempo; y la variable de respuesta (disminución de DQO) a un grado de confianza de 95,0% y el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) es de 0,953; lo cual significa que el comportamiento de la variable de respuesta se explica en gran medida por el comportamiento de los factores independientes.



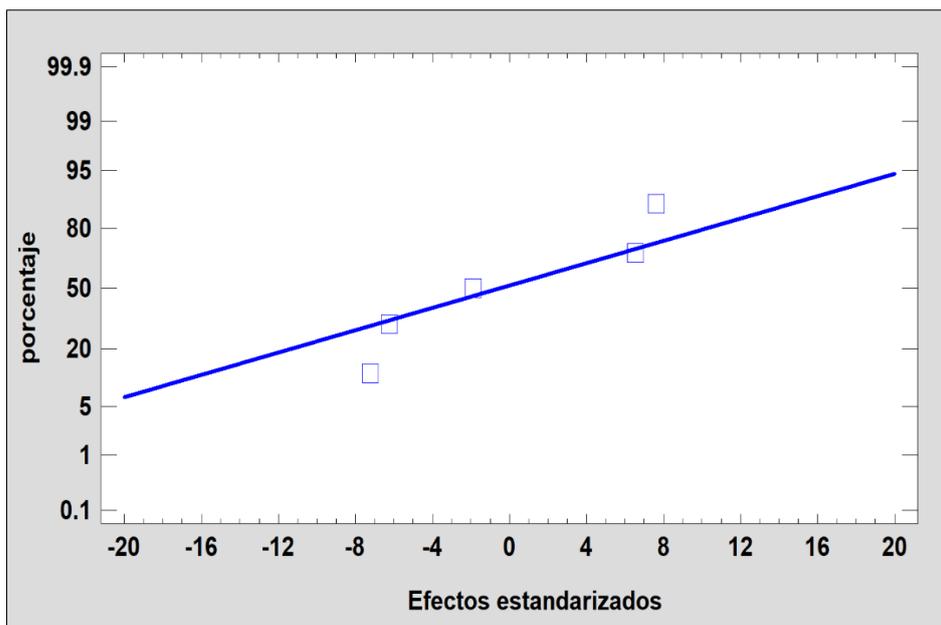
**Figura 24.** Diagrama de Pareto estandarizado para DQO

De acuerdo a la Figura 24, se muestra el diagrama de Pareto, lo cual explica que el tiempo y voltaje tienen efectos altamente significativos en la disminución de la DQO (%).

La ecuación del modelo ajustado es:

$$DQO = 18.15 + 3.47*T + 7.50*V - 0.07*T^2 - 0.04*T*V - 0.31*V^2 \dots\dots\dots(21)$$

De acuerdo a la ecuación del modelo para la muestra pura del efluente con colorantes sintéticos, nos da a entender que el tiempo y el voltaje tienen los coeficientes más altos en la ecuación; lo cual significa que presentan efectos significativos en la reducción de la DQO.

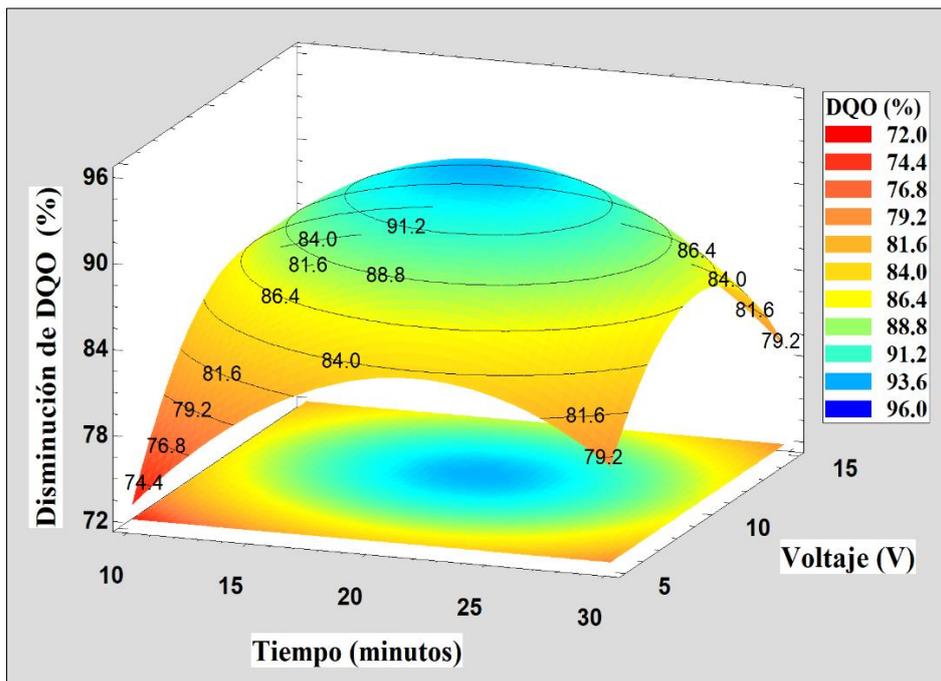


**Figura 25.** Gráfica de probabilidad normal para DQO

De acuerdo a la Figura 25, se muestra la gráfica de probabilidad normal para DQO, se observa que los datos se ajustan adecuadamente al modelo matemático presentado en la ecuación (21).

## 2) Descripción y análisis de la superficie respuesta para la reducción de la DQO (%) en la muestra pura del efluente con colorantes sintéticos

En el siguiente gráfico se muestra el comportamiento de la superficie respuesta para la reducción de DQO(%) en la muestra pura del efluente con colorantes sintéticos



**Figura 26.** Comportamiento de superficie de respuesta para la reducción de DQO (%)

De acuerdo a la Figura 26, observamos el comportamiento de la superficie de respuesta para la reducción de DQO (%) en la muestra pura del efluente con colorantes sintéticos, después de la electrocoagulación (EC) se observa que en el tratamiento EC-11 a una combinación de tiempo de 20 minutos y un voltaje de 10 V; se alcanza una máxima disminución del 95% de la DQO.

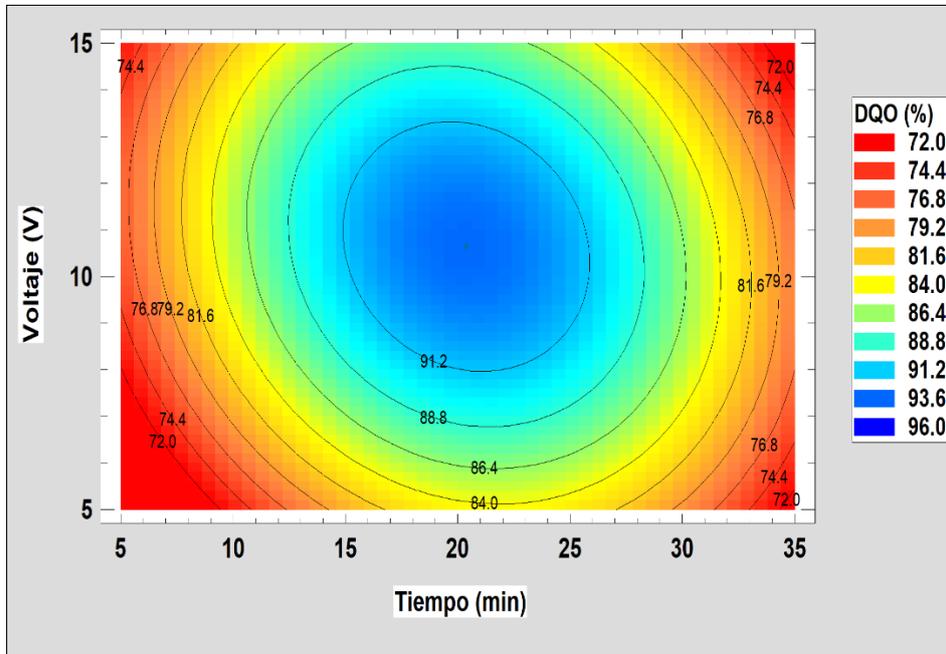
- Optimización de la superficie de respuesta para la disminución de DQO (%)

**Tabla 16.** Niveles de los factores la cual maximiza DQO sobre la región indicada.

Factor	Nivel bajo	Nivel alto	Óptimo
Tiempo (min)	10,0	30,0	20,4
Voltaje (V)	5,0	15,0	10,6

### 3) Descripción y análisis de la grafica de contornos para la reducción de DQO (%) en la muestra pura del efluente con colorantes sintéticos

En el siguiente gráfico se muestra el comportamiento de la grafica de contornos para la reducción de DQO(%) en la muestra pura del efluente con colorantes sintéticos.



**Figura 27.** Comportamiento de la gráfica de contornos para reducción de DQO(%)

De acuerdo a la Figura 27, observamos el comportamiento de la gráfica de contornos para la reducción de DQO (%) en la muestra pura del efluente con colorantes sintéticos posteriormente a la electrocoagulación (EC), se puede analizar que en el tratamiento EC-11 a una combinación de tiempo de 20 minutos y un voltaje de 10 V; se alcanza una máxima disminución del 95% de la DQO.

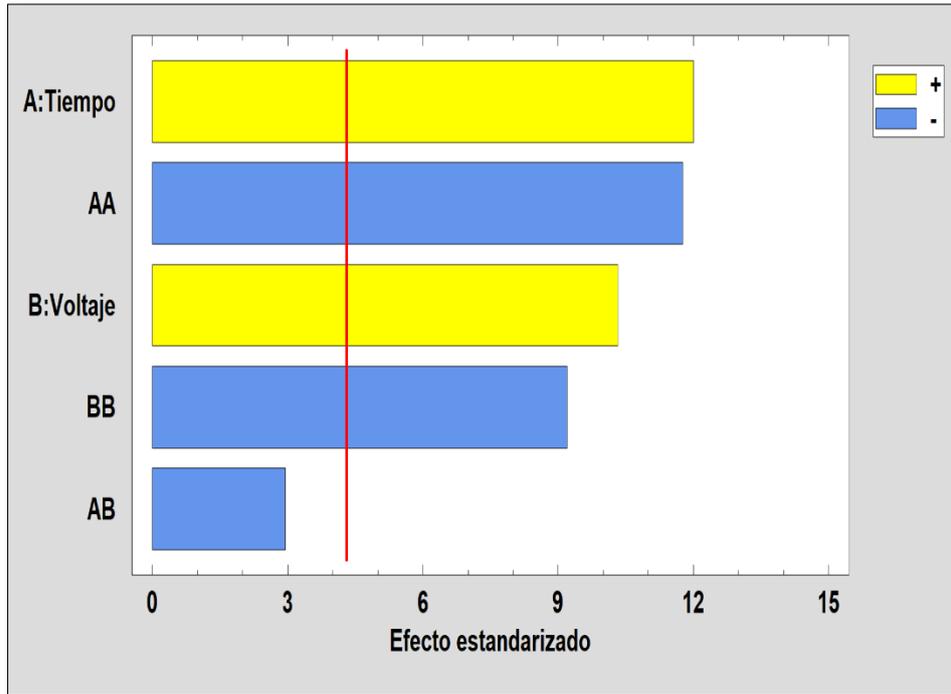
#### 4.4.3. Resultados del análisis estadístico para la reducción de la DQO (%) en la disolución al 75% v/v del efluente

##### 1) Descripción del análisis de varianza (ANOVA) para la reducción de la DQO (%) en la disolución al 75% v/v del efluente

**Tabla 17.** Descripción del análisis de varianza (ANOVA) para la reducción de la DQO

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Tiempo	336,041	1	336,041	144,0	0,0069
B:Voltaje	248,519	1	248,519	106,5	0,0093
AA	322,602	1	322,602	138,2	0,0072
AB	20,25	1	20,25	8,68	0,0985
BB	197,206	1	197,206	84,52	0,0116
Falta de ajuste	38,7473	3	12,9158	5,54	0,1568
Error puro	4,66667	2	2,33333		
Total (corr.)	654,545	10			

Puesto que el valor-P en la tabla de análisis de varianza es un valor inferior a 0,05; existe una correlación significativa validado estadísticamente entre los factores independientes denominados voltaje y tiempo; y la variable de respuesta (disminución de DQO) a un grado de confianza de 95,0%; el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) es de 0,933 lo cual significa que el comportamiento de la variable de respuesta se explica en gran medida por el comportamiento de los factores independientes.



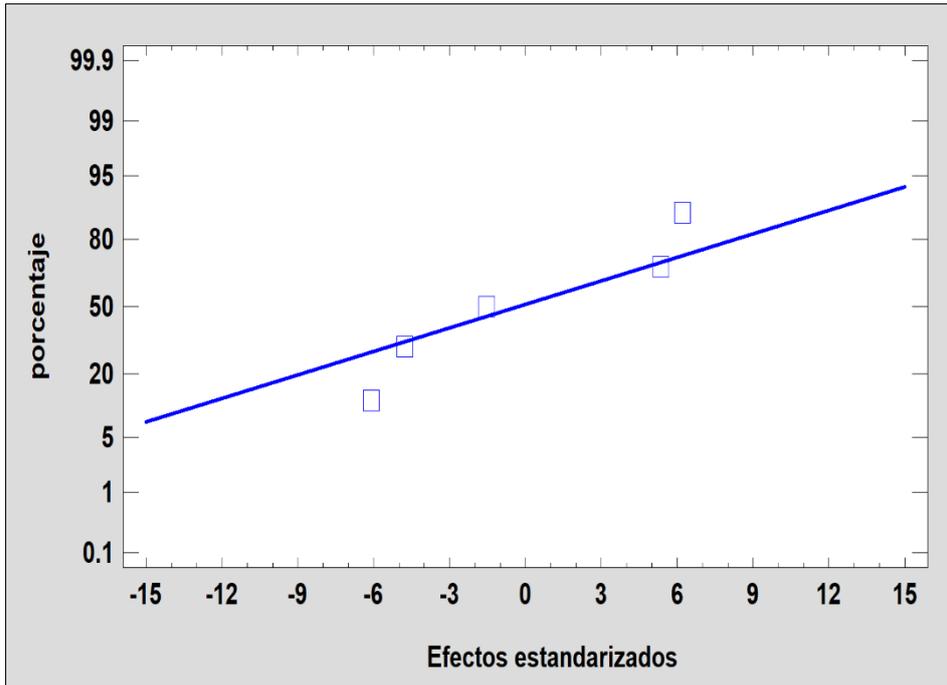
**Figura 28.** Diagrama de Pareto estandarizado para DQO

De acuerdo a la Figura 28, observamos el diagrama de Pareto, lo cual explica que el tiempo y voltaje tienen efectos altamente significativos en la disminución de la DQO (%).

La ecuación del modelo ajustado es:

$$\text{DQO (\%)} = -0.89 + 4.56*T + 7.26*V - 0.10*T^2 - 0.05*T*V - 0.29*V^2 \dots\dots\dots(22)$$

De acuerdo a la ecuación del modelo para la disolución al 75% v/v del efluente, nos da a entender que el tiempo y el voltaje tienen los coeficientes más altos en la ecuación; lo cual significa que presentan efectos significativos en la reducción de la DQO.

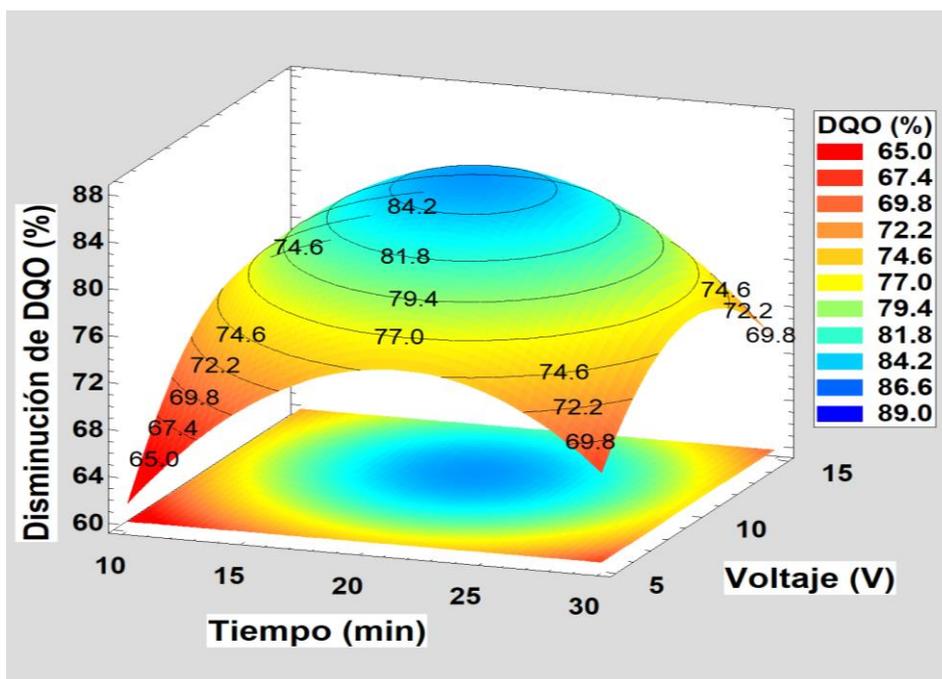


**Figura 29.** Gráfica de probabilidad normal para DQO

De acuerdo a la Figura 29, se muestra la gráfica de probabilidad normal para DQO, se observa que los datos se ajustan adecuadamente al modelo matemático presentado en la ecuación (22).

## 2) Descripción y análisis de la superficie respuesta para la reducción de la DQO (%) en la disolución al 75% v/v del efluente

En el siguiente gráfico se muestra el comportamiento de la superficie respuesta para la reducción de DQO(%) en la disolución al 75% v/v del efluente.



**Figura 30.** Comportamiento de superficie de respuesta para la reducción de DQO (%)

De acuerdo a la Figura 30, observamos el comportamiento de la superficie de respuesta para la reducción de DQO (%) en la disolución al 75% v/v del efluente, después de la electrocoagulación (EC) se observa que en el tratamiento EC-10 a una combinación de tiempo de 20 minutos y un voltaje de 10 V; se alcanza una máxima disminución del 87% de la DQO.

- Optimización de superficie de respuesta para DQO (%)

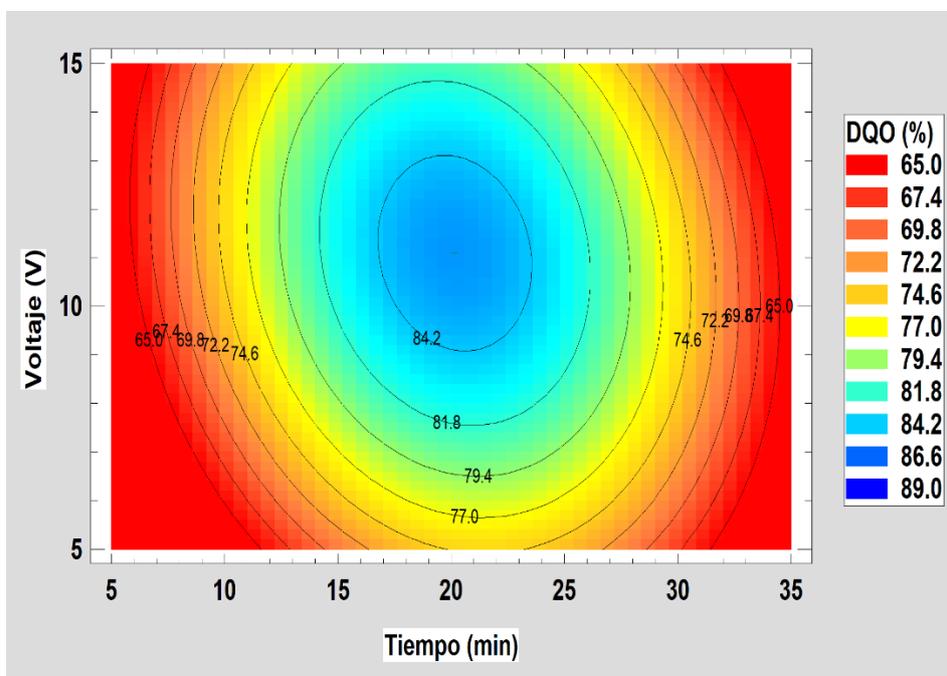
**Tabla 18.** Valor óptimo de reducción de DQO (%)

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
Tiempo	10,0	30,0	20.1
Voltaje	5,0	15,0	11.1

En la tabla 18 se muestra la combinación de los niveles de los factores, la cual maximiza DQO (%) sobre la región indicada.

### 3) Descripción y análisis de la grafica de contornos para la reducción de DQO (%) en la disolución al 75% v/v del efluente

En el siguiente gráfico se muestra el comportamiento de la grafica de contornos para la reducción de DQO(%) en la disolución al 75% v/v del efluente.



**Figura 31.** Comportamiento de la gráfica de contornos para reducción de DQO(%)

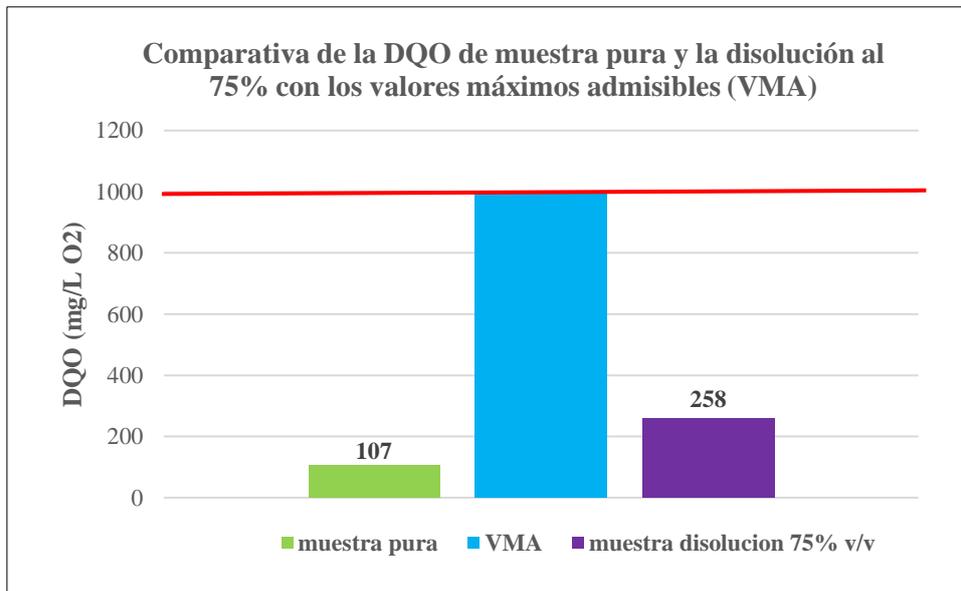
De acuerdo a la Figura 31, observamos el comportamiento de la gráfica de contornos para la reducción de la DQO (%) con la disolución al 75% v/v del efluente, después de la

electrocoagulación (EC) se observa que en el tratamiento EC-10 a una combinación de tiempo de 20 minutos y un voltaje de 10 V; se alcanza una máxima disminución del 87% de la DQO.

#### 4.5. Resultados de la comparativa de los valores de la disminución de la DQO aplicando electrocoagulación (EC) y los valores máximos admisibles (VMA)

**Tabla 19.** Comparativa de los valores máximos admisibles (VMA) y valores de la disminución de la DQO (mg O<sub>2</sub>/L) aplicando electrocoagulación (EC)

Parámetro	Unidades	Expresión	VMA	EC - muestra pura	EC - disolución al 75%
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg O <sub>2</sub> /L	DQO5	1000	107	258
Sólidos Suspendidos Totales (S.S.T)	mg/L	S.S.T	500	–	–
Aceites y Grasas (A y G)	mg/L	A y G	100	–	–



**Figura 32.** Comparativa de los valores máximos admisibles (VMA) y valores de la disminución de la DQO

De acuerdo a la Figura 32, observamos la comparativa de los valores máximos admisibles para DQO siendo el valor máximo 1000 mg O<sub>2</sub>/L según la normativa nacional vigente, y los valores de disminución de DQO aplicando electrocoagulación en la muestra pura del efluente con colorantes sintéticos y la disolución al 75% v/v del efluente, presentan valores de 107 mg O<sub>2</sub>/L y 258 mg O<sub>2</sub>/L de DQO, respectivamente. Estos valores no superan el valor máximo admisible para DQO establecido en la normativa nacional vigente.

## V. CONCLUSIONES

1. Los resultados del presente trabajo de investigación ha demostrado una máxima disminución del 95% de la demanda química de oxígeno (DQO) del efluente con colorantes sintéticos en el tratamiento EC-11 a un tiempo de 20 minutos y a un voltaje de 10 voltios con la muestra pura del efluente, y un 87% de la disminución de la DQO en el tratamiento EC-10 con la disolución al 75% v/v del efluente; lo cual confirma que la electrocoagulación es altamente efectiva para su aplicación en el tratamiento efluentes con colorantes sintéticos del sector textil.
2. El trabajo de investigación demuestra que el comportamiento de los parámetros fisicoquímicos como la temperatura y el potencial redox presentan la tendencia a incrementarse después de la electrocoagulación, mientras que los valores de pH y conductividad eléctrica disminuyen en relación al tiempo y voltaje aplicado.
3. Los tratamientos experimentales de la investigación han confirmado que la operación de la celda de electrocoagulación a una separación de 1cm entre placas y un número total de 6 placas en paralelo a corriente continua, presenta una alta efectividad del 95% de disminución de DQO del efluente con colorantes sintéticos de industria textil.
4. Los resultados de la electrocoagulación para la disminución de la DQO han demostrado que no superan los valores máximos admisibles (VMA) de 1000 mg/L de DQO, siendo el valor de 107 mg O<sub>2</sub>/L de DQO con la muestra pura del efluente, lo cual se encuentra dentro del rango aceptable para la descarga del efluente con colorantes sintéticos al sistema de alcantarillado.

## **VI. PROPUESTAS A FUTURO**

1. Se propone ejecutar un tratamiento posterior a los lodos producidos después de aplicar la electrocoagulación con el objetivo de conocer sus características y su potencial utilización.
2. Calcular el consumo de la energía utilizada por cantidad de efluente tratado en metros cúbicos para una aplicación de la electrocoagulación a escalas mayores.
3. Determinar la concentración del metal conductor como ánodo después de la electrocoagulación con la finalidad de comprobar su influencia en la electrocoagulación.
4. Ejecutar pruebas experimentales con una mayor cantidad de electrodos para determinar si estos influyen en la reducción de la DQO.

## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alvarez, J. (2019). *Determinación de los parámetros óptimos para el tratamiento de un efluente textil mediante coagulación-floculación química y electrocoagulación* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de la Plata]. Repositorio institucional de la UNLP. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/75789>
- Apaza, A. 2016. *Sistema combinado electrocoagulación-filtro biológico para la remoción de carga orgánica de los efluentes lácteos*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio institucional de la Universidad Nacional Agraria La Molina. <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/3395?show=full>
- Arango, R. (2007). Diseño de una celda de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea. *Revista Universidad EAFIT*, 43(14), 56-67.
- Armijos, B. (2015). *Aplicación de tratamiento a efluentes de Industrias Textil mediante Electrocoagulación* [Tesis de pregrado, Universidad de Guayaquil]. Repositorio institucional de la Universidad de Guayaquil. <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/19755>
- Bermeo, M. (2016). Reducción de colorantes de efluente sintético de industria textil mediante electrocoagulación. *Investigación, Tecnología e Innovación*, 8(2), 113-122.
- Bermeo, M. (2017). *Remoción eficiente de colorante refractario azul MNO reactivo en combinación con vinil sulfónico en aguas residuales mediante técnicas de electrocoagulación y adsorción* [Tesis de doctorado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. Repositorio institucional de tesis y trabajos de Titulación de la UNMSM. <https://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/20.500.12672/6368>
- Carrera, E. (2016). Los retos sostenibilistas del sector textil. *Revista de Química e Industria Textil*, 220, 20-32.
- Castillo, C. (2019). *Propuesta de mejora en el proceso de tintura de fibras textiles en poliamida*. [Tesis de pregrado, Universidad de América]. Repositorio institucional

Universidad de América.  
<https://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/7589>

- Chaturvedi, L. (2013). Eliminación de mercurio utilizando electrodos de Al-Al por electrocoagulación. *Revista Internacional de Investigación en Ingeniería Moderna*, Mexico, 3, 109-115.
- Chen, G. (2004). *Tecnologías electroquímicas en el tratamiento de aguas residuales*. [http://www.jpcomplex.ir/content/media/image/2013/08/772\\_orig.pdf](http://www.jpcomplex.ir/content/media/image/2013/08/772_orig.pdf)
- Cheshmeh, R. y Safari, M. (2016). Fotocatálisis asistida por peryodato de aguas residuales textiles reales en presencia de nanopartículas de MgO: optimización metodológica de la superficie de respuesta. *Ultrasonido Sonochem*, 32, 181-190. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.03.011>
- Clara, E. (2021). Evaluación a escala laboratorio del sistema electrocoagulación como propuesta para la remoción de color, turbiedad y dco en aguas residuales de origen textil. *Agua, Saneamiento & Ambiente*, 8(1), 29-32.
- Collazos, R. (2008). Descripción del comportamiento de un prototipo para tratamiento electroquímico de aguas residuales industriales. *Revista Academia y Virtualidad*, 3(2), 125-136.
- Gautama, R. (2006). La huella hídrica del consumo de algodón: una evaluación del impacto del consumo mundial de productos de algodón sobre los recursos hídricos en los países productores de algodón. *Economía ecológica*, 60, 186–203
- Ghaly, R. (2014). Producción, caracterización y tratamiento de efluentes textiles: una revisión crítica. *Revista Tecnología de Procesos*, 5, 1-18.
- Gómez, E. (2013). *Estudio de Optimización de Variables de Funcionamiento de un Sistema de Electrocoagulación para Tratar Aguas de la Industria Textil* [Tesis de pregrado, Escuela Politécnica Nacional]. Repositorio Digital Institucional de la Escuela Politécnica Nacional. <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/5551>
- González, C. (2016). *Tratamiento por electrocoagulación o3/uv para la degradación de índigo carmín presente en agua contaminada* [Tesis de maestría, Tecnológico

- Nacional de México]. Repositorio Institucional del Tecnológico Nacional de México. <https://rinacional.tecnm.mx/handle/TecNM/4076>
- Gutierrez, H. (2008). *Análisis y diseño de experimentos*. [https://gc.scalahed.com/recursos/files/r161r/w19537w/analisis\\_y\\_diseno\\_experimentos.pdf](https://gc.scalahed.com/recursos/files/r161r/w19537w/analisis_y_diseno_experimentos.pdf)
- Kabdash, I. (2012). Aplicaciones de electrocoagulación para aguas residuales industriales: Una revisión crítica. *Revisiones de Tecnología Ambiental*, 2(1), 32-45.
- Lasso, N. (2020). *Contraste de metodologías usando un coagulante natural (moringa) y tratamiento electroquímico aplicado a aguas contaminadas con colorantes textiles* [Tesis de pregrado, Universidad de Guayaquil]. Repositorio institucional de la Universidad de Guayaquil. <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/51159>
- Lopez, V. (2015). *Gestión de los efluentes de la industria textil*. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/87574>
- Mamani, E. (2021). *Modelamiento en el tratamiento fisicoquímico de aguas de lavado de lana por electrocoagulación para el cumplimiento de valores máximos admisibles (VMA)* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa]. Repositorio institucional de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/20.500.12773/13809>
- Medrano, J. E. (2021). Remoción de colorantes reactivos de efluentes de teñido textiles mediante electrocoagulación con electrodos de aluminio, Facultad de Ingeniería Química y Textil, de la Universidad Nacional de Ingeniería, 2016 (Tesis para el título profesional de Ingeniero Químico, Universidad Nacional de Ingeniería). <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/21912>
- Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento. (11 de marzo de 2019). Decreto Supremo N° 010-2019-VIVIENDA. Aprueban Valores Máximos Admisibles (VMA) de las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario. *Diario El Peruano*. <https://busquedas.elperuano.pe/download/url/decreto-supremo-que-aprueba-el-reglamento-de-valores-maximos-decreto-supremo-n-010-2019-vivienda-1748339-3>

- Nanseu, N. (2009). Remoción de mercurio (II) del agua por electrocoagulación utilizando electrodos de aluminio y hierro. *Journal of Hazardous Materials*, 2(6), 124-139.
- Organización de las Naciones Unidas (2019). *El costo ambiental de estar a la moda*. Organización de las Naciones Unidas. <https://news.un.org/es/story/2019/04/1454161>
- Ozdemir, J. (2008). Optimización de la deshidratación osmótica de pimientos verdes picados mediante la metodología de superficie de respuesta. *Ciencia y Tecnología de los alimentos*, 4(10), 204 – 220.
- Restrepo, A. (2006). La electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas. *Producción + Limpia*, 2(2), 58-77.
- Rodríguez, E. (2016). *Determinación de la eficiencia de remoción de Colorantes presentes en el Efluente de una Industria de Textiles de Tela de Algodón mediante Electrocoagulación* [Tesis de maestría, Universidad de Guayaquil]. Repositorio institucional de la Universidad de Guayaquil. <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/13042>
- Sen, S. y Demirer, G. (2003). Tratamiento anaeróbico de aguas residuales textiles reales con un reactor de lecho fluidizado. *Investigación del agua*, 37(8), 1868–1878. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(02\)00577-8](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(02)00577-8)
- Terán, G. y Banchón, C. (2015). Dosificación mínima del reactivo Fenton para la remediación de agua contaminada con colorantes. *Enfoque UTE*, 6(3), 65-80. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v6n3.70>
- Tinoco, G. (2016). Remoción de colorantes de efluente sintético de industria textil aplicando tecnología avanzada de electrocoagulación. *Revista del Instituto de investigación de la Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas*, 19(38), 125-128.
- Vidal, A. (2013). *Eliminación del colorante negro ácido 194 desde aguas residuales textiles mediante electrocoagulación* [Tesis de maestría, Universidad de Santiago de Chile]. Repositorio ANID. <http://repositorio.conicyt.cl/handle/10533/184359#>
- Zaldumbide, J. (2016). *Selección entre un proceso de electrocoagulación y un proceso combinado de electrocoagulación con Fenton para el diseño de una planta de tratamientos de aguas residuales provenientes de la empresa textil FABRINORTE*

CIA. LTDA [Tesis de pregrado, Escuela Politécnica Nacional]. Repositorio Digital Institucional de la Escuela Politécnica Nacional.  
<https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/14858>

Zamora, R. (2011). Oxidación fotoelectrocatalítica de fenol y de 4-clorofenol con un soporte de titanio impregnado con TiO<sub>2</sub>. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 27(1), 75-84.

Zaruma, P. (2018). Los colorantes textiles industriales y tratamientos óptimos de sus efluentes de agua residual: Una breve revisión. *Revista de la Facultad de Ciencias Químicas*, 19, 38-47.

## **ANEXOS**

**Anexo 01. Panel fotográfico**

**Figura 33.** Área de teñido planta textil Mecano Color SAC



**Figura 34.** Procesos textiles Mecano Color SAC



**Figura 35.** Área de control de efluentes textiles Mecano Color SAC



**Figura 36.** Muestreo del efluente con colorantes sintéticos



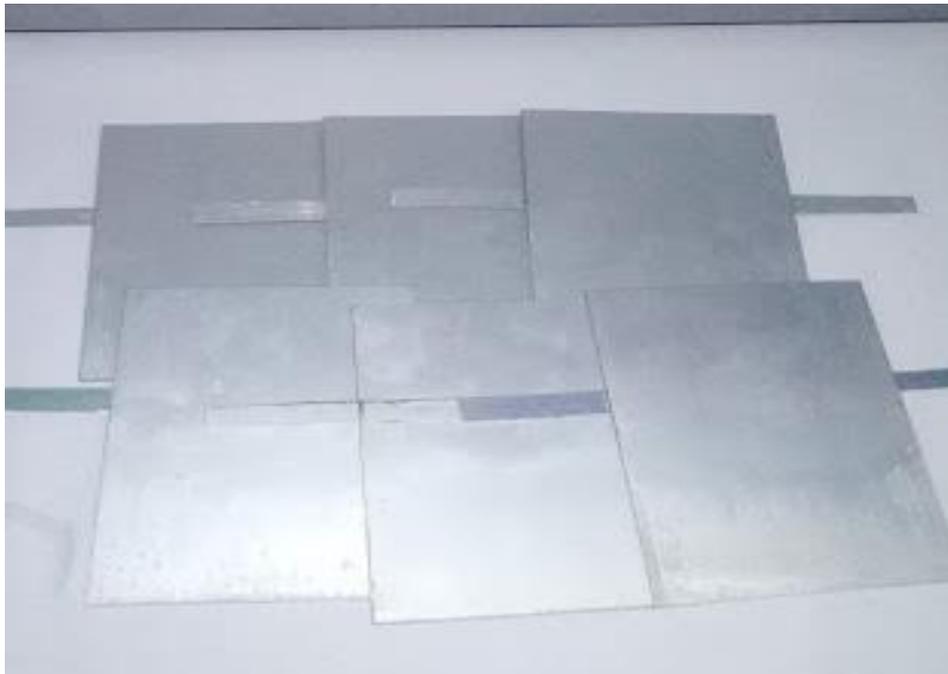
**Figura 37.** Medición de temperatura in situ



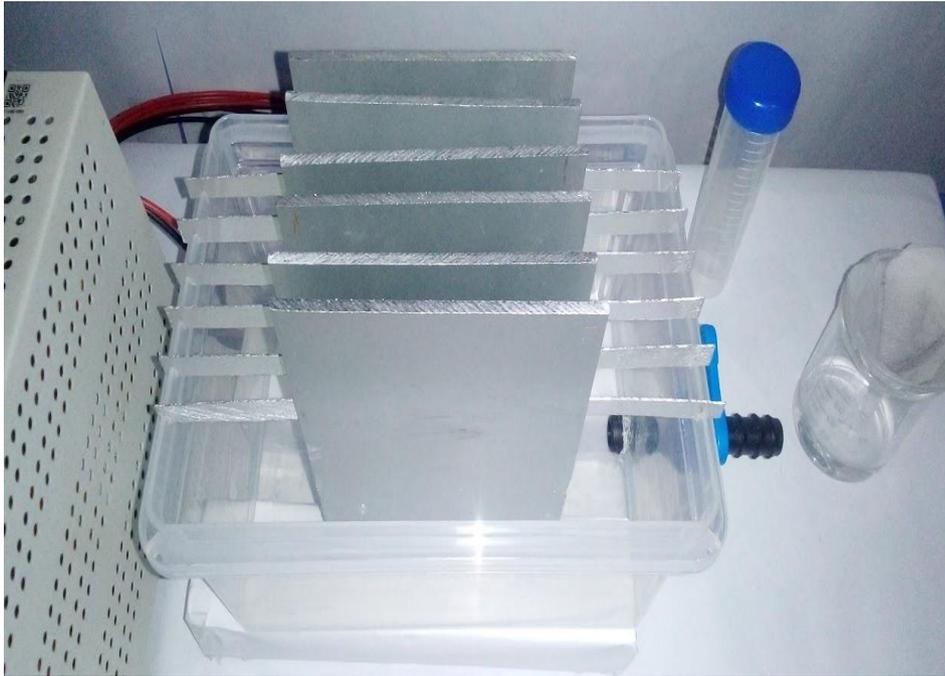
**Figura 38.** Medición de pH in situ



**Figura 39.** Muestras del efluente con colorantes sintéticos



**Figura 40.** Acondicionamiento de las placas de aluminio



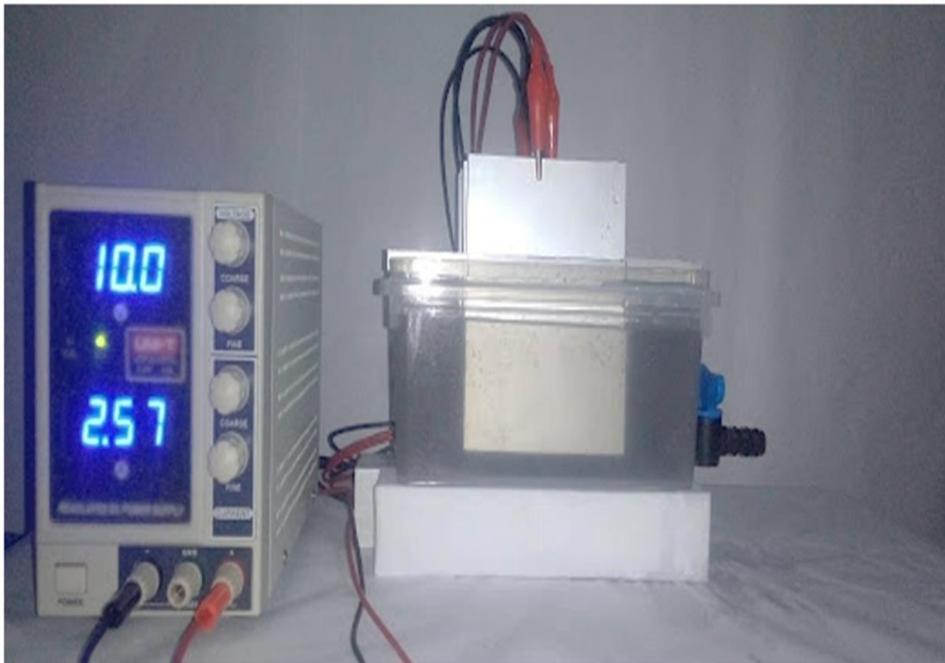
**Figura 41.** Acondicionamiento de la celda de electrocoagulación



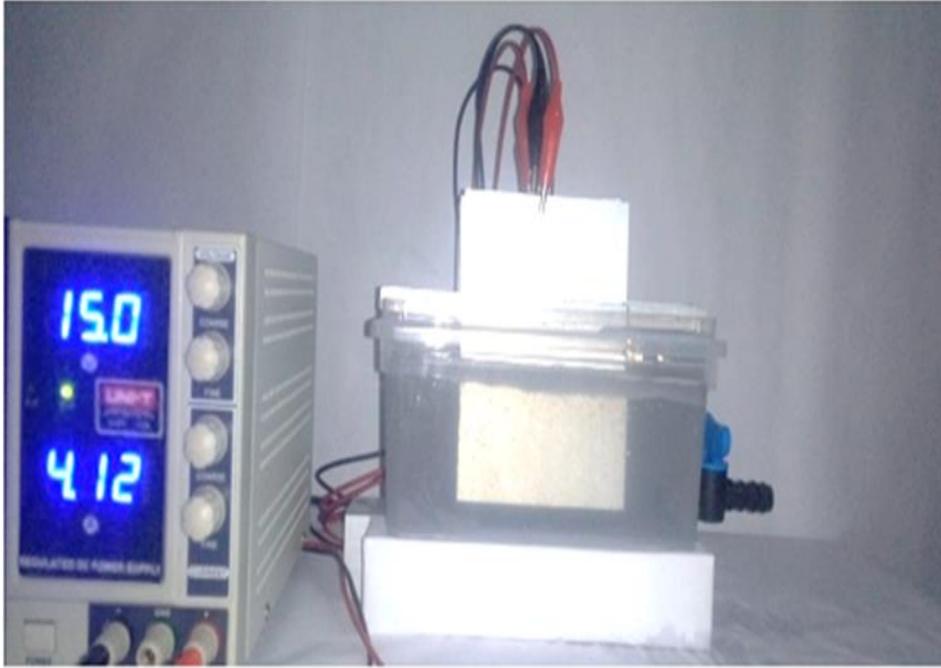
**Figura 42.** Prueba de funcionamiento de la celda de electrocoagulación



**Figura 43.** Operación de la celda electrocoagulación a 5 voltios



**Figura 44.** Operación de la celda electrocoagulación a 10 voltios



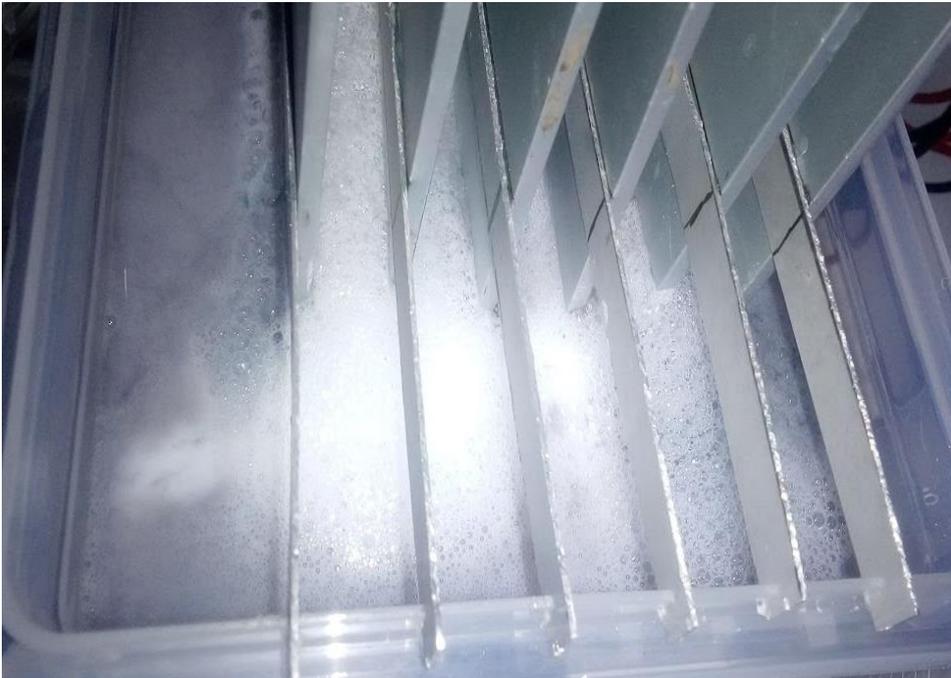
**Figura 45.** Operación de la celda electrocoagulación a 15 voltios



**Figura 46.** Electrocoagulación de la muestra pura del efluente



**Figura 47.** Electrocoagulación de la muestra de disolución al 75% v/v del efluente



**Figura 48.** Lodos generados en los tratamientos



**Figura 49.** Toma de muestras de la muestra pura del efluente



**Figura 50.** Toma de muestra de disolución al 75% v/v del efluente



**Figura 51.** Toma de muestras a los 20 minutos



**Figura 52.** Medición de pH



**Figura 53.** Medición de conductividad eléctrica



**Figura 54.** Medición de potencial redox



**Figura 55.** Digestión de muestras en reactor DQO



**Figura 56.** Medición de DQO en espectrofotometro



**Figura 57.** Multiparametro marca HACH utilizado en la investigación



**Figura 58.** Electrodo marca HACH para medición de pH



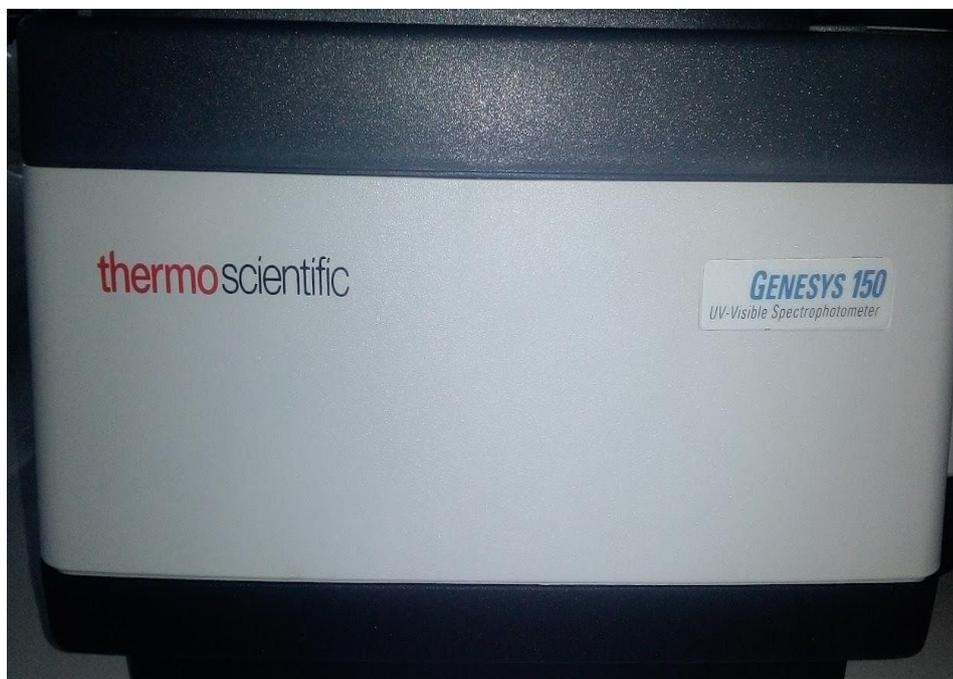
**Figura 59.** Electrodo marca HACH para medición de conductividad eléctrica



**Figura 60.** Electrodo marca HACH para medición de potencial redox



**Figura 61.** Digestor DQO marca HACH utilizado en la investigación



**Figura 62.** Espectrofotometro utilizado en la investigación

## Anexo 02. Procedimiento para la medición del pH – Metodo normalizado APHA

### Método electrométrico

#### 1. Principio

El principio básico de la determinación electrométrica del pH es la medida de la actividad de los iones hidrógeno por mediciones potenciométricas utilizando un electrodo patrón de hidrógeno y otro de referencia. El electrodo de hidrógeno consiste en un electrodo de platino por el que se pasan burbujas de hidrógeno gaseoso a una presión de 101 kPa. Debido a la dificultad de utilizarlo y al potencial de intoxicación del electrodo de hidrógeno, se utiliza comúnmente el electrodo de vidrio. La fuerza electromotriz (fem) producida en el sistema de electrodo de vidrio varía linealmente con el pH y esta relación lineal se describe comparando la fem medida con el pH de diferentes tampones. El pH de la muestra se determina por extrapolación. Dado que no se pueden medir las actividades iónicas aisladas, como  $a_{H^+}$ , el pH se define operacionalmente o en una escala potenciométrica.

#### 2. Instrumental

*Medidor de pH*, que conste de un potenciómetro, un electrodo de vidrio, un electrodo de referencia y un dispositivo para compensar la temperatura. El circuito se completa a través del potenciómetro cuando los electrodos se sumergen en la solución test. Muchos medidores de pH son capaces de medir pH o milivoltios y algunos tienen una expansión de escala que permite lecturas de hasta 0,001 unidades de pH, pero la mayoría de instrumentos no son tan precisos. Para trabajos de rutina utilícese un medidor de pH exacto y reproducible hasta 0,1 unidades de pH con una escala de 0 a 14, y dotado de un ajuste compensador de la temperatura.

#### 3. Procedimiento

**a) Calibrado del aparato:** Síganse las instrucciones del fabricante, en cada caso, para el medidor de pH y para conservación y preparación de los electrodos para su uso. Las soluciones recomendadas para conservación de los electrodos a corto plazo varían con el tipo de electrodo y el fabricante, pero generalmente tienen una conductividad superior a 4.000  $\mu\text{ohmios/cm}$ . El agua del grifo es mejor sustituto que la destilada, pero lo mejor para el

electrodo simple de vidrio es tampón pH 4, y es preferible KCl saturado para un electrodo de referencia de calomelanos y Ag/AgCl. La solución preferida para un electrodo combinado es KCl saturado. Manténganse los electrodos húmedos, devolviéndolos a la solución para almacenado siempre que no se utilice el medidor de pH. Antes de su uso, extraíganse los electrodos de la solución de conservación, lávense y séquense con un paño suave, colóquense en la solución tampón inicial y ajústese el punto de isopotencial (apartado 2a anterior). Selecciónese un segundo tampón cuyo pH no se diferencie en más de 2 unidades del de la muestra y llévase la muestra y el patrón a la misma temperatura, que puede ser la de la habitación, una fija (por ejemplo, 25 °C), o la de una muestra reciente. Sáquense los electrodos del primer tampón, lávense bien con agua destilada, séquense y sumérjanse en el segundo tampón. Regístrese la temperatura medida y ajústese el mando de temperatura de forma que el aparato indique el valor de pH del tampón a la temperatura de la prueba (éste es un ajuste de pendiente).

Utilícese el valor de las tablas para el tampón usado a la temperatura de la prueba. Sáquense los electrodos del segundo tampón, lávense bien con agua destilada y séquense los electrodos como se indicó antes. Sumérjanse en un tercer tampón por debajo de pH 10, aproximadamente 3 unidades distinto del segundo; la lectura no debe diferir más de 0,1 unidad del pH del tercer tampón. Si el aparato muestra una respuesta distinta en más de 0,1 unidad del pH esperado, compruébese si los electrodos o el potenciómetro tiene problemas (véanse apartados 5a y b más adelante).

El objetivo de la estandarización consiste en ajustar la respuesta del electrodo de vidrio al aparato. Cuando sólo se realicen determinaciones ocasionales del pH, se estandarizará el aparato antes de cada una de ellas. Cuando sean frecuentes y el aparato sea estable, estandarícese menos a menudo. Si el pH de las muestras varía mucho, estandarícese cada muestra con un tampón cuyo pH no difiera más de 1 o 2 unidades del de la muestra.

**b) Análisis de la muestra:** Establézcase el equilibrio entre electrodos y muestra agitando ésta para asegurar su homogeneidad; la agitación será suave para reducir al mínimo el arrastre de dióxido de carbono. Para muestras tamponadas o con gran fuerza iónica, acondiciónense los electrodos después de limpiarlos, introduciéndolos en la muestra durante 1 minuto. séquense y sumérjanse en otra porción nueva de la misma muestra, y léase el pH. Con soluciones diluidas, mal tamponadas, equilíbrense los electrodos por inmersión en tres o cuatro porciones sucesivas de la muestra. Tómese una muestra nueva para medir el pH.

#### 4. Precisión y sesgo

Utilizando bien un medidor de pH con buenos electrodos, se puede conseguir una precisión de  $\pm 0,02$  unidades de pH y una precisión de  $\pm 0,05$  unidades de pH. Sin embargo, en condiciones normales, el límite de precisión es  $\pm 0,1$  unidades de pH, especialmente para determinaciones en el agua y soluciones mal tamponadas. Por esa razón, el pH se debe dar en los valores más próximos a 0,1 unidad de pH. Se analizó en 30 laboratorios una muestra sintética de solución tampón Clark y Lubs de pH 7,3, electrométricamente, con una desviación estándar de  $\pm 0,13$  unidades de pH.

### Anexo 03. Procedimiento para la medición de conductividad eléctrica – Metodo Normalizado APHA

#### Metodo de laboratorio

##### 1. Instrumental

##### a) Instrumental de conductividad autocontenida:

Utilícese un dispositivo consistente en una fuente de corriente alterna, un puente de Wheatstone, un indicador de valor nulo y una celula de conductividad u otro instrumento que mida el indice de corriente alterna y su voltaje a traves de la celula, teniendo este ultimo la ventaja de proporcionar una lectura lineal de la conductividad. Elijase un instrumento capaz de medir la conductividad con un error que no exceda el 1 por 100 o 1  $\mu\text{mho/cm}$ .

##### b) Termometro,

capaz de marcar hasta 0,1 °C cubriendo una amplitud de 23 a 27 °C. Por la rapidez de su respuesta, resulta conveniente emplear un termómetro electrico provisto de un pequeño sensor de temperatura.

##### c) Celula de conductividad:

1) **Tipo electrodo de platino.** Este tipo de celula se presenta en forma de pipeta o de inmersión. La elección de la celula depende de la amplitud esperada de conductividad y de la amplitud de resistencia del instrumento. Ajustese experimentalmente la amplitud del conjunto

total de aparatos, comparando los resultados instrumentales con las conductividades reales de las soluciones de KCl enumeradas en la tabla 2510:1. Limpiense las celulas nuevas con una mezcla acida cromico-sulfurica y platinicense los electrodos antes de su uso. A continuacion se lavan y se platinizan de nuevo, siempre que las lecturas sean irregulares, cuando no pueda obtenerse un punto final neto o cuando la inspeccion muestre que se han desprendido capas de negro de platino.

Para platinizar, preparese una solución de 1 g de acido cloroplatinico,  $H_2PtCl_6 \cdot 6H_2O$ , y 12 mg de acetato de plomo en 100 ml de agua destilada. Una solucion mas fuerte reduce el tiempo requerido para la platinizacion, por lo que puede emplearse cuando el tiempo es un factor decisivo, por ejemplo, cuando la constante celular es de 1,0/cm o mas. Sumerjense los electrodos en esta solución y conectense ambos al polo negativo de una pila de 1,5 V. Conectese el polo positivo a un trozo de alambre de platino e introduzcase en la solucion. Utilicese una corriente que solo desprenda una pequeña cantidad de gas. Continuar la electrolisis hasta que ambos electrodos se recubran con negro de platino. Conservese la solucion para uso ulterior. Enjuagar cuidadosamente los electrodos y, cuando no se usen, mantenerlos inmersos en agua destilada.

**2) Tipo electrodo no de platino.** Utilicense celulas de conductividad con electrodos hechos de metales comunes duraderos (acero inoxidable entre otros) para monitorizacion continua y estudios de campo. Calibrense estas celulas mediante comparacion de la conductividad de la muestra con los resultados obtenidos con un instrumento de laboratorio. Para reducir al minimo los errores de la constante celular, utilicese una celula y un aparato adecuadamente disenados y homologados.

## 2. Procedimiento

- a) **Determinacion de la constante de la celula:** Aclarese la celula de conductividad al menos con tres porciones de solucion KCl 0,01 M. Ajustese la temperatura de la cuarta porcion a  $25,0 \pm 0,1$  °C, midase su resistencia y anotese el valor termico.
- b) **Medicion de la conductividad:** Aclarese la celula con una o mas porciones de la muestra. Ajustese la temperatura de una ultima porcion a  $25,0 \pm 0,1$  °C. Midase la resistencia o conductividad de la muestra y anotese la temperatura.

## **Anexo 04. Procedimiento para la medición de temperatura – Metodo normalizado APHA**

### **Métodos de laboratorio y de campo**

#### **1. Introduccion**

La lectura de cifras de temperatura se utiliza en el calculo de diversas formas de alcalinidad, en estudios de saturacion y estabilidad respecto al carbonato de calcio, en el calculo de la salinidad y en las operaciones generales de laboratorio. En los estudios limnologicos, con frecuencia se requieren temperaturas de agua en funcion de la profundidad. Las temperaturas elevadas, consecuencia de descargas de agua calentada, pueden tener un impacto ecologico significativo. A menudo, la identificacion de la fuente de aporte hidrico, como en los manantiales profundos, solo es posible efectuando medidas de temperatura. Las plantas industriales suelen pedir datos de temperatura del agua para uso sistematico o cálculos de transmision de calor.

#### **2. Procedimiento**

##### **1. Medidas de temperatura de aguas no profundas en laboratorios y otras valoraciones de temperatura de aguas no profundas**

Normalmente, las medidas de temperatura pueden realizarse con cualquier termometro Celsius de mercurio, que, como minimo, debera tener una escala con marcas cada 0,1 °C sobre el tubo capilar y una capacidad termica minima que permita un equilibrado rapido. Compruebese periodicamente con un termómetro de precision certificado por el National Institute of Standards and Technology (NIST, antes National Bureau of Standards), que se utiliza con su certificado y cedula de correccion. Para operaciones de campo, utilicese un termómetro con estuche metalico a fin de evitar roturas.

## **Anexo 05. Procedimiento para la medición de DQO – Metodo normalizado APHA**

### **Método de reflujo cerrado – colorimétrico**

El método de digestión con dicromato de potasio, usando el bloque dry block, modelo TE-021, es una reacción de oxidación en un medio fuertemente ácido a alta temperatura en presencia de un catalizador (sulfato de plata). Tras la oxidación de la materia orgánica presente (cambio de cromo del estado hexavalente ( $\text{Cr}^{6+}$ ) al estado trivalente ( $\text{Cr}^{3+}$ ) se obtiene la DQO directamente por colorimetría, ya que ambas especies de cromo se absorben en la región visible del espectro de luz. Puede ser utilizado el espectrofotómetro que permite el uso de cubetas cilíndricas para DQO (opcional).

Además, el analizador de DQO se puede utilizar junto con los kits de reactivos, que ofrecen practicidad y reducen el tiempo en la preparación de reactivos, curva de calibración, reduciendo riesgos para el analista, etc. Para utilizar el analizador de DQO, el bloque dry block, modelo TE-021, debe contener 28 alojamientos de 16,5 x 70 mm de diámetro, compatibles con los tubos de DQO del analizador.

#### **• Muestreo**

Preferiblemente, recolecte las muestras en frascos de vidrio. Siempre que sea posible, el análisis debe realizarse después de la recolección; de lo contrario, la muestra debe conservarse mediante acidificación a  $\text{pH} \leq 2$  utilizando ácido sulfúrico concentrado. Mezcle (homogeneice) todas las muestras que contengan sólidos en suspensión antes del análisis. Realice diluciones preliminares para residuos que contengan un alto contenido de DQO para reducir el error inherente en la medición de pequeños volúmenes de muestra.

#### **• Curva de calibración para DQO**

Para la construcción de curvas, prepare al menos 5 patrones de hidrogenoftalato de potasio (KHP) con DQO equivalente para cubrir cada rango de concentración. Para cada patrón se agrega un volumen específico de la solución de referencia, completando el volumen final con agua destilada. Luego, retire un volumen conocido de la solución anterior y agregue las soluciones de digestión y catalítica, y realice la digestión. Después de enfriar a temperatura

ambiente, cada punto se lee en un espectrofotómetro. Cada vez que se prepara una nueva solución, un cambio de marca de ácido sulfúrico 20% para eliminar interferentes.

2. El volumen adecuado de muestras y reactivos varía conforme los tubos utilizados, de acuerdo con la *Tabla 1*.

**Tabla 1.** Volumen (mL) de reactivos *versus* volumen de muestras (mL)

Muestra	Solución de digestión	Ácido sulfúrico	Volumen total
2,5*	1,5	3,5	7,5
5,0	3,0	7,0	15,0
10,0	6,0	14,0	30,0

\*Patrón: tubos de 10 mL.

3. Realice una prueba en blanco, utilizando agua destilada en lugar de la muestra y realice el mismo procedimiento.
4. Se debe homogeneizar la muestra, agitando el frasco que contiene la muestra, luego, cuando sea necesario diluir la muestra. La dilución debe realizarse utilizando el factor de dilución correspondiente.
5. Colocar en los tubos, 1,5 mL de la solución de digestión.
6. Adicionar 2,5 mL de muestra de agua residual.
7. Adicionar 3,5 mL del reactivo ácido sulfúrico
8. Cerrar los tubos y agitar varias veces para homogeneizar. Mezclar bien antes de aplicar calor (siguiente paso) para evitar calentar el fondo del tubo y una posible reacción exotérmica. *“Se recomienda que los pasos 5 a 8 se realicen en una campana de extracción de gases. De lo contrario, use un protector facial y protéjase las manos del calor que se produce cuando se mezclan las soluciones.”*
9. Colocar los tubos en el bloque dry block, modelo TE-021, para hacer la digestión de la muestra a 150 ° C por 2 horas.
10. Retire los tubos del bloque de digestión, déjelos enfriar, agítelos y deje que la materia suspendida se asiente para asegurarse de que el camino óptico esté despejado. Limpie correctamente los tubos antes de las lecturas para evitar interferir con el paso de la luz.
11. En el espectrofotómetro, ajuste de la longitud de onda a 600 nm y “cero” con el blanco de prueba. Realice la lectura de la muestra siguiendo el mismo procedimiento de la construcción de la curva.

## • CÁLCULO

Si las muestras, los patrones y el blanco se analizan en las mismas condiciones de volumen y longitud de la trayectoria óptica en un espectrofotómetro, calcule la concentración de DQO con la ecuación de la recta de la curva de calibración de las soluciones patrón.

## **CONSIDERACIONES FINALES**

La DQO es un parámetro indispensable para determinar la cantidad de contaminantes orgánicos e inorgánicos en el agua y los efluentes. Los valores de DQO suelen ser superiores a los de la DBO, realizándose el análisis en un período más breve.

El aumento de la concentración de DQO en un cuerpo de agua se debe principalmente a los vertidos de origen industrial, debido a la capacidad de detectar la presencia de sustancias resistentes a la degradación biológica. Por su importancia, el análisis de este y otros parámetros ambientales deben realizarse siguiendo métodos estandarizados y utilizando equipos adecuados para tal fin, asegurando así la confiabilidad de los resultados.

### ***Soluciones y reactivos***

Solución de digestión: adicionar, en 125 mL de agua destilada, 2,554 g de dicromato de potasio ( $K_2Cr_2O_7$ ), previamente seco en estufa a  $103^\circ C$  por 2 horas, 41,75 mL de ácido sulfúrico, 8,325 g de  $H_2SO_4$ . Disolver, enfriar y completar, con agua destilada, el volumen en balón volumétrico de 250 mL.

– Reactivo de ácido sulfúrico: adicionar sulfato de plata ( $Ag_2SO_4$ ) cristal o polco en  $H_2SO_4$  en una proporción de 2,03 g de  $Ag_2SO_4$  para 200 mL de ácido sulfúrico concentrado. La disolución completa del sulfato de plata demora cerca de 24 horas; por esto, se debe estar siempre atento a la necesidad de preparar una nueva solución.

– Solución patrón de hidrogenoftalato de potasio (KHP): de una cantidad de KHP seca a  $120^\circ C$  por 2 horas, pesar 425,0 mg y disolver en aproximadamente 500 mL de agua destilada, e completar el volumen para 1000 mL en balón volumétrico. Esta solución es estable hasta por 3 meses cuando es guardada en refrigeración. Relación teórica entre KHP y la DQO: 1 mg de KHP = 1,171 mg  $O_2$ .

## **Anexo 06. Procedimiento para la medición de potencial redox – Guía HACH**

### **Método de electrodo**

#### **Preparación para su uso**

1. Quite la cápsula de alojamiento del electrodo.
2. Antes del primer uso, quite la cinta del orificio de llenado y la etiqueta del cuerpo del electrodo.
3. Coloque la tapa del orificio de llenado deslizándola sobre el orificio. Cierre la tapa cuando no se use y ábrala cuando se rellene y durante las mediciones.
4. Enjuague la unión de referencia y el electrodo de platino con agua desionizada y séquela con un trapo que no tenga pelusa.
5. Para el almacenamiento temporal, llene la cápsula para almacenamiento hasta la mitad con solución para almacenamiento de electrodos Hach o solución de llenado 3M KCl. Afloje la tapa de la cápsula para almacenamiento y presione para instalar la botella en el electrodo. Apriete bien la tapa de la cápsula para almacenamiento.

#### **Calibración**

##### **Antes de la calibración:**

El electrodo debe tener el sello de duración de servicio correcto. Ajuste la fecha y la hora del medidor antes de conectar el electrodo. No es necesario volver a calibrar cuando se pasa la sonda calibrada de un medidor HQd a otro si el medidor adicional está configurado para usar las mismas opciones de calibración. Si el medidor HQd adicional utiliza opciones de calibración diferentes (por ejemplo, la rutina de calibración estándar), calibre la sonda o cambie la configuración de método o seleccione un método diferente. Para ver la calibración actual, seleccione la tecla REGISTRO DE DATOS , Ver datos de sonda y Ver calibración actual.

Si hay dos sondas conectadas al medidor, pulse la flecha ARRIBA o ABAJO para cambiar al modo de pantalla única y mostrar la opción Calibrar. Los estándares ORP/Redox no se deben diluir. Use siempre estándar ORP/Redox nuevo para la calibración. Agite suavemente. Evite apoyar el electrodo en el fondo o los laterales del contenedor. Consulte la sección de solución

de problemas para ver los errores de calibración . El orificio de llenado debe estar abierto durante la calibración con el fin de lograr un flujo adecuado de la solución de llenado. Cierre la tapa cuando no se use.

### **Ejecución del estándar de comprobación**

La función del estándar de comprobación sirve para validar el rendimiento del instrumento entre las mediciones de muestras. Utilice esta función para la medición periódica o a intervalos definidos por el usuario de una solución estándar de la que se pueda realizar un seguimiento. Establezca los criterios para los estándares de comprobación en el menú de configuración del MTC301. Nota: El control de acceso debe estar desactivado o se deberá introducir una contraseña válida antes de poder cambiar cualquier opción del método de estándar de comprobación.

1. Seleccione Ejecutar estándar de comprobación en el menú Opciones del medidor. Nota: Seleccione la sonda adecuada si hay dos conectadas al medidor.
2. Obtenga la solución estándar especificada en la pantalla.
3. Coloque el electrodo en la solución estándar y seleccione LEER. La pantalla mostrará Estabilizando... una barra aparece indicando el progreso de la estabilización de la sonda. La pantalla muestra el valor del estándar de comprobación y bien Estándar de comprobación aceptado o Estándar de comprobación erróneo de sonda. Si la pantalla muestra Estándar de comprobación aceptado, la medición de estándar de comprobación está dentro de los límites aceptados definidos por el usuario administrador. Seleccione TERMINADO para proceder con la medición de la muestra. Si la pantalla muestra Estándar de comprobación erróneo, la medición estará fuera de los límites aceptados definidos por el usuario administrador y se sugerirá una nueva calibración. Si los criterios de aceptación se establecen para La calibración caduca con el error: Sí, la pantalla mostrará el icono de calibración con un signo de interrogación hasta que se vuelva a calibrar el electrodo. Vuelva a calibrar el electrodo para corregir el indicador de estado.

### **Medición: método directo**

#### **Antes de la medición**

El electrodo debe tener el sello de duración de servicio correcto. Ajuste la fecha y la hora del medidor antes de conectar el electrodo. El electrodo está calibrado de fábrica y listo para su uso. Para aplicaciones que requieran mayor exactitud y precisión, verifique la calibración con

estándares de comprobación o realice una comprobación de usuario. Se requieren calibraciones rutinarias. Asegúrese de que el electrodo de platino está limpio antes de la medición de la muestra (Limpieza de la sonda en la página 9). Si se necesita una trazabilidad completa, introduzca una ID de muestra y de operador antes de realizar la medición. Para ver los errores de medición, consulte. Agite las muestras suavemente durante la medición. Para obtener un tiempo de respuesta óptimo, el orificio de llenado debe estar abierto durante la medición. Cíérrelo cuando no se use.

### **Notas sobre la medición**

- Los datos se guardan automáticamente en el registro de datos cuando se selecciona Pulsar para leer o Intervalo en el modo de medición. Si se selecciona Continua, los datos se guardarán sólo cuando se pulse la tecla ALMACENAR. Para el correcto flujo de la solución de relleno, es necesario abrir el orificio de llenado durante la medición.
- La solución de relleno debe estar por encima del nivel de la muestra durante la medición.
- Para disminuir de forma significativa el tiempo de respuesta de las muestras de tipo reducción:
  - El disco de platino deberá estar limpio y uniforme.
- Sumerja el disco de platino durante 3-10 minutos en solución reductora para electrodos ORP antes del análisis de la muestra.
- Enjuague el electrodo con muestra y después proceda con la medición.

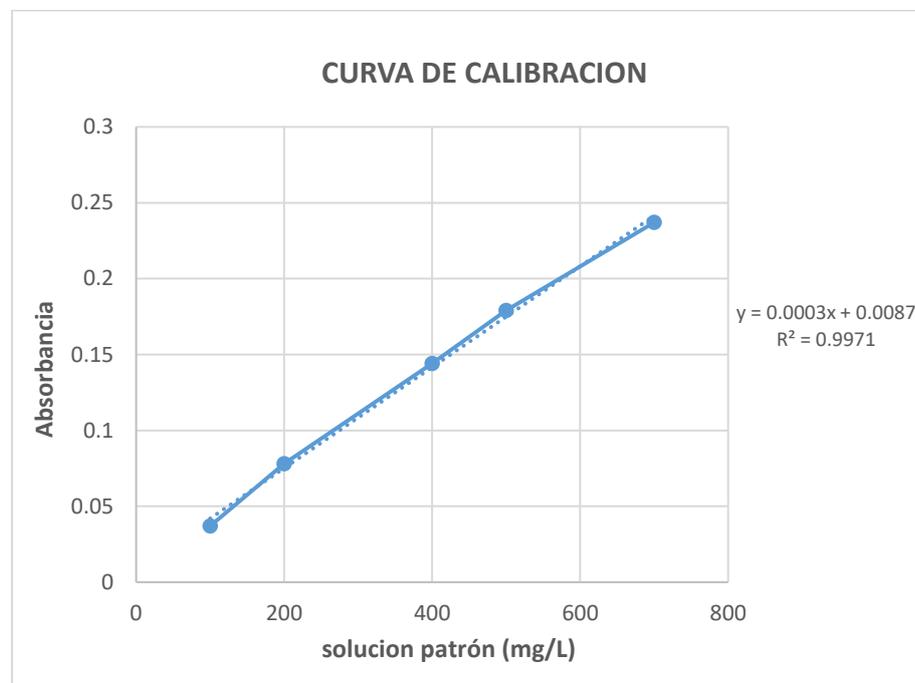
### **Medición: valoraciones de oxidación**

La Oxidación-reducción, o valoraciones de redox, proporciona un método sencillo y fiable para determinar muchas sustancias de la solución. Una valoración de redox consiste en añadir a una muestra desconocida pequeños incrementos de un valorante que convierte la parte desconocida en un estado de oxidación diferente. Después de cada adición de valorante, el electrodo ORP/Redox desarrolla un potencial proporcional al logaritmo del índice de actividades de los dos estados de oxidación. En la inflexión, o punto final, el valorante ha oxidado o reducido completamente la parte desconocida, provocando un cambio brusco en el logaritmo del índice de las actividades de los dos estados de oxidación. El electrodo de platino desarrolla el cambio brusco correspondiente en el potencial. A menudo se pueden determinar con precisión varias especies oxidantes o reductoras en la misma solución mediante una única valoración con varios puntos de inflexión.

### Anexo 07. Cálculo de DQO por colorimetría

**Tabla 20.** Diluciones del patron biftalato de potasio (KHP) para DQO

Soluciones patrones (mg/L)	Absorbancia blanco	Absorbancia patron	Absorbancia corregida
100	2,684	2,647	0,037
200	2,684	2,606	0,078
400	2,684	2,540	0,144
500	2,684	2,505	0,179
700	2,684	2,447	0,237



**Figura 63.** Curva de calibración para DQO

**Tabla 21.** Valores de la ecuación de la curva de calibración para DQO

Valores de la ecuación		
Pendiente	(m)	0,0003
intercepto	(b)	0,0087
ecuacion para DQO	(X)	(y-b)/m

**Tabla 22.** Calculo de DQO por colorimetria de la muestra pura del efluente antes de la electrocoagulacion

Muestra	Absorbancia blanco	Absorbancia muestra	Absorbancia corregida muestra	DQO calculado (mg O <sub>2</sub> / L)
Inicial	2,684	2,546	0,138	2150

**Tabla 23.** Calculo de DQO por colorimetria de la muestra pura del efluente después de la electrocoagulacion

Muestra	Absorbancia blanco	Absorbancia muestra	Absorbancia corregida muestra	DQO calculado (mg O <sub>2</sub> / L)
EC-1	2,684	2,514	0,169	535
EC-2	2,684	2,558	0,125	388
EC-3	2,684	2,546	0,138	430
EC-4	2,684	2,541	0,143	447
EC-5	2,684	2,551	0,132	412
EC-6	2,684	2,573	0,111	341
EC-7	2,684	2,526	0,157	495
EC-8	2,684	2,572	0,111	342
EC-9	2,684	2,630	0,054	150
EC-10	2,684	2,636	0,047	129
EC-11	2,684	2,643	0,041	107

**Tabla 24.** Calculo de DQO de muestra disolucion 75% v/v efluente por colorimetría antes de la electrocoagulacion

Muestra	Absorbancia blanco	Absorbancia muestra	Absorbancia corregida muestra	DQO calculado (mg O <sub>2</sub> / L)
Inicial	2,684	2,557	0,128	1980

**Tabla 25.** Calculo de DQO de muestra disolucion 75% v/v efluente por colorimetria despues de la electrocoagulacion

Muestra	Absorbancia blanco	Absorbancia muestra	Absorbancia corregida muestra	DQO calculado (mg O <sub>2</sub> / L)
EC-1	2,684	2,461	0,223	714
EC-2	2,684	2,503	0,181	573
EC-3	2,684	2,497	0,187	594
EC-4	2,684	2,486	0,198	632
EC-5	2,684	2,503	0,181	574
EC-6	2,684	2,515	0,169	534
EC-7	2,684	2,480	0,204	652
EC-8	2,684	2,562	0,122	376
EC-9	2,684	2,580	0,104	316
EC-10	2,684	2,598	0,086	258
EC-11	2,684	2,586	0,098	297