

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**“REDUCCIÓN DEL CONTENIDO DE CROMO HEXAVALENTE POR ELECTROCOAGULACIÓN EN LAS AGUAS RESIDUALES DE UNA EMPRESA DE CURTIEMBRE”**

TÉSIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO QUÍMICO

**AUTORES**

JOSE ANTONIO AGUIRRE MITMA

JOSH PETER JULCARIMA LAURA

CYNTHYA PAMELA RAMOS AUCCASI

**ASESOR**

Mg. POLICARPO AGATÓN, SUERO IQUIAPAZA

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

Callao, 2022

PERÚ



## **INFORMACIÓN BÁSICA**

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

UNIDAD DE INVESTIGACIÓN DE INGENIERÍA QUÍMICA

TÍTULO:

“Reducción del contenido de cromo hexavalente por electrocoagulación en las aguas residuales de una empresa de curtiembre”

### **AUTORES:**

JOSE ANTONIO AGUIRRE MITMA / 0000-0002-8773-1441 / 45837253

JOSH PETER JULCARIMA LAURA / 0000-0001-8994-761X / 48040016

CYNTHYA PAMELA RAMOS AUCCASI / 0000-0002-2143-4006 / 75583930

### **ASESOR:**

Mg. POLICARPO AGATON SUERO IQUIAPAZA / 0000-0002-0172-1841 /  
25634835

### **LUGAR DE EJECUCIÓN:**

LABORATORIO DE LA FACULTAD DE INGENIERIA QUÍMICA

### **UNIDAD DE ANÁLISIS:**

AGUAS RESIDUALES DE LA ETAPA DE CURTIDO DE UNA EMPRESA DE CURTIEMBRE

**TIPO DE INVESTIGACIÓN:** EXPERIMENTAL / CUANTITATIVA / APLICATIVA

**TEMA OCDE:** INGENIERÍA DE PROCESOS



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO  
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA  
IX CICLO DE TESIS  
JURADO DE SUSTENTACIÓN DE TESIS**

**ACTA N° 101 DE SUSTENTACIÓN DE TESIS CON CICLO DE TESIS  
PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO QUÍMICO**

**LIBRO 01 FOLIO N° 102 ACTA N° 101 DE SUSTENTACIÓN DE TESIS CON CICLO DE TESIS  
PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO QUÍMICO**

A los 05 días del mes de noviembre del año 2022, siendo las 09:20 horas, se reunieron, en la sala meet: <https://meet.google.com/bpv-xvfd-mxu>, el JURADO DE SUSTENTACION DE TESIS para la obtención del TÍTULO profesional de Ingeniero Químico de la Facultad de Ingeniería Química, conformado por los siguientes docentes ordinarios de la Universidad Nacional del Callao:

<b>Ing. CARRASCO VENEGAS LUIS AMERICO</b>	PRESIDENTE
<b>Ing. ANGELES QUEIROLO CARLOS ERNESTO</b>	SECRETARIO
<b>Ing. RANGEL MORALES FABIO MANUEL</b>	VOCAL
<b>Ing. SUERO IQUIAPAZA POLICARPO AGATON</b>	ASESOR

Se dio inicio al acto de sustentación de la tesis de los bachilleres **AGUIRRE MITMA JOSE ANTONIO**, **JULCARIMA LAURA JOSH PETER** y **RAMOS AUCCASI CYNTHYA PAMELA** quienes habiendo cumplido con los requisitos para optar el Título Profesional de Ingeniero Químico, sustentan la tesis titulada **“REDUCCIÓN DEL CONTENIDO DE CROMO HEXAVALENTE POR ELECTROCOAGULACIÓN EN LAS AGUAS RESIDUALES DE UNA EMPRESA DE CURTIEMBRE”**, cumpliendo con la sustentación en acto público, de manera no presencial a través de la Plataforma Virtual, en cumplimiento de la declaración de emergencia adoptada por el Poder Ejecutivo para afrontar la pandemia del Covid-19, a través del D.S. N° 044-2020-PCM y lo dispuesto en el DU N° 026-2020 y en concordancia con la Resolución del Consejo Directivo N° 039-2020-SUNEDU-CD y la Resolución Viceministerial N° 085-2020-MINEDU, que aprueba las "Orientaciones para la continuidad del servicio educativo superior universitario";

Con el quórum reglamentario de ley, se dio inicio a la sustentación de conformidad con lo establecido por el Reglamento de Grados y Títulos vigente. Luego de la exposición, y la absolución de las preguntas formuladas por el Jurado de Sustentación y efectuadas las deliberaciones pertinentes, acordó: Dar por **APROBADO** con la escala de calificación cualitativa **MUY BUENO** y calificación cuantitativa **DIECISÉIS (16)**, la presente Tesis, conforme a lo dispuesto en el Art. 27 del Reglamento de Grados y Títulos de la UNAC, aprobado por Resolución de Consejo Universitario N° 099-2021-CU del 30 de junio de 2021.

Se dio por concluida la sustentación a las 09:55 horas del día 05 de noviembre del año en curso.

**Ing. CARRASCO VENEGAS LUIS AMERICO**  
**PRESIDENTE DE JURADO DE SUSTENTACIÓN**

**Ing. ANGELES QUEIROLO CARLOS ERNESTO**  
**SECRETARIO DE JURADO DE SUSTENTACIÓN**









**Ing. RANGEL MORALES FABIO MANUEL**  
**VOCAL DE JURADO DE SUSTENTACIÓN**

**Ing. SUERO IQUIAPAZA POLICARPO AGATON**  
**ASESOR DE JURADO DE SUSTENTACIÓN**

## Document Information

<b>Analyzed document</b>	TESIS FINAL RAMOS AUCCASI-JULCARIMA LAURA-AGUIRRE MITMA.pdf (D148721213)
<b>Submitted</b>	11/5/2022 12:03:00 AM
<b>Submitted by</b>	
<b>Submitter email</b>	fiq.investigacion@unac.edu.pe
<b>Similarity</b>	14%
<b>Analysis address</b>	fiq.investigacion.unac@analysis.arkund.com

## Sources included in the report

<b>SA</b>	<b>Universidad Nacional del Callao / 01 TESIS -RODAS PALOMINO ELIAS-ORTEGA VEGA JOSSELYN MILAGROS.pdf</b> Document 01 TESIS -RODAS PALOMINO ELIAS-ORTEGA VEGA JOSSELYN MILAGROS.pdf (D110015489) Submitted by: fiq.investigacion@unac.edu.pe Receiver: fiq.investigacion.unac@analysis.arkund.com		<b>4</b>
<b>SA</b>	<b>Universidad Nacional del Callao / TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA DE CURTIEMBRE MEDIANTE EL MÉTODO DE ELECTROCOAGULACIÓN ... DE LA CRUZ, INCA GOMEZ y SILVA SALAZAR.docx</b> Document TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA DE CURTIEMBRE MEDIANTE EL MÉTODO DE ELECTROCOAGULACIÓN ... DE LA CRUZ, INCA GOMEZ y SILVA SALAZAR.docx (D29659518) Submitted by: investigacion.fiq@unac.pe Receiver: investigacion.fiq.unac@analysis.arkund.com		<b>5</b>
<b>W</b>	URL: <a href="https://www.docsity.com/es/electrocoagulacion-de-cromo-trivalente-y-dbo/7461306/">https://www.docsity.com/es/electrocoagulacion-de-cromo-trivalente-y-dbo/7461306/</a> Fetched: 6/3/2021 6:47:38 AM		<b>9</b>
<b>SA</b>	<b>TESIS ANDRÉS ALTAMIRANO.docx</b> Document TESIS ANDRÉS ALTAMIRANO.docx (D54482000)		<b>11</b>
<b>W</b>	URL: <a href="https://sicex.com/blog/industria-del-cuero-en-colombia/">https://sicex.com/blog/industria-del-cuero-en-colombia/</a> Fetched: 11/5/2022 12:04:00 AM		<b>3</b>
<b>SA</b>	<b>Tesis Albert Gamboa y Linda Cerca 28.10.2021.pdf</b> Document Tesis Albert Gamboa y Linda Cerca 28.10.2021.pdf (D116618828)		<b>8</b>
<b>SA</b>	<b>bc5936e06a4b299da79446a1af83bcdb96de35fe.html</b> Document bc5936e06a4b299da79446a1af83bcdb96de35fe.html (D128495193)		<b>4</b>
<b>SA</b>	<b>Universidad Nacional del Callao / Tesis Posgrado con formato CORREGIDO.pdf</b> Document Tesis Posgrado con formato CORREGIDO.pdf (D106968778) Submitted by: fiq.posgrado@unac.edu.pe Receiver: fiq.posgrado.unac@analysis.arkund.com		<b>1</b>

## DEDICATORIA

A mis padres que siempre me apoyaron a formarme como ser humano y profesional, a mis familiares y amigos que siempre me alentaron a seguir superándome cada día más y a Dios por darme fuerzas para seguir adelante.

Cynthia Pamela Ramos Auccasi

A Dios por acompañarme en cada aspecto de mi vida, a mi papá que descansa en paz y mi mamá que gracias a su apoyo y palabras de aliento he podido dar este paso en mi carrera; a mis hermanos y profesores que me dieron la pauta para trazar mi vida profesional.

Josh Peter Julcarima Laura

Para mis padres, Martita y Víctor, quienes con su amor y dedicación me apoyaron para formarme como profesional y ser humano, y ahora desde el cielo, serán mi inspiración para continuar superándome día a día.

Jose Antonio Aguirre Mitma

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios en primer lugar por darnos la fortaleza necesaria para salir adelante en tiempos difíciles.

A nuestros padres por ser una pieza fundamental de motivación para completar esta investigación y a pesar de que algunos ya no estén presentes en esta tierra sus recuerdos de fuerza, valentía y amor vivirán en nuestros corazones mientras sigamos vivos.

A la Universidad Nacional del Callao por habernos acogido en sus aulas y vivir una de las mejores etapas de nuestras vidas estudiando la carrera que nos apasiona.

A nuestros asesores por su experiencia para guiarnos en esta anhelada etapa de nuestras vidas.

A nuestros maestros de cursos, por sus enseñanzas ya que muchos de ellos fueron más que mentores, amigos que siempre recordaremos.

# ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS .....	4
ÍNDICE DE FIGURAS .....	5
RESUMEN .....	6
ABSTRACT .....	7
INTRODUCCIÓN .....	8
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	9
1.1. Descripción de la realidad problemática .....	9
1.2. Formulación del problema .....	10
1.2.1. Problema general .....	10
1.2.2. Problemas específicos .....	10
1.3. Objetivos de la investigación .....	10
1.3.1. Objetivo general .....	10
1.3.2. Objetivo específico .....	10
1.4. Justificación .....	11
1.5. Delimitantes de la investigación .....	12
1.5.1. Teórico .....	12
1.5.2. Temporal .....	12
1.5.3. Espacial .....	12
II. MARCO TEÓRICO .....	13
2.1. Antecedentes .....	13
2.1.1. Antecedentes internacionales .....	13
2.1.2. Antecedentes nacionales .....	15
2.2. Bases Teóricas .....	16
2.2.1. Aguas residuales con metales pesados .....	16
2.2.2. Industria de la curtiembre .....	16
2.2.3. Contaminación por cromo .....	21
2.2.4. Técnicas de tratamiento de efluentes para la remoción del cromo .....	22
2.2.5. Proceso de electrocoagulación .....	24
2.3. Conceptual .....	30
2.3.1. Parámetros a evaluar en las aguas residuales .....	30



2.3.2. Factores que influyen en la electrocoagulación.....	31
2.4. Definición de términos básicos.....	33
III. HIPÓTESIS Y VARIABLES.....	35
3.1. Hipótesis.....	35
3.1.1. Operacionalización de variables.....	35
IV. METODOLOGÍA DEL PROYECTO.....	37
4.1. Diseño metodológico.....	37
4.2. Método de investigación.....	37
4.2.1. Etapa I: Toma de muestra y pretratamiento.....	38
4.2.2. Etapa II: Proceso de electrocoagulación.....	39
4.2.3. Etapa III: Medición del contenido de Cr <sup>+6</sup> mediante espectroscopía.....	39
4.3. Población y muestra.....	40
4.3.1. Población.....	40
4.3.2. Muestra.....	40
4.4. Lugar de estudio y periodo desarrollado.....	40
4.5. Técnicas e instrumentos para la recolección de la información.....	40
4.5.1. Toma de muestra.....	41
4.5.2. Pretratamiento de muestra inicial.....	41
4.5.3. Montaje del equipo experimental para la electrocoagulación.....	41
4.5.4. Procedimiento de electrocoagulación.....	44
4.5.5. Centrifugación de muestras finales.....	44
4.5.6. Medición de cromo hexavalente mediante espectrofotometría.....	45
4.6. Análisis y procesamiento de datos.....	45
4.7. Aspectos éticos en investigación.....	47
V. RESULTADOS.....	48
5.1. Resultados descriptivos.....	48
5.2. Resultados inferenciales.....	52
VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	63
6.1. Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados.....	63
6.1.1. Prueba de hipótesis.....	63
6.2. Contrastación de los resultados con otros estudios similares.....	64
VII. CONCLUSIONES.....	66

VIII. RECOMENDACIONES.....	67
IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	68
ANEXOS.....	71
1. Matriz de consistencia.....	71
2. Apariencia de la muestra inicial.....	72
3. Muestras tratadas a 2 A y 5 min, 10 min, 15 min y 20 min .....	72
4. Muestras tratadas a 4 A y 5 min, 10 min, 15 min y 20 min .....	73
5. Muestras tratadas a 6 A y 5 min, 10 min, 15 min y 20 min .....	73
6. Muestras tratadas a 8 A y 5 min, 10 min, 15 min y 20 min .....	74
7. Descripción del método espectrofométrico .....	74
8. Informe de ensayo de laboratorio acreditado por Inacal.....	77

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> Operacionalización de variables .....	36
<b>Tabla 2</b> Variables de la investigación .....	37
<b>Tabla 3</b> Diseño del esquema de investigación .....	38
<b>Tabla 4</b> Norma de referencia para análisis de cromo hexavalente.....	45
<b>Tabla 5</b> Análisis del contenido inicial de cromo hexavalente del agua residual de curtiembre.....	48
<b>Tabla 6</b> Concentración de Cr <sup>+6</sup> removido a 2 A .....	49
<b>Tabla 7</b> Concentración de Cr <sup>+6</sup> removido a 4 A.....	49
<b>Tabla 8</b> Concentración de Cr <sup>+6</sup> removido a 6 A .....	50
<b>Tabla 9</b> Concentración de Cr <sup>+6</sup> removido a 8 A .....	50
<b>Tabla 10</b> Rendimientos de remoción de Cr <sup>+6</sup> para cada tratamiento.....	51
<b>Tabla 11</b> Cuadro general de los tratamientos realizados (tiempo vs intensidad de corriente) .....	53
<b>Tabla 12</b> Prueba de normalidad de Cr <sup>+6</sup> removido en función al tiempo a 2, 4, 6 y 8 A .....	56
<b>Tabla 13</b> Correlaciones de Pearson para Cr <sup>+6</sup> removido en función del tiempo ...	57
<b>Tabla 14</b> Cuadro general de los tratamientos realizados (intensidad de corriente vs tiempo).....	58
<b>Tabla 15</b> Pruebas de normalidad de Cr <sup>+6</sup> removido en función a la intensidad de corriente a 5, 10, 15 y 20 minutos .....	60
<b>Tabla 16</b> Correlaciones de Rho de Spearman para Cr <sup>+6</sup> removido en función a la intensidad de corriente a 5,10, 15 y 20 minutos .....	61

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Etapas del proceso de producción del cuero y sus efluentes .....	18
<b>Figura 2</b> Reticulación lateral del sulfato de cromo con el colágeno .....	20
<b>Figura 3</b> Enlaces formados entre el cromo y el colorante .....	21
<b>Figura 4</b> Proceso básico de adsorción .....	23
<b>Figura 5</b> Proceso de coagulación - floculación .....	24
<b>Figura 6</b> Proceso de electrocoagulación .....	25
<b>Figura 7</b> Electrodisolución del metal en el ánodo .....	26
<b>Figura 8</b> Tipos de sistemas de electrocoagulación .....	28
<b>Figura 9</b> Pretratamiento de la muestra inicial .....	39
<b>Figura 10</b> Dimensiones del reactor batch .....	42
<b>Figura 11</b> Montaje experimental para la electrocoagulación .....	42
<b>Figura 12</b> Fuente de alimentación .....	43
<b>Figura 13</b> Multímetro RedLine Profesional .....	43
<b>Figura 14</b> Centrifugación de muestras finales .....	44
<b>Figura 15</b> Rendimiento de remoción de $\text{Cr}^{+6}$ vs tiempo de cada tratamiento .....	51
<b>Figura 16</b> Diagrama de dispersión de $\text{Cr}^{+6}$ removido vs tiempo (2 A) .....	54
<b>Figura 17</b> Diagrama de dispersión de $\text{Cr}^{+6}$ removido vs tiempo (4 A) .....	54
<b>Figura 18</b> Diagrama de dispersión de $\text{Cr}^{+6}$ removido vs tiempo (6 A) .....	55
<b>Figura 19</b> Diagrama de dispersión de $\text{Cr}^{+6}$ removido vs tiempo (8 A) .....	55
<b>Figura 20</b> Diagrama de dispersión de $\text{Cr}^{+6}$ removido vs intensidad de corriente (5 minutos) .....	58
<b>Figura 21</b> Diagrama de dispersión de $\text{Cr}^{+6}$ removido vs intensidad de corriente (10 minutos) .....	59
<b>Figura 22</b> Diagrama de dispersión de $\text{Cr}^{+6}$ removido vs intensidad de corriente (15 minutos) .....	59
<b>Figura 23</b> Diagrama de dispersión de $\text{Cr}^{+6}$ removido vs intensidad de corriente (20 minutos) .....	60

## RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue determinar la factibilidad del empleo del proceso de electrocoagulación en la reducción del contenido de cromo hexavalente ( $\text{Cr}^{+6}$ ) en las aguas residuales de una empresa de curtiembre y utilizando como variables la influencia de la variación del tiempo e intensidad de corriente. La metodología utilizada fue de tipo experimental a nivel de laboratorio en tres etapas y la medición del contenido de  $\text{Cr}^{+6}$  fue realizado mediante la técnica de espectrofotometría. Los resultados fueron: el contenido de  $\text{Cr}^{+6}$  del efluente fue 3.20 mg/L la cual se comparó con la normativa ambiental y se determinó que supera en más del 100 % el valor permitido. Se aplicó el método de electrocoagulación con seis placas de aluminio como electrodos y una fuente de poder de 40 amperios de capacidad para optimizar el rendimiento del proceso electrolítico. Las variables experimentales incluyen tiempos de operación (5 min, 10 min, 15 min y 20 min) e intensidades de corriente (2 A, 4 A, 6 A y 8 A).

Concluimos que el método de electrocoagulación es una técnica alternativa eficiente ya que el mejor resultado se obtuvo a 8 A y 20 minutos logrando hasta 89.706 % de remoción de  $\text{Cr}^{+6}$ .

**Palabras clave:** aguas residuales de curtiembre, cromo hexavalente, electrocoagulación.

## ABSTRACT

The objective of this research was to determine the feasibility of using the electrocoagulation process in reducing the content of hexavalent chromium ( $\text{Cr}^{+6}$ ) in the wastewater of a tannery company and using as variables the influence of the variation of time and amperage. The methodology used was experimental at the laboratory level in three stages and the measurement of the  $\text{Cr}^{+6}$  content was carried out using the spectrophotometric technique. The results were: the  $\text{Cr}^{+6}$  content of the effluent was 3.20 mg/L, which was compared with the environmental regulations and it was determined that it exceeds the permitted value by more than 100 %. The electrocoagulation method was applied with six aluminum plates as electrodes and a power source with a capacity of 40 amps to optimize the performance of the electrolytic process. Experimental variables include operating times (5 min, 10 min, 15 min, and 20 min) and amperages (2 A, 4 A, 6 A, and 8 A).

We conclude that the electrocoagulation method is an efficient alternative technique because the best result was obtained at 8 A and 20 minutes, achieving up to 89.706 % removal of  $\text{Cr}^{+6}$ .

**Keywords:** tannery wastewater, hexavalent chromium, electrocoagulation.

## INTRODUCCIÓN

Los residuos líquidos generados en la industria de la curtiembre representan una gran problemática para el país, esta industria emplea grandes volúmenes de agua para realizar el proceso de transformación de la piel animal a cuero, siendo estos efluentes un punto importante a tomar en cuenta con respecto al impacto ambiental que ocasionan en los recursos hídricos. Por ello se busca reducir este impacto ambiental mediante tecnologías modernas que permitan reducir los componentes tóxicos y nocivos de estos efluentes.

El  $\text{Cr}^{+6}$  es un componente tóxico conocido por ser cancerígeno cuando se entra en contacto directo con él, este componente tóxico forma parte de los efluentes vertidos por las curtiembres haciendo de esto un factor de riesgo para los habitantes cercanos a estas industrias y más aún pueden abarcar una mayor extensión dependiendo del sistema de alcantarillado del lugar (1). Teniendo esto en cuenta el uso de tecnologías alternativas suelen ser la mejor opción para tratar los diversos efluentes de las industrias.

La electrocoagulación es una de las tecnologías empleadas para tratar efluentes de las diversas industrias, ha logrado alcanzar un aprovechamiento comercial importante en el tratamiento puntual de algunos contaminantes. Esta técnica combina los principios de electrolisis y coagulación donde el coagulante es generado en la celda electroquímica debido a la reacción de oxidación del ánodo (2).

# I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

## 1.1. Descripción de la realidad problemática

El cuero y sus derivados se ubican entre los productos con mayor comercialización a nivel mundial, debido a la fuerte industrialización del material, ya que es exigido por muchas áreas comerciales, en su mayoría, ligados a la moda. El Centro de Comercio Internacional, estima que este negocio mundial supera los 80.000 millones de dólares cada año. La Unión Europea es responsable del 25 % de la producción de cuero a nivel mundial. Siendo Italia, el principal productor, exportador y a la vez consumidor, de este material y sus derivados; seguidamente de Alemania, Francia y España. En Latinoamérica, Brasil y Argentina destacan en este sector, con un número importante de empresas emergentes con gran competitividad en el mercado, asimismo, aproximadamente el 70 % de los cueros que producen, son exportados a China, Hong Kong, Vietnam, Italia y Estados Unidos (3).

En el Perú, existen empresas dedicadas a la industria de la curtiembre tanto formales como informales las cuales operan principalmente en la ciudad de Trujillo, Arequipa y Lima. Las pieles se obtienen principalmente del ganado bovino, porcino y ovino como subproducto de la manufactura cárnica (4).

A pesar del impacto económico que se genera en la industria textil también hay un impacto ambiental que se debe atender, ya que la producción de residuos tanto sólidos como líquidos son vertidos en los efluentes hídricos. Tal es así, que para procesar una tonelada de cuero se utilizan 500 kilos de agentes químicos de los cuales el 85 % de dichos productos se convierten en desechos residuales, los cuales contienen altos contenidos de materia orgánica (DBO o DQO) e inorgánica (DQO), sólidos suspendidos, sulfuro, cloruro, cromo, además de grasas constituyentes de la piel en concentraciones que alcanzan niveles tóxicos. (5)

De acuerdo con lo descrito líneas arriba, es importante que el sector curtiembre invierta en tecnologías modernas, con la finalidad de disminuir sus residuos



contaminantes, así como la extracción de los metales presentes en el agua (principalmente cromo hexavalente).

## **1.2. Formulación del problema**

### **1.2.1. Problema general**

¿Será factible reducir el contenido de cromo hexavalente en las aguas residuales en un proceso de curtido, mediante electrocoagulación?

### **1.2.2. Problemas específicos**

¿Cuál es el contenido de  $\text{Cr}^{+6}$  en el efluente de la etapa de curtido?

¿Cuál es el efecto de la variación del tiempo en el proceso de electrocoagulación para la remoción de  $\text{Cr}^{+6}$ ?

¿Cuál es el efecto de la variación de la intensidad de corriente en el proceso de electrocoagulación para la remoción de  $\text{Cr}^{+6}$ ?

## **1.3. Objetivos de la investigación**

### **1.3.1. Objetivo general**

Reducir el contenido de cromo hexavalente en las aguas residuales en un proceso de curtido, mediante electrocoagulación.

### **1.3.2. Objetivo específico**

Determinar el contenido de  $\text{Cr}^{+6}$  en el efluente de la etapa de curtido.

Determinar el efecto de la variación del tiempo en el proceso de electrocoagulación para la remoción de  $\text{Cr}^{+6}$ .

Determinar el efecto de la variación de la intensidad de corriente en el proceso de electrocoagulación para la remoción de  $\text{Cr}^{+6}$ .

#### **1.4. Justificación**

##### **Teórica**

La electroquímica estudia la transformación entre la energía eléctrica y la energía química y viceversa. Cuando se usa la electricidad para inducir una reacción química se denomina electrólisis. La electrocoagulación está dentro de la electrólisis y ésta, emplea electricidad para provocar reacciones redox y separar los contaminantes o los metales presentes en el agua. El sistema donde se realiza electrocoagulación se denomina celda electrolítica. La misma que consta de dos placas metálicas conectados a una fuente de poder. Las placas metálicas se denominan electrodos. El electrodo que se conecta al polo negativo de la fuente se llama cátodo y el conectado al positivo ánodo.

##### **Tecnológica**

La electrocoagulación es un método muy eficaz y simple para tratar agua contaminada de varios orígenes por sus diversos beneficios, incluyendo la compatibilidad ambiental, la versatilidad, el rendimiento, la seguridad y los bajos costes. Consiste básicamente en la producción de agentes coagulantes por electro-oxidación del ánodo de sacrificio. Esta tecnología es poco aplicada dentro de esta industria, consideramos que esta técnica podría utilizarse como una alternativa para reducir el impacto de  $\text{Cr}^{+6}$  en los efluentes.

##### **Legal**

Los desagües cuyas características físicas y químicas difieran de los de tipo doméstico, deberán sujetarse estrictamente a lo que establece el D.S. N° 021-2009 – VIVIENDA. Aprueban los valores máximos admisibles (VMA) de las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario. Para el caso del cromo hexavalente ( $\text{Cr}^{+6}$ ) el VMA es 0.5 mg/L y para el cromo total es 10 mg/L. Estos parámetros no pueden ser sobrepasados (6).

## **1.5. Delimitantes de la investigación**

### **1.5.1. Teórico**

La electrocoagulación es un proceso de aplicación de la electrólisis conjuntamente con los principios de coagulación y floculación. Consiste en el uso de la corriente eléctrica para generar coagulantes in situ, los cuales desestabilizan las partículas contaminantes formando flóculos que precipitan por acción de la gravedad.

### **1.5.2. Temporal**

Esta investigación se realizó en los meses de junio a setiembre del 2022.

### **1.5.3. Espacial**

El efluente se tomó de una empresa de curtiembre en San Juan de Lurigancho y las corridas experimentales se realizaron en los laboratorios de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Callao.

## II. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Antecedentes

#### 2.1.1. Antecedentes internacionales

En la investigación denominada “Evaluación de un proceso de electrocoagulación en un reactor tipo batch para la remoción de cromo hexavalente ( $\text{Cr}^{+6}$ ) con electrodos de aluminio - aluminio y de hierro - aluminio en condiciones de laboratorio” los autores realizaron ensayos variando el material de los electrodos (hierro y aluminio), las distancias entre electrodos de 5 mm, 10 mm, 15 mm y la variación de pH inicial (4, 6 y 8); todos los ensayos se llevaron a cabo con un tiempo de operación de 30 minutos, una agitación de 390 rpm para evitar la polarización de los electrodos y con un tiempo de sedimentación de 60 minutos aproximadamente. La evaluación de las eficiencias de remoción muestra que las condiciones óptimas para la remoción  $\text{Cr}^{+6}$  por electrocoagulación fueron con electrodos de aluminio, a una distancia entre electrodos de 5 mm y un pH inicial de 8. Finalmente el último experimento con una muestra proveniente de un efluente una curtiembre permite observar el comportamiento de remoción de  $\text{Cr}^{+6}$  a diferentes tiempos de residencia (10, 20, 30 y 40 min); obteniendo una máxima eficiencia de remoción del 99 % al finalizar los 40 minutos; debido a que el agua al tener mayor tiempo de contacto con los hidróxidos formados en el reactor, permitió la adsorción del  $\text{Cr}^{+6}$ , su desestabilización, la suspensión de partículas, el rompimiento de emulsiones y finalmente la formación de flóculos (7).

En el trabajo de investigación “Diseño de una planta de recuperación del sulfato de cromo (III) proveniente de las aguas del proceso del curtido de cuero, mediante electrocoagulación y reacción química”, tuvo como objetivo recuperar el sulfato de cromo de los efluentes residuales de la industria de curtido de pieles con dos métodos diferentes: electrocoagulación, precipitación química y acidificación. En el proceso de electrocoagulación se trataron los efluentes residuales a diferentes densidades de corriente (9, 30, 76  $\text{A}/\text{m}^2$ ) y tiempos de residencia (15, 30, 45 min).

Se obtuvieron recuperaciones de cromo de hasta 21,9 %. También se evaluó precipitación química como proceso alternativo usando NaOH y se redujo más del 99,3 % de la concentración de cromo inicial. Al sedimentar el precipitado de hidróxido de cromo ( $\text{Cr}(\text{OH})_3$ ) por un día se aumentó la recuperación a 99,99 %. Por la eficiencia se eligió al método de precipitación química. Finalmente se diseñó una planta de recuperación de sulfato de cromo (III) para un flujo de  $15 \text{ m}^3/\text{día}$ , que produce una cantidad de 243 kg/día (8).

La investigación “Tratamiento de agua residual industrial de curtiembre por medio de la electrocoagulación” nos muestra una recopilación e investigación de las características, avances y desarrollo de la electrocoagulación en el tratamiento de aguas residuales de curtiembres, y su aplicabilidad en otras industrias. En los últimos años este tratamiento ha cobrado relevancia y ha demostrado que el tratamiento de efluentes de curtiembres tiene una eficiencia de hasta el 90 % para la eliminación de contaminantes como cromo, fosfatos, turbidez, color, SST, SSV, etc. La eficiencia de este tratamiento es directamente proporcional a la densidad de corriente y tiempo de electrólisis, adicionalmente, todos estos avances son aplicados en industrias de transformación de lácteos, siderúrgicas y galvanizado, y en estas últimas ha sido eficiente para remover metales pesados como Ni, Pb y Zn (9).

En el trabajo de investigación denominado “Evaluación de la eficiencia de un sistema de electrocoagulación en los vertimientos de curtiembres en el sector de Villapinzón (Cundinamarca), se analizaron el vertimiento en el río Bogotá. Luego se procedió al diseño e implementación a escala laboratorio de un equipo de electrocoagulación para analizar éstas vertientes. Después de la implementación del sistema se obtienen los siguientes porcentajes de remoción: Cr (52,8 %), DQO (36 %), nitritos (99,6 %), nitratos (99,4 %), sulfatos (92,9 %) y fosfatos (99,1 %). De esta manera, se concluye que el sistema de electrocoagulación es una alternativa viable como tratamiento no convencional para el tratamiento de aguas residuales industriales de curtiembre (10).

### 2.1.2. Antecedentes nacionales

En el trabajo de investigación “Eficiencia y rentabilidad de la aplicación del tratamiento por electrocoagulación para la reducción del cromo hexavalente en las aguas residuales de Curtiembre, Arequipa, 2021”, hace un estudio de las aguas residuales de una curtiembre ubicada en Arequipa y se propone el método de electrocoagulación para la reducción  $\text{Cr}^{+6}$  como un método eficiente y rentable. De esta manera diseñan un método de electrocoagulación de cuatro etapas que logra reducir el  $\text{Cr}^{+6}$  de 0.87 mg/L hasta menos de 0.01 mg/L en tiempos de 15, 30 y 45 minutos, para un voltaje de 40 V constante (11).

En la investigación denominada “Eficiencia en la remoción del contenido de cromo III por electrocoagulación en las aguas residuales de curtiembre del parque industrial de Río Seco – Arequipa” (12), hacen uso del proceso de electrocoagulación para la remoción del contenido de cromo III encontrado en las aguas residuales de una curtiembre en Arequipa. Las variables experimentales incluyen tiempo de residencia (30 min, 50 min), voltaje (4 V, 8 V), concentración inicial de cromo III (200 mg/L, 300 mg/L) que permitieron lograr remociones cercanas al 100 % de cromo ( $\text{Cr}^{+3}$ ) en 30 min del proceso a un voltaje de 8 V con una concentración inicial de cromo III de 300 mg/L (12).

La siguiente investigación “Influencia del proceso de electrocoagulación en la remoción de cromo hexavalente ( $\text{Cr}^{+6}$ ) en soluciones acuosas a nivel de laboratorio en la Universidad Continental, 2019”, utiliza el proceso de electrocoagulación a nivel laboratorio empleando el reactor tipo batch, partiendo de una solución madre de dicromato de potasio, donde seguidamente se llevaron a cabo cuatro tratamientos, utilizando como voltaje eléctrico 10 V, 15 V, 20 V y 30 V. En cada tratamiento se halló la concentración del  $\text{Cr}^{+6}$  después de transcurrir 10 minutos, 20 minutos, 30 minutos y 40 minutos. Se alcanzó un 100 % de remoción en un tiempo de electrocoagulación de 40 minutos y con un voltaje eléctrico de 30 V siendo estos dos valores los óptimos para lograr una remoción completa de  $\text{Cr}^{+6}$  (13).

En la investigación “Remoción de cromo y demanda química de oxígeno de aguas residuales de curtiembre por electrocoagulación”, estudió la remoción de cromo III y demanda química de oxígeno (DQO) de muestras de aguas residuales de curtiduría por electrocoagulación (EC) en un reactor electroquímico de operación discontinua. La influencia de los tiempos (15 a 45 min), voltajes (5 a 10 V), diluciones (0 a 2) y sus interacciones en el proceso de EC fueron significativos. Durante el proceso de EC de las muestras se observó incrementos de pH, temperatura y disminuciones de la conductividad. La máxima remoción de cromo III (98 %) y DQO (48 %) fue obtenida con el tratamiento (45 min, 10 V y dilución de 2). Asimismo, los resultados experimentales permitieron desarrollar modelos matemáticos para la remoción de cromo III y DQO, respectivamente (14).

## **2.2. Bases teóricas**

### **2.2.1. Aguas residuales con metales pesados**

Las aguas residuales industriales son aquellas que resultan del desarrollo de un proceso productivo, incluyéndose a las provenientes de la actividad minera, agrícola, energética, agroindustrial, entre otras (15).

De todos los distintos efluentes industriales, causa gran preocupación aquellos generados por metales pesados tales como plomo, cobre, cromo, zinc, arsénico, níquel y cadmio, ya que estos no son fácilmente biodegradables llegando a ser algunos de ellos inclusive altamente tóxicos a bajas concentraciones. El tiempo de vida de estos metales suele ser infinito por lo que se han buscado tecnologías que permitan la remoción y posterior recuperación del metal en el agua. Estas tecnologías por lo general están basadas en los procesos de precipitación por hidróxidos, electrolisis, oxidación química, adsorción entre otros (7).

### **2.2.2. Industria de la curtiembre**

En la industria de la curtiembre, el curtido es un proceso de transformación de pieles de animales en cuero, como resultado de la estabilización de las fibras de colágeno

de la piel con agentes curtientes, mediante la formación de complejos tipo quelatos (10).

**Procesos de la curtiembre:** En el procesamiento de pieles animales, existen variaciones según sea el tipo de piel, la tecnología disponible y las características finales a conseguir en el cuero. Estas características determinan el tipo de emisiones y consumos y las consecuencias ambientales del proceso. El proceso de curtido se puede dividir en etapas principales como: ribera, curtido, tinturado y recurtido. Las etapas de ribera y curtido se realizan en grandes recipientes cilíndricos de madera llamados fulones. A estos recipientes se ingresan los cueros, el agua y los reactivos químicos necesarios. En la figura 1 (ver página 18) se muestran las etapas del proceso de producción del cuero y sus efluentes.

**Ribera:** Esta parte llamada ribera tiene operaciones como el remojo y/o lavado, pelambre, descarnado y dividido. Preparar la piel para el curtido es el objetivo de esta parte del proceso limpiándola y acondicionándola, además de asegurar la humedad requerida para los subsiguientes procesos (16). Los pasos se describen a continuación:

**Remojo:** En esta parte se tiene como objetivo humectar las fibras de la piel deshidratada en el menor tiempo que se permita debido a que se quiere evitar el crecimiento bacteriano y son estas últimas las que requieren agua para reproducirse (17).

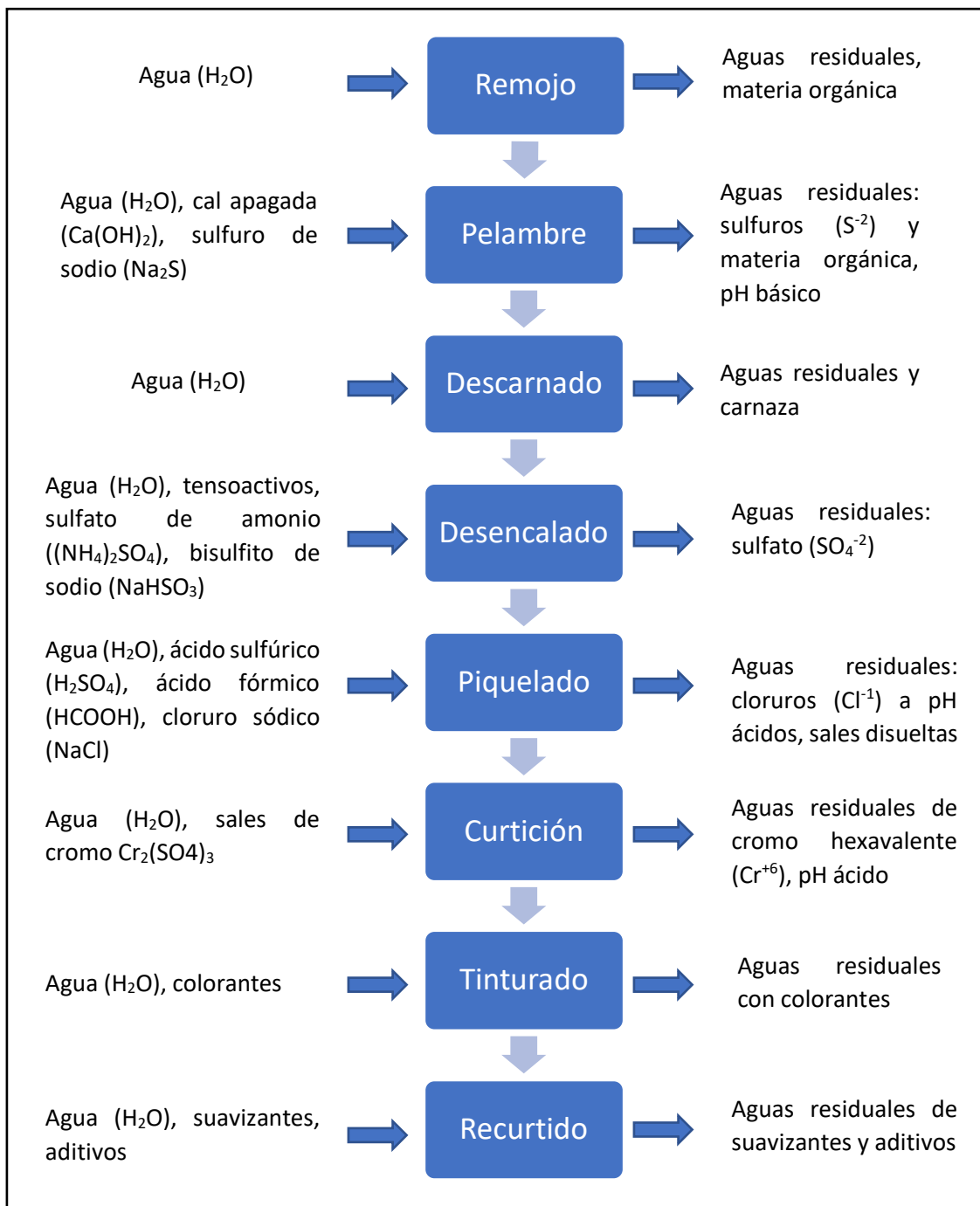
**Pelambre:** Consiste en depilar la piel eliminando el material hecho de queratina; y, por otra, encalar la piel a fin de hincharla en forma homogénea y prepararla para el curtido, removiendo al mismo tiempo algunas albúminas, mucopolisacáridos y grasas. De esta forma el pelambre proporciona una mayor apertura a la estructura dérmica, así como más puntos de unión para los curtientes en general. Convencionalmente, el pelambre se lleva a cabo con sulfuro de sodio ( $\text{Na}_2\text{S}$ ) y un álcali que, en la mayoría de los casos, es cal



apagada,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . El sulfuro es uno de los principales contaminantes en los efluentes líquidos, además destruye el pelo incrementando sustancialmente la carga orgánica, de ahí la importancia de reducir su consumo y consiguiente descarga (16).

**Figura 1**

*Etapas del proceso de producción del cuero y sus efluentes*



**Descarnado:** En esta etapa se elimina de la piel, mediante cuchillas, el tejido subcutáneo (restos de músculos y nervios), las grasas o cualquier otro elemento indeseado. El proceso de descarnado puede aplicarse antes o después del pelambre y encalado, y muchas veces no se aplica debido que en el proceso de encalado se le adiciona cal adicional para que sea por medio de esta que se elimine todo resto de piel o tejido subcutáneo (18).

**Curtido:** El curtido es un tratamiento químico para estabilizar el colágeno de la piel, haciéndolo resistente a la putrefacción y dándole una cierta resistencia a la temperatura. Los procedimientos de curtición son muy diversos, dependiendo de los tipos de piel y del destino que ésta tendrá. Entre estos procedimientos los más comunes son aquellos donde se utilizan sales de cromo y extractos vegetales (18). Los pasos se describen a continuación:

**Desencalado:** En esta etapa se busca eliminar la cal y los restos de sulfuro obtenidos en el baño de pelambre. En el primer lavado se añade tensoactivos, sulfato de amonio ((NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) y bisulfito de sodio (NaHSO<sub>3</sub>) eliminando de esta manera la cal y se logra el deshinchamiento de las pieles (17).

**Piquelado:** En el piquelado se busca acidular hasta un determinado pH antes de la curtición con cromo, se adicionan ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) y ácido fórmico (HCOOH), los cuales aportan protones para los enlaces de los grupos carboxílicos; junto a estos también se puede añadir cloruro sódico en el tratamiento. El pH es reducido aproximadamente a 3 siendo este factor el cual no permitirá que precipite el cromo en el proceso de curtición (17).

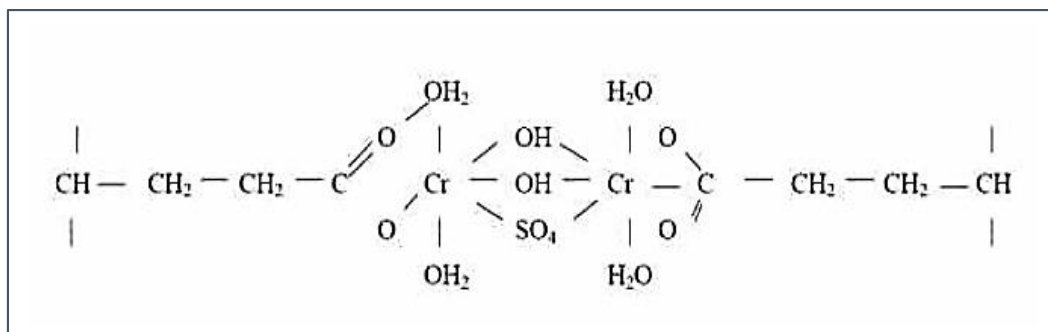
**Curtición:** Se utilizan diferentes agentes curtientes minerales o vegetales que penetran la estructura para estabilizar las fibras de colágeno; la producción mundial de cuero utiliza mayormente sales minerales a base de cromo (sulfato de cromo, sulfato básico de cromo Cr(OH)SO<sub>4</sub> u óxido de cromo (Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) que hidrolizan en medio acuoso para producir diversas especies dependiendo del pH (19). El colágeno de la piel se combina irreversiblemente con el agente

curtiente dando lugar a una reticulación de la estructura. Se obtiene una disminución en la capacidad de hinchamiento y un aumento en la temperatura de contracción que da lugar a la gelatinización (8).

La unión de las cadenas peptídicas en la estructura molecular del colágeno se expresa en su aumento de estabilidad. La figura 2 muestra la nueva estructura que toma el colágeno.

**Figura 2**

*Reticulación lateral del sulfato de cromo con el colágeno*



Fuente: Romero (2015)

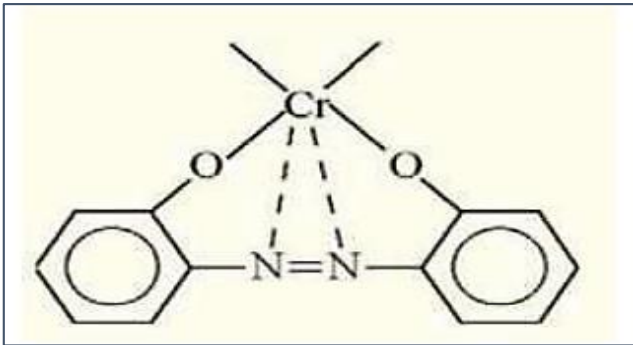
Finalmente se da el proceso de escurrido y rebajado o prensado en dos máquinas para remover el exceso de agua y darle un espesor uniforme.

**Tinturado:** Si bien al cuero hasta la etapa anterior ya hubo un cambio importante en sus propiedades aún falta darle características relacionadas a su estética como: color, brillo, finura de superficie. Entonces en el tinturado se tiene como objetivo dar color al cuero la cual puede ser de manera superficial o en todo el material. Se suelen usar soluciones acuosas, que contienen colorantes solubles, siendo este mismo uno de los métodos más usados.

Este método permite una distribución homogénea, pero depende del tipo de curtido. Se usan tintes que contienen anillos de benceno o nafténicos para el teñido del cuero, unidos por puentes dobles de nitrógeno, son los llamados grupos azoicos que se presenta en la figura 3 (ver página 21). (8)

**Figura 3**

*Enlaces formados entre el cromo y el colorante*



Fuente: Romero (2015)

**Recurtido:** Las características finales que requiere el cuero para la confección se dan en esta parte del proceso. En esta etapa se procede al recurtido, teñido, suavizado y pintado final del producto. La generación de residuos líquidos se da en bajas cantidades y la carga contaminante es controlable, pero presenta efluentes coloreados debido a los tintes utilizados y volúmenes grandes de residuos sólidos (12).

### 2.2.3. Contaminación por cromo

**Cromo:** Es un metal de color blanco plateado, duro y quebradizo, pero cuando se encuentra en su estado más puro suele ser relativamente suave y dúctil. Puede presentar estados de oxidación de +2, +3 y +6. El  $\text{Cr}^{+2}$  es muy inestable y se conoce muy poco sobre su hidrólisis, el  $\text{Cr}^{+3}$  es un elemento estable y esencial ya que sirve para el mantenimiento de la glucosa, lípidos y proteínas, mientras que el  $\text{Cr}^{+6}$  es altamente tóxico y se presenta en forma de aniones cromato ( $\text{CrO}_4^{-2}$  y  $\text{HCrO}_4^{-1}$ ) o dicromato ( $\text{Cr}_2\text{O}_7^{-2}$ ) (7).

**Cromo hexavalente:** El cromo hexavalente usualmente es de origen antropogénico, tiene un efecto altamente oxidante y facilidad para penetrar en membranas biológicas. (7) Respecto a esto la agencia de protección ambiental de Estados Unidos (EPA) advirtió que el cromo y sulfuros utilizados en la industria de curtición causan severos daños y enfermedades como la leucemia.

Los compuestos de  $\text{Cr}^{+6}$  son adsorbidos vía respiratorio, cutánea, o digestiva; penetran fácilmente en los eritrocitos y se combinan con la hemoglobina. La ingesta produce un cuadro gastrointestinal en forma de vómitos, dolores abdominales, diarreas y hemorragias intestinales (8).

**Impacto del cromo hexavalente en los ecosistemas:** En los ecosistemas acuáticos, el  $\text{Cr}^{+6}$  se presenta en forma soluble el cual es suficientemente estable como para ser transportado por el agua. Sin embargo, al contacto con sustancias orgánicas o que contengan ácido sulfúrico, azufre, sulfuro de hierro, amonio o nitrito; se reduce a  $\text{Cr}^{+3}$  el cual precipita rápidamente y se adsorbe en partículas en suspensión y sedimentos en el fondo. Así que las especies marinas que se alimentan del fondo terminan siendo perjudicadas (1). En los suelos, el  $\text{Cr}^{+6}$  se oxida en presencia de óxidos de Fe y Mg, en suelos frescos y húmedos (anaerobias) y condiciones levemente acidas. Por ejemplo, la práctica de depositar residuos en rellenos sanitarios con contenido de  $\text{Cr}^{+3}$  provenientes de curtiembres, junto con otros desechos industriales ácidos o desechos cloacales, generan condiciones acidas al descomponerse, pudiendo transformar el  $\text{Cr}^{+3}$  en  $\text{Cr}^{+6}$  (1).

#### 2.2.4. Técnicas de tratamiento de efluentes para la remoción del cromo

Existen diferentes métodos para la remoción de cromo hexavalente los cuales se mencionan a continuación:

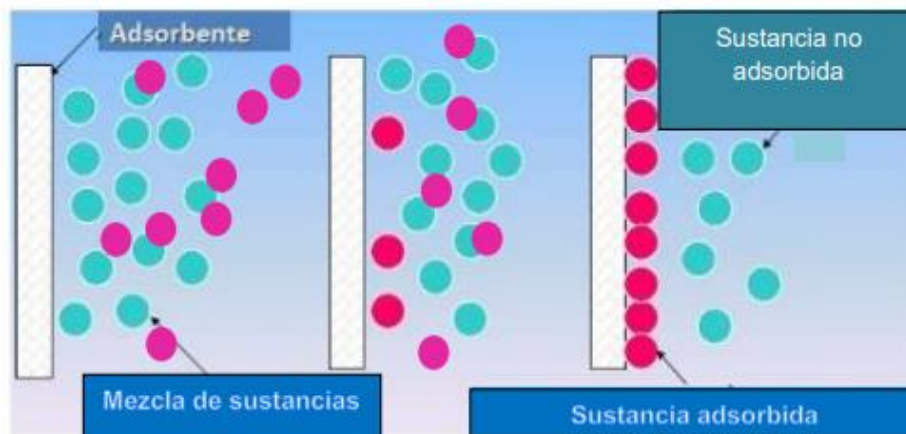
**Tratamiento biológico:** El tratamiento biológico consiste en la degradación biológica a través de la descomposición generada por microorganismos ya sean bacterias, hongos u otros. Se descubrió que la *Shewanella spp* es altamente aplicable en la remediación de  $\text{Cr}^{+6}$  y otros contaminantes metálicos, también algunas bacterias como el *Desulfomacculum* y la cepa *Pantoea agglomerans* sp-1 usan el  $\text{Cr}^{+6}$  como receptor de electrones para el crecimiento anaerobio, mientras que otras especies como el *Pseudomonas*, *Escherichia coli* y *Shewanella oneidensis* cepa MR-1, reducen el  $\text{Cr}^{+6}$  (20).

## Tratamientos químicos

**Adsorción:** Es un método que utiliza la transferencia de una molécula de un volumen de fluido a una superficie sólida debido a las fuerzas físicas o enlaces químicos. Existen estudios de adsorción de  $\text{Cr}^{+6}$  con materiales naturales como las cáscaras, almidón, quitina entre otros; de todos ellos, los más interesantes son los materiales carbonosos ya que son más efectivos en la remoción del  $\text{Cr}^{+6}$  debido a la reacción de intercambio con el carbonato de calcio (13). En la figura 4, se esquematiza el principio que rige la adsorción, aplicada a la separación de una mezcla constituida por dos sustancias.

**Figura 4**

*Proceso básico de adsorción*



Fuente: Corzo (2019)

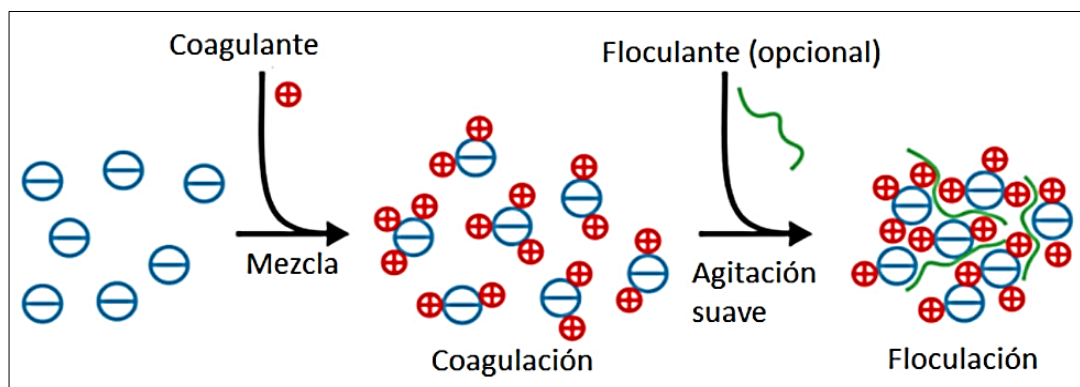
**Precipitación química:** Es un método en el que se eliminan iones metálicos solubles indeseables a través de la conversión a una forma insoluble. Esta técnica es comúnmente utilizada para la eliminación de metales pesados, fósforo y dureza. Este procedimiento puede ser precedido por reducción química, para cambiar las características de los iones metálicos que desean precipitarse. Para el caso del  $\text{Cr}^{+6}$  es importante evaluar la influencia de varios factores como concentración inicial del cromo, pH de la solución a tratar, dosificación del precipitante y determinar la influencia del tiempo de precipitación (13).

**Coagulación - floculación:** Consiste en la transformación de una sustancia soluble en otra insoluble mediante reacción química, y la floculación como fenómeno por el cual las partículas ya desestabilizadas chocan unas con otras para formar coágulos mayores. En esta técnica se emplean sales metálicas como coagulantes, entre las que se pueden mencionar: sulfato de aluminio, cloruro e hidróxidos férricos y cal hidratada (7).

En la figura 5 se observa la etapa de coagulación en la cual a través de un coagulante se neutralizan las cargas negativas en los sólidos no sedimentables, luego a través de la floculación se promueve la agregación y formación de flóculos, generalmente después de un floculante adecuado (13).

**Figura 5**

*Proceso de coagulación - floculación*



Fuente: Matelco (2022)

### 2.2.5. Proceso de electrocoagulación

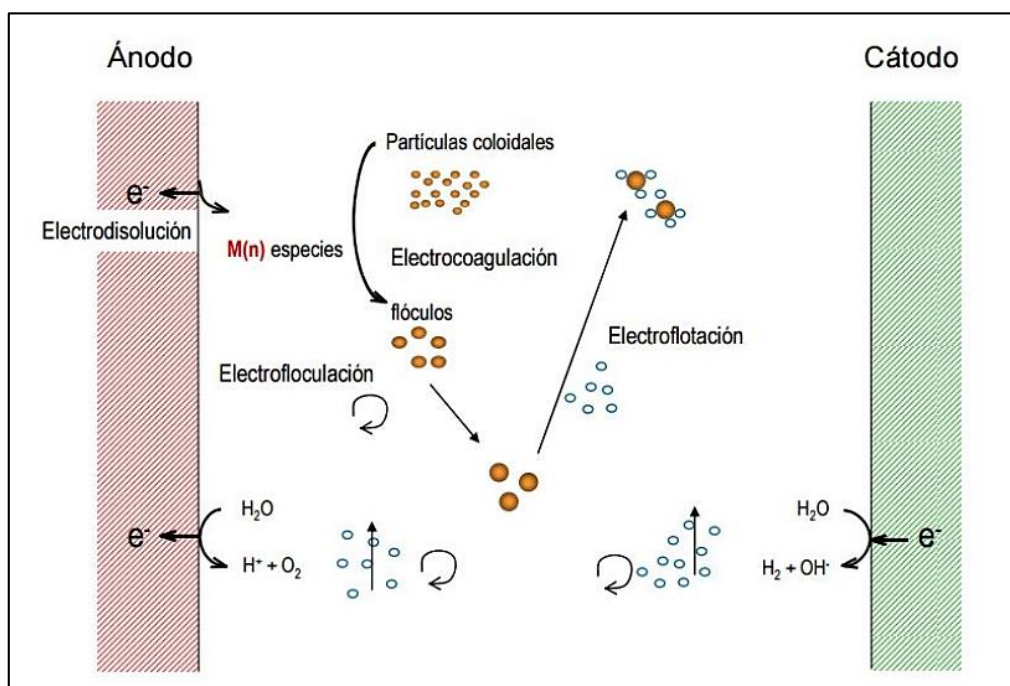
La electrocoagulación es un proceso que emplea una técnica que combina los principios de electrólisis y coagulación. El coagulante es generado en la celda electroquímica, debido a la reacción de oxidación del ánodo (ánodo sacrificio). En los tratamientos químicos de coagulación se añaden reactivos como el sulfato de aluminio para que se produzca la reacción, en el caso de la electrocoagulación se genera en la celda electrolítica (21).

En la electrocoagulación se producen partículas suspendidas en forma floculante que tienen una mayor estabilidad y son más fáciles de removerlas con cualquier método de separación como decantación o filtración (2).

La figura 6 muestra el proceso de electrocoagulación, las etapas y las reacciones presentes.

**Figura 6**

*Proceso de electrocoagulación*



Fuente: Martínez (2007)

En el proceso de electrocoagulación se dan tres etapas sucesivas:

- Formación del coagulante por disolución de iones metálicos provenientes del ánodo.
- Desestabilización de partículas y suspensiones coloidales.
- Agregación de la suspensión desestabilizada y formación de flóculos.

Además de las etapas ya mencionadas se produce la generación de oxígeno por oxidación del agua, cerca del electrodo que hace la función de ánodo. La reacción de generación de oxígeno se muestra en la ecuación 1:





En el electrodo que hace la función de cátodo se dan las reacciones de reducción del agua para formar hidrógeno e iones hidroxilo que son atraídos hacia el ánodo. La reacción de generación del hidrógeno se muestra en la ecuación 2:



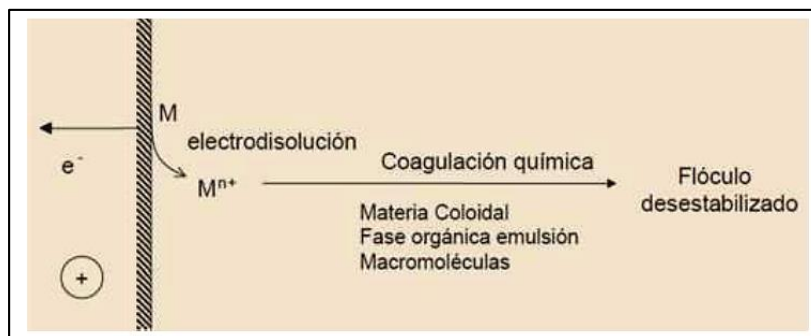
Debido a las reacciones se genera un perfil de pH dentro de la celda electrolítica, que provoca que se produzcan nuevas especies. Estas nuevas especies no solo dependen de la naturaleza del electrodo, sino también de las características del agua residual a tratar (22).

La figura 7 muestra la electrodisolución del metal en el ánodo. El metal con valencia positiva se disuelve en el efluente, se combina con iones (OH<sup>-</sup>) y forma hidróxidos. Cuando las cargas se neutralizan se produce coagulación química, y forma coágulos que atrapan eléctricamente los contaminantes.

**Aplicación de la electrocoagulación a la eliminación de Cr<sup>+6</sup> con ánodos de Aluminio:** A continuación, se detallan las reacciones químicas y electroquímicas que tienen lugar en un reactor de electrocoagulación para el caso específico de la eliminación de Cr<sup>+6</sup> usando electrodos de aluminio:

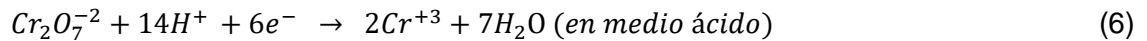
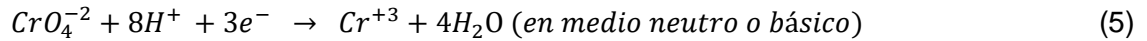
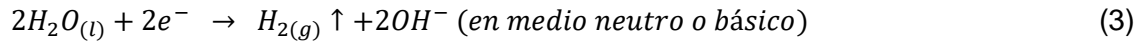
**Figura 7**

*Electrodisolución del metal en el ánodo*



Fuente: Martínez (2007)

**Reacciones en el cátodo:** En la superficie catódica del electrodo, se puede producir la generación de hidrógeno y la reducción del  $Cr^{+6}$ :



**Reacciones en el ánodo:** El ánodo de aluminio metálico se oxida hasta alcanzar la valencia +3 y ceder 3 electrones como se muestra en la ecuación 7:



El  $Al^{+3}$  reacciona con el agua para formar el hidróxido de aluminio ( $Al(OH)_3$ ) y formar hidrógeno con valencia +1. La reacción está dada por la ecuación:



El mecanismo de desestabilización de los contaminantes, la suspensión de partículas y la ruptura de las emulsiones que tienen lugar en un reactor de electrocoagulación se puede resumir de la siguiente manera:

- Compresión de la doble capa difusa alrededor de las especies cargadas por las interacciones de iones generados por la oxidación del ánodo de sacrificio (13).
- Neutralización de la carga de las especies iónicas presentes en las aguas residuales por contra iones generados por la disolución electroquímica del ánodo de sacrificio. Estos iones contrarios reducen la reacción electrostática entre partículas en la medida en que predomina la atracción de Van der Waals, lo que provoca la coagulación (13).
- El flóculo se forma como resultado de la coagulación y crea una capa de lodo. El agua también se electroliza en una reacción paralela, produciendo

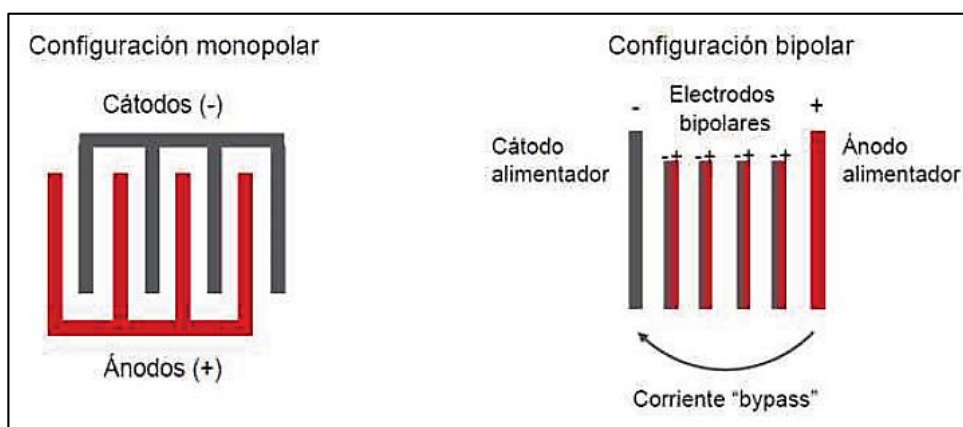
pequeñas burbujas de oxígeno en el ánodo e hidrógeno en el cátodo. Estas burbujas se adhieren a las partículas floculadas y las hacen más ligeras para flotar a la superficie a través de la flotabilidad natural (13).

Se debe tener en cuenta que la pasivación es la formación de una capa inerte sobre la superficie del metal, que impide que se den las reacciones y para evitar este problema se cambia la polaridad de los electrodos periódicamente. Finalmente es necesario limpiar los electrodos para remover la capa formada (23).

**Tipos de sistemas de electrocoagulación:** Existen dos tipos de reactores: batch o continuo. En un reactor tipo batch se coloca el agua residual a tratar y se conectan los electrodos. En un reactor continuo el agua residual fluye a una velocidad constante desde un tanque elevado. La selección del sistema depende del agua residual, características y cantidades. El sistema tipo batch es el más simple y de bajo costo en comparación con el sistema continuo (2). La figura 8 muestra dos configuraciones para conectar los electrodos: monopolar y bipolar.

**Figura 8**

*Tipos de sistemas de electrocoagulación*



Fuente: Aguilar & Palomino (2018)

**Ventajas de la electrocoagulación:** Las principales ventajas del proceso de electrocoagulación son:

- Requiere una menor superficie comparada con otros tratamientos convencionales, ya que solo necesita de un equipo compacto.
- Requiere de equipos simples y de fácil operación.
- El método es de fácil operación y no requiere de personal especializado.

**Desventajas de la electrocoagulación:** Las principales desventajas de esta técnica son:

- Es necesario reponer los electrodos de sacrificio cada cierto tiempo dependiendo del voltaje aplicado a los mismo, si el voltaje es elevado el desgaste es mayor. El elemento del cual está formado el ánodo de sacrificio se encuentra en el agua tratada.
- El óxido formado en el ánodo formará una capa que evitará que luego se produzcan procesos de oxidación-reducción, reduciendo su eficiencia.

### **Aplicaciones de la electrocoagulación**

***Efluentes de curtiembres:*** En las investigaciones y trabajos a nivel nacional e internacional vienen utilizando esta técnica en aguas que provienen del proceso de pelambre y utilizando ánodos y cátodos de acero inoxidable, los resultados obtenidos corresponden a una reducción del 46 % de demanda química de oxígeno (DQO) y remoción de sulfuro del 90 % (24).

***Efluentes de industrias galvánicas:*** Los estudios realizados con aguas residuales de la industria galvánica, mediante técnicas de electrocoagulación dan como resultado una remoción de cromo (Cr) del 51,65 %, níquel (Ni) 18,09 %, plomo (Pb) del 50.00 % y zinc (Zn) del 47,37 % (25).

## 2.3. Conceptual

### 2.3.1. Parámetros a evaluar en las aguas residuales

Al cuantificar los parámetros y compararlo con la normativa ambiental se puede concluir qué factores son los más críticos. Los parámetros más importantes en el control de aguas residuales se describen a continuación:

**Color:** El color del agua se debe a muchos factores, entre ellos compuestos metálicos, sólidos en suspensión, colorantes entre otros. Los colorantes promueven una condición anaeróbica, al bloquear la luz solar en aguas naturales, aumentando su turbidez y reduciendo la concentración de oxígeno disuelto y actividad fotosintética de las plantas acuáticas; perjudicando directamente la vida acuática (26). Las aguas residuales del proceso de curtido son del color azul verdoso debido al sulfato de cromo utilizado.

**Demanda química de oxígeno (DQO):** Se expresa en mg/L o ppm. La demanda química de oxígeno (DQO) se puede entender como la cantidad de sustancia susceptibles a ser oxidadas por un agente químico oxidante fuerte y que están disueltas en una muestra de 1 litro de agua residual (27).

**El pH:** Representa la medida de la concentración de los iones  $H^+$  presentes en el agua, expresada como el logaritmo negativo de la concentración molar del ion hidrógeno. Es uno de los parámetros más utilizados para la caracterización de aguas. Los efluentes del proceso de curtido tienen un carácter ácido de 3,5 a 3,9 (8).

**Sólidos:** Se clasifican de acuerdo al tamaño de los componentes, así tenemos: sólidos disueltos, coloidales y suspendidos. Los sólidos disueltos tienen un tamaño menor a  $10^{-9}$  m, los mismos que pueden tener origen orgánico (animal o vegetal) e inorgánico como el cloruro de sodio (NaCl), carbonato de calcio ( $CaCO_3$ ), etc. Las partículas coloidales tienen un tamaño entre  $10^{-9}$  y  $10^{-6}$  m,

tienen una densidad parecida a la del agua y una carga eléctrica negativa. Los sólidos suspendidos tienen un tamaño mayor que va de micrómetros a metros (8).

**Dureza:** Está dada por la suma de la concentración de los iones calcio y magnesio presentes en el agua. De esta manera se habla de una dureza cálcica y magnésica, respectivamente para cada ion. La alta dureza favorece el proceso de incrustación en los conductos, tuberías y accesorios. (8)

### 2.3.2. Factores que influyen en la electrocoagulación

Los factores a considerar en el proceso de electrocoagulación para realizar ensayos experimentales y posteriores diseños son: densidad de corriente, pH, distribución de los electrodos, tipos de electrodos, tiempo de operación, área superficial, entre otros.

**Densidad de corriente:** La eficiencia en la remoción y el consumo de energía se incrementan con el aumento en la densidad de corriente. Para algunas conductividades del medio acuoso el consumo de energía se incrementa proporcionalmente con los aumentos de conductividad, lo que conlleva a un consumo mayor de energía. Para altos consumos de energía se presentan pérdidas por la transformación de energía eléctrica en calórica, produciéndose un aumento en la temperatura del medio acuoso (28). El suministro de corriente determina la cantidad de iones  $Fe^{+3}$  o  $Al^{+3}$  liberados al efluente. La ecuación 9 muestra la relación matemática:

$$i = \frac{I}{A} \quad (9)$$

Donde:

i: densidad de corriente ( $A/m^2$ )

I: intensidad de corriente (A)

A: área total de la celda ( $m^2$ )

A mayor densidad de corriente ( $i$ ) mayor intensidad de corriente ( $I$ ), y aumentan los costos de operación. Al aumentar la densidad de corriente se produce un calentamiento en el agua residual tratada, que representa una pérdida de energía. Por tal razón es necesario obtener una densidad óptima para reducir los costos al mínimo y la remoción al máximo.

**Efecto del pH:** Un pH adecuado favorece en la solubilidad del metal y formar el hidróxido. Si el hidróxido metálico no se forma, el proceso de coagulación no se da. Para aguas de carácter ácidas el pH normalmente sube, debido a la generación de hidrógeno que se da en el cátodo. Para aguas residuales de naturaleza alcalina el pH puede subir o bajar dependiendo del contaminante presente (29). Los resultados son mejores mientras el pH sea el adecuado según el agua residual a tratar. Por ejemplo, para la remoción de arsénico el pH de trabajo está entre 6 - 8, mientras que para aguas que contengan cromo los valores de pH serán de 7 - 9 (2).

**Distribución espacial de los electrodos:** La distancia de separación de los electrodos puede variar en un rango de 0.2 cm a 3 cm, es decir el espacio depende de si es continuo o discontinuo el sistema de electrocoagulación. La separación de los electrodos está relacionada directamente con el voltaje a aplicar en la celda, ya que esta depende de la conductividad, corriente y el área de los electrodos (30).

**Tipos de electrodos:** El material del electrodo es importante en el proceso, ya que de este dependen las reacciones que se den en el reactor electrolítico. Los electrodos deben tener resistencia química y buenas propiedades electroquímicas que favorezcan las reacciones. Los materiales con potenciales estándar de reducción elevados son los más utilizados, como el hierro, aluminio, cobre y acero inoxidable. Los electrodos modernos son fabricados con titanio con una capa de óxidos de metales nobles. Por otro lado, la fuente de poder es de corriente continua, transformando la corriente alterna en continua, dotada de controles de voltaje (V) y amperaje (A), los cuales pueden ser regulados (30).

**Tiempo de operación:** El tiempo de operación aumenta la eficiencia del proceso. y mejora la remoción de los contaminantes. Al aumentar el tiempo de operación, favorece la formación de flóculos dentro de la celda electrolítica. La generación de burbujas de hidrógeno es mayor al aumentar el tiempo de operación y esto ayuda a la remoción.

**Área superficial:** El área superficial de los electrodos en contacto con el agua residual a tratar tiene una relación directa con la eficiencia del proceso. Al aumentar el área superficial aumenta la eficiencia (27).

### 2.3.3. Determinación del rendimiento de la electrocoagulación

La eficacia de la eliminación del  $Cr^{+6}$  por electrocoagulación se evaluará mediante la determinación de la concentración  $Cr^{+6}$  inicial y final.

$$\%R = \frac{(Cr^{+6})_0 - (Cr^{+6})_f}{(Cr^{+6})_0} * 100\% \quad (10)$$

Donde:

$(Cr^{+6})_0$  es la concentración inicial de  $Cr^{+6}$ .

$(Cr^{+6})_f$  es la concentración final de  $Cr^{+6}$  luego del proceso de electrocoagulación.

## 2.4. Definición de términos básicos

**Agente coagulante:** Son agentes que provocan la desestabilización de un coloide producida por la eliminación de las dobles capas eléctricas que rodean a todas las partículas coloidales, con la formación de núcleos microscópicos.

**Celda electrolítica:** Una celda electroquímica es un dispositivo capaz de obtener energía eléctrica a partir de reacciones químicas o producir reacciones químicas a través de la introducción de energía eléctrica, cuando se esté cargando la celda



**Curtiembre:** Lugar donde se realiza el curtido o lo que es lo mismo el proceso mediante el cual las pieles de diversos animales son convertidas en cuero.

**Electrocoagulación:** Proceso electroquímico en el que, a partir de compuestos procedentes de la disolución de un ánodo, se agrupa la materia coloidal existente en un agua residual, posibilitando su conversión en sólidos suspendidos, y su separación del agua mediante técnicas convencionales de separación sólido/líquido tales como la decantación, flotación y filtración.

**Electrodos:** Un electrodo en una celda electroquímica se refiere a cualquiera de los dos conceptos, sea ánodo o cátodo. El ánodo es definido como el electrodo en el cual los electrones salen de la celda y ocurre la oxidación, y el cátodo es definido como el electrodo en el cual los electrones entran a la celda y ocurre la reducción.

**Electrolito:** Se denomina electrolito a una sustancia que contiene aniones y cationes y que por lo tanto es capaz de conducir la corriente eléctrica. Por lo general son líquidos que contienen iones en solución, pero también existen electrolitos sólidos y fundidos.

**Fulones:** También llamado tambor o bombo, es donde se realiza las reacciones en el proceso de curtición, tiene forma de un cilindro echado el cual al girar en su eje permite las reacciones.

### III. HIPÓTESIS Y VARIABLES

#### 3.1. Hipótesis

##### **Hipótesis general**

Mediante el tratamiento de las aguas residuales en la etapa de curtido por electrocoagulación se logrará más del 80 % de reducción de  $\text{Cr}^{+6}$ .

##### **Hipótesis específicas**

El contenido de  $\text{Cr}^{+6}$  en el efluente supera los valores máximos admisibles según la normatividad vigente.

El efecto de la variación del tiempo influye positivamente en el proceso de electrocoagulación.

El efecto de la variación de la intensidad de corriente influye positivamente en el proceso de electrocoagulación.

#### 3.1.1. Operacionalización de variables

##### **Definición conceptual y operacionalización de variables**

###### ***Variables independientes***

X = Electrocoagulación en las aguas residuales

La electrocoagulación es una tecnología que utiliza el paso de la corriente eléctrica a través de un medio acuoso para la desestabilización de cargas de partículas contaminantes, en este caso se usa para la reducción del cromo hexavalente en las aguas residuales de la etapa de curtido.

###### ***Variables dependientes***

Y= Reducción del contenido de  $\text{Cr}^{+6}$

Evaluación del método empleado para tratar el efluente de estudio cuyas aguas contaminadas provienen de la etapa de curtido, las cuales generalmente contienen sales de cromo que ayudan a estabilizar la composición orgánica y evitar la descomposición del cuero.

La tabla 1 presenta la definición conceptual y operacionalización de las variables de operación.

**Tabla 1**

*Operacionalización de variables*

VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DIMENSIONES	INDICADORES	ÍNDICE	MÉTODO Y TÉCNICA
Variables independientes	La electrocoagulación es una tecnología que utiliza el paso de la corriente eléctrica a través de un medio acuoso para la desestabilización de cargas de partículas contaminantes, en este caso se usa para la reducción del cromo hexavalente en las aguas residuales de la etapa de curtido.	Intensidad de corriente	Amperios	A	Medido por multímetro
<b>X = Electrocoagulación en las aguas residuales</b>		Tiempo de operación	Minutos	min	Medido por cronómetro
Variables dependientes	Evaluación del método empleado para tratar el efluente de estudio cuyas aguas contaminadas provienen de la etapa de curtido, las cuales generalmente contienen sales de cromo que ayudan a estabilizar la composición orgánica y evitar la descomposición del cuero.	Contenido de Cr <sup>+6</sup> en aguas residuales	Concentración de Cr <sup>+6</sup>	ppm	Espectrofotometría
<b>Y = Reducción del contenido de cromo hexavalente</b>			% de remoción	%	Corridas experimentales

## IV. METODOLOGÍA DEL PROYECTO

### 4.1. Diseño metodológico

La presente investigación se clasifica según su naturaleza como tecnológica, porque se va a desarrollar una técnica poco usada en la industria de la curtiembre. Por su finalidad es de tipo exploratorio, porque la electrocoagulación es un método muy poco usado en la industria de la curtiembre, además de obtener los parámetros para la viabilidad del proceso. Por el diseño interpretativo de la investigación es experimental porque para el estudio de las variables se realizará la observación, registro y su interpretación. Por el análisis interpretativo de las variables es cuantitativo por la medición de la concentración del cromo hexavalente y longitudinal debido a que el estudio de las variables se hace a lo largo del tiempo en forma progresiva.

### 4.2. Método de investigación

El diseño experimental presenta de 2 factores y 4 niveles con 2 repeticiones cada uno tal y como se muestra en la tabla 2.

**Tabla 2**

*Variables de la investigación*

<b>Variables</b>	<b>Factores</b>	<b>Niveles</b>
<b>Independiente</b>	Tiempo (min)	5, 10, 15, 20
	Intensidad de corriente (A)	2, 4, 6, 8
<b>Dependiente</b>	% de remoción de Cr <sup>+6</sup>	-

En total se realizó 4 corridas experimentales a distintas intensidades de corriente (2 A, 4 A, 6 A y 8 A), tomando muestras a distintos tiempos después de iniciada la electrocoagulación (5 min, 10 min, 15 min y 20 min), todo ello se realizó por duplicado para un mejor análisis de los resultados. El esquema de investigación se detalla en la tabla 3 para un mejor entendimiento del proceso experimental.

**Tabla 3***Diseño del esquema de investigación*

<b>Corrida base</b>	<b>Intensidad de corriente (A)</b>	<b>Tiempo (min)</b>	<b>Concentración Cr<sup>+6</sup> (ppm)</b>
1	2	5	C <sub>1</sub>
1	2	10	C <sub>2</sub>
1	2	15	C <sub>3</sub>
1	2	20	C <sub>4</sub>
2	4	5	C <sub>5</sub>
2	4	10	C <sub>6</sub>
2	4	15	C <sub>7</sub>
2	4	20	C <sub>8</sub>
3	6	5	C <sub>9</sub>
3	6	10	C <sub>10</sub>
3	6	15	C <sub>11</sub>
3	6	20	C <sub>12</sub>
4	8	5	C <sub>13</sub>
4	8	10	C <sub>14</sub>
4	8	15	C <sub>15</sub>
4	8	20	C <sub>16</sub>

#### **4.2.1. Etapa I: Toma de muestra y pretratamiento**

Las tomas de muestras se realizaron en la etapa de curtido de los lotes recién terminados para un día de producción, estos fueron almacenados a una temperatura de 5 °C. Se realizaron como pretratamiento la regulación del pH de las muestras a 7 y la filtración para separar las partículas sólidas de la solución. En la figura 9 (ver página 39) se observa el pretratamiento de filtración.

## Figura 9

*Pretratamiento de la muestra inicial*



### 4.2.2. Etapa II: Proceso de electrocoagulación

Se procesaron 3.4 litros de muestra por cada corrida experimental, con este volumen se realizó la electrocoagulación por un total de 20 minutos. Por cada corrida experimental se tomaron cuatro muestras usando una pipeta en la zona de reacción a los 5 min, 10 min, 15 min y 20 min después de iniciada la electrocoagulación a una intensidad de corriente de 2 A. De la misma manera se hizo el mismo procedimiento con 4 A, 6 A y 8 A. Todo esto se realizó en un equipo batch diseñado para la electrocoagulación y en total se usaron 13.6 litros de muestra.

### 4.2.3. Etapa III: Medición del contenido de $\text{Cr}^{+6}$ mediante espectroscopía

Las muestras obtenidas luego del tratamiento de electrocoagulación fueron llevadas a un laboratorio externo para el análisis de la concentración por espectrofotometría.

### **4.3. Población y muestra**

#### **4.3.1. Población**

La población está determinada por las aguas residuales del proceso de curtido.

#### **4.3.2. Muestra**

La muestra fue extraída de los fulones de la etapa de curtido, tomando como base un día de jornada laboral y recolectando cinco litros de muestra por cada lote terminado. En total se obtuvieron veinte litros de muestra.

El tamaño de muestra a procesar queda determinado por la capacidad de nuestro equipo batch diseñado para la electrocoagulación. Por cada corrida experimental de 20 minutos se usó 3.4 litros y se trabajó con cuatro intensidades de corriente (2 A, 4 A, 6 A y 8 A) por lo tanto se usaron en total 13.6 litros de la muestra.

### **4.4. Lugar de estudio y periodo desarrollado**

Las pruebas experimentales de la presente investigación se realizaron en los laboratorios de la Universidad Nacional del Callao desde el 29 de agosto al 9 de setiembre del 2022 y el análisis de muestras fueron realizadas en el laboratorio R-LAB S.A.C desde el 21 al 29 de setiembre del 2022.

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

El trabajo documental estuvo centrado en la revisión de libros, revistas, papers e investigaciones con el fin de encontrar antecedentes teóricos y metodológicos que tengan relación con nuestra investigación. De igual manera, también se utilizaron las informaciones obtenidas a través de internet.

Con respecto a las técnicas para la recolección de datos durante el proceso experimental, se detalla según lo siguiente:

#### 4.5.1. Toma de muestra

Se realizó la toma de muestra del agua residual de la etapa de curtido, asimismo éstas se realizaron tomando cinco litros de muestra del fulón o botal por cada lote terminado para un día de producción. Así, se recolectaron 20 litros de muestra las cuales fueron trasladadas en dos galones de 10 litros.

#### 4.5.2. Pretratamiento de muestra inicial

Se procede a filtrar la muestra para separar las partículas sólidas de la solución, además de la materia orgánica proveniente de las pieles y se reguló el pH hasta 7 para un mejor acondicionamiento de las reacciones en el proceso.

#### 4.5.3. Montaje del equipo experimental para la electrocoagulación

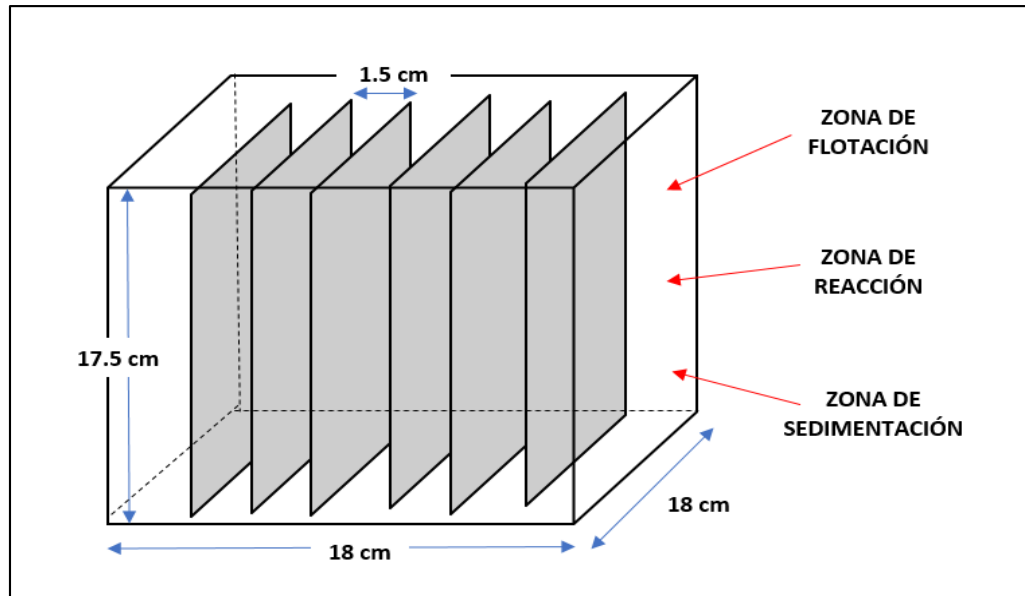
**Reactor batch:** El reactor o celda de electrocoagulación utilizado fue construido de polipropileno transparente, presenta una forma cubica de 18 cm de largo por 17.5 cm de alto por 18 cm de ancho, en la parte superior se instalaron ranuras para colocar los 6 electrodos, los cuales estuvieron a una distancia de 1.5 cm del fondo de la celda. El reactor fue diseñado tomando en cuenta la generación de lodos, para ello la celda consto de tres zonas, en la zona del fondo llamada zona de sedimentación (1/4 del volumen total de la celda) estuvo destinada para que los lodos precipitaran, es decir los más densos, la zona del medio o zona de reacción (2/4 del volumen total de la celda) estuvo destinada para los electrodos y para la reacción o electrocoagulación en sí y finalmente la zona de superior o zona de flotación (1/4 del volumen total de la celda) estuvo destinada para los lodos menos densos o las espumas generadas por la electrocoagulación (13). El volumen de operación de la celda es de 3.4 L. Se utilizaron 6 placas o electrodos de material aluminio con dimensiones de 12.5 cm de ancho por 14.5 cm de largo, pero cabe precisar que el área mojada utilizada fue de 12.5 cm de ancho por



11 cm de largo, es decir  $137.5 \text{ cm}^2$ . La ilustración del reactor batch se presenta en la figura 10.

**Figura 10**

*Dimensiones del reactor batch*



En la figura 11 se muestra el montaje experimental para el proceso de electrocoagulación.

**Figura 11**

*Montaje experimental para la electrocoagulación*



**Fuente de alimentación:** Es una fuente regulada de corriente continua (DC) de la marca Goldsource, con un rango de intensidad de corriente de 0 a 40 amperios y un voltaje de operación de hasta 2 V. En la figura 12 se muestra la fuente de alimentación utilizada.

**Figura 12**

*Fuente de alimentación*



**Multímetro:** El multímetro utilizado es de la marca RedLine Profesional PM2016A que soporta un máximo de 600 voltios y 20 amperios. En la figura 13 se muestra el multímetro utilizado para la experiencia.

**Figura 13**

*Multímetro RedLine Profesional*



#### 4.5.4. Procedimiento de electrocoagulación

Se procesó 3.4 L de la muestra conservada en el equipo diseñado para la electrocoagulación, luego se procedió a pasar corriente sobre los electrodos, aquí los parámetros que se midieron son la intensidad de corriente a través de un multímetro marca RedLine y el tiempo de operación medido por un cronómetro. Luego se tomaron muestras del agua tratada de la zona media o zona de reacción según el tiempo indicado en el diseño experimental.

#### 4.5.5. Centrifugación de muestras finales

Todas las muestras se llevan a centrifugación para una mejor separación de las partículas que aún pudieran contener las soluciones y no afecten las mediciones espectrofotométricas. En la figura 14 se muestra la centrifugación de las muestras finales.

**Figura 14**

*Centrifugación de muestras finales*



#### 4.5.6. Medición de cromo hexavalente mediante espectrofotometría

La muestra inicial y muestras obtenidas luego del tratamiento de electrocoagulación fueron analizadas según la norma de referencia aprobada por Inacal, mencionada en la tabla 4.

**Tabla 4**

*Norma de referencia para análisis de cromo hexavalente*

Norma de referencia			
Tipo de ensayo	Código	Título	Año de versión o edición
Cromo Hexavalente	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 3500-Cr, B, 23rd Ed.	Chromium. Colorimetric Method	2017

**Resumen del método:** Este procedimiento mide solo cromo hexavalente ( $\text{Cr}^{+6}$ ). El cromo hexavalente se determina colorimétricamente (espectrofotometría) por reacción con difenilcarbazida en solución ácida. La reacción es muy sensible y se produce un complejo de color rojo-violeta de composición desconocida. Este método es útil para la determinación de cromo hexavalente en un agua natural o tratada en el rango de 100 a 1000  $\mu\text{g} / \text{L}$ , pudiendo ampliarse el rango mediante la dilución o concentración adecuada de la muestra. Con respecto a la manipulación de muestras, la norma menciona que deberán almacenarse refrigerados a  $4 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$  en recipientes de plástico o vidrio. Si sólo se desea cromo hexavalente disuelto, se ajusta el pH del filtrado a 9 con una solución de hidróxido de sodio 1N.

#### 4.6. Análisis y procesamiento de datos

Se realizó el procesamiento de datos mediante la elaboración de tablas y gráficas en el programa de MS Excel además para la comprobación de las hipótesis específicas se emplearon tratamientos estadísticos que incluyeron gráficas de

dispersión, pruebas de normalidad de Shapiro-Wilk y los métodos estadísticos de correlación de variables de Pearson y Rho de Spearman.

Se debe tener en cuenta que la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk es recomendable usarlo cuando el número de datos es menor a 50 además de que esta prueba plantea dos hipótesis las cuales son:

$H_0$ : La distribución es normal

$H_1$ : La distribución no es normal

En la prueba de normalidad se debe tener en cuenta que si los valores de Sig (probabilidad de la prueba) son menores a 0.05 se rechazará la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna, pero si el Sig es mayor o igual a 0.05 se aceptará la hipótesis nula.

Los métodos estadísticos de correlación de variables de Pearson y Rho de Spearman son pruebas paramétricas y no paramétricas respectivamente, estas son definidas mediante la prueba de normalidad.

Las pruebas de correlación de Pearson y Rho de Spearman determinan la dependencia o independencia entre dos variables aleatorias. Estas pruebas presentan coeficientes de correlación que tienen un rango de -1 hasta +1, por lo tanto, si este valor es cercano a +1 nos indica que existe una fuerte asociación positiva entre las dos variables, caso contrario si es cercano a -1 indica que existe una fuerte asociación negativa y si el coeficiente de correlación es 0 se infiere que no existe correlación. Ambas pruebas tanto como Pearson como la de Spearman plantean una hipótesis nula y otra alterna las cuales son:

$H_0$ : No existe correlación entre dos variables

$H_1$ : Si existe correlación entre dos variables

Por lo general para pruebas experimentales se emplea un nivel de confianza de 95 % teniendo en cuenta que si:

$\text{Sig.} \leq 0.05$  se rechaza  $H_0$  y se acepta  $H_1$

Sig. > 0.05 se acepta H0

No olvidar que el “Sig” es el valor de significancia de la prueba que también se conoce como “p-valor” y este valor siempre se compara al nivel de significancia que son el nivel de confianza y el margen de error que uno elige para realizar las pruebas estadísticas. El p-valor indica la probabilidad de que la hipótesis nula sea cierta, cuanto más pequeño sea este valor más fiable es el resultado.

#### **4.7. Aspectos éticos en investigación**

Responsabilidad ética de acuerdo con los reglamentos vigentes.

Los autores de la investigación se responsabilizan por la información emitida en la presente tesis; de acuerdo al reglamento del código de ética de la investigación de la UNAC, resolución de Consejo Universitario N.º 210-2017-CU. Este trabajo cumple con todos los requisitos y responsabilidades señaladas en los ítems mencionados en el reglamento.

## V. RESULTADOS

### 5.1. Resultados descriptivos

#### 5.1.1. Determinación de contenido inicial de cromo hexavalente en el efluente

Se determinó la concentración inicial de cromo hexavalente para establecer las condiciones iniciales y verificar el nivel de contaminación.

La muestra empleada de agua residual fue enviada al laboratorio de análisis de aguas residuales R-LAB S.A.C y se realizó el análisis por duplicado. Ésta muestra se filtró previamente antes del envío como se mencionó en el capítulo anterior para evitar interferencias en el análisis.

La tabla 5 muestra la concentración de cromo hexavalente del agua residual de curtiembre antes del tratamiento y su correspondiente valor con la norma legal.

**Tabla 5**

*Análisis del contenido inicial de cromo hexavalente del agua residual de curtiembre*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor (mg/L)</b>	<b>Promedio (mg/L)</b>	<b>VMA - Norma legal (mg/L)</b>
Cromo	3.40	3.20	0.5
hexavalente	2.99		

#### 5.1.2. Efecto de la variación del tiempo e intensidad de corriente en la electrocoagulación

Para el tratamiento con 2 A se tomaron muestras cada 5 minutos hasta los 20 minutos de iniciado el proceso. Estas muestras fueron analizadas en el laboratorio R-LAB S.A.C. La tabla 6 (ver página 49) muestra los resultados de remoción de cromo hexavalente, cromo hexavalente final y el valor promedio de remoción de cromo hexavalente con este tratamiento.

**Tabla 6***Concentración de Cr<sup>6+</sup> removido a 2 A*

TRATAMIENTO 2 A					
Tiempo (min)	Cr <sup>6+</sup> inicial (mg/L)	Réplica	Cr <sup>6+</sup> final (mg/L)	Cr <sup>6+</sup> removido (mg/L)	Promedio de Cr <sup>6+</sup> removido (mg/L)
5	3.20	1	3.01	0.19	0.370
		2	2.65	0.55	
10		1	1.97	1.23	1.235
		2	1.96	1.24	
15		1	0.63	2.57	1.990
		2	1.79	1.41	
20		1	1.30	1.90	2.210
		2	0.68	2.52	

En el tratamiento con 4 A se empleó el mismo procedimiento del tratamiento anterior e igualmente se enviaron a analizar las muestras al laboratorio R-LAB S.A.C. La tabla 7 muestra los resultados de remoción de cromo hexavalente con este tratamiento.

**Tabla 7***Concentración de Cr<sup>6+</sup> removido a 4 A*

TRATAMIENTO 4 A					
Tiempo (min)	Cr <sup>6+</sup> inicial (mg/L)	Réplica	Cr <sup>6+</sup> final (mg/L)	Cr <sup>6+</sup> removido (mg/L)	Promedio de Cr <sup>6+</sup> removido (mg/L)
5	3.20	1	1.44	1.76	1.735
		2	1.49	1.71	
10		1	1.06	2.14	2.345
		2	0.65	2.55	
15		1	0.55	2.65	2.500
		2	0.85	2.35	
20		1	0.53	2.67	2.775
		2	0.32	2.88	



Los resultados del tratamiento con 6 A a los mismos tiempos establecidos se presentan en la tabla 8.

**Tabla 8**

*Concentración de Cr<sup>6</sup> removido a 6 A*

TRATAMIENTO 6 A					
Tiempo (min)	Cr <sup>6</sup> inicial (mg/L)	Réplica	Cr <sup>6</sup> final (mg/L)	Cr <sup>6</sup> removido (mg/L)	Promedio de Cr <sup>6</sup> removido (mg/L)
5	3.20	1	0.93	2.27	2.420
		2	0.63	2.57	
10		1	0.62	2.58	2.590
		2	0.60	2.60	
15		1	0.54	2.66	2.640
		2	0.58	2.62	
20		1	0.50	2.70	2.840
		2	0.22	2.98	

Los resultados del tratamiento con 8 A a los mismos tiempos establecidos se presentan en la tabla 9.

**Tabla 9**

*Concentración de Cr<sup>6</sup> removido a 8 A*

TRATAMIENTO 8 A					
Tiempo (min)	Cr <sup>6</sup> inicial (mg/L)	Réplica	Cr <sup>6</sup> final (mg/L)	Cr <sup>6</sup> removido (mg/L)	Promedio de Cr <sup>6</sup> removido (mg/L)
5	3.20	1	0.84	2.36	2.465
		2	0.63	2.57	
10		1	0.59	2.61	2.595
		2	0.62	2.58	
15		1	0.70	2.50	2.710
		2	0.28	2.92	
20		1	0.46	2.74	2.850
		2	0.24	2.96	

También se procedió a determinar el rendimiento de remoción de  $\text{Cr}^{+6}$  para cada tratamiento, la tabla 10 resume los resultados obtenidos en las corridas experimentales siguiendo la ecuación 10.

**Tabla 10**

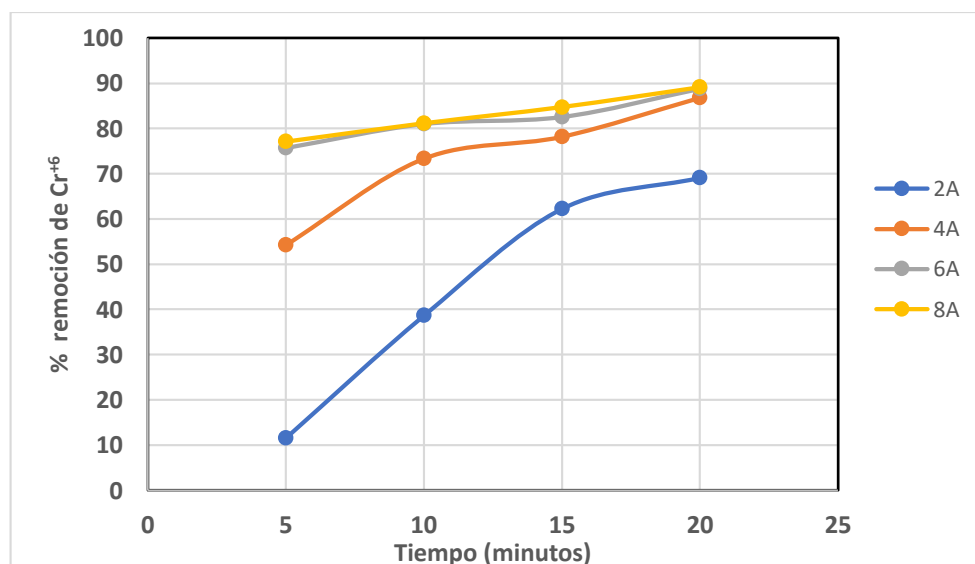
*Rendimientos de remoción de  $\text{Cr}^{+6}$  para cada tratamiento*

Tiempo (min)	Rendimiento de remoción $\text{Cr}^{+6}$ (%)							
	2 A	Prom.	4 A	Prom.	6 A	Prom.	8 A	Prom.
5	5.938	11.563	55.000	54.219	70.938	75.625	73.750	77.031
5	17.188		53.438		80.313		80.313	
10	38.438	38.594	66.875	73.281	80.625	80.938	81.563	81.094
10	38.750		79.688		81.250		80.625	
15	80.313	62.188	82.813	78.125	83.125	82.500	78.125	84.688
15	44.063		73.438		81.875		91.250	
20	59.375	69.063	83.438	86.719	84.375	88.750	85.625	89.063
20	78.750		90.000		93.125		92.500	

Se graficaron los rendimientos de remoción de  $\text{Cr}^{+6}$  (%) vs tiempo para una mejor apreciación del comportamiento del proceso de electrocoagulación, esta misma se presenta en la figura 15.

**Figura 15**

*Rendimiento de remoción de  $\text{Cr}^{+6}$  vs tiempo de cada tratamiento*



## **5.2. Resultados inferenciales**

### **5.2.1. Determinación de contenido inicial de cromo hexavalente en el efluente**

Según la tabla 5 en los resultados descriptivos para el  $\text{Cr}^{+6}$  su valor promedio de concentración es 3.20 mg/L superando al valor máximo admisible que es 0.5 mg/L. Se determinó que el efluente analizado necesita de un tratamiento antes de ser descargado a las redes de alcantarillado.

### **5.2.2. Efecto del tiempo e intensidad de corriente en el proceso de electrocoagulación**

Se realizaron las pruebas experimentales para evaluar la influencia de la intensidad de corriente y tiempo, se realizaron dos repeticiones y se reportaron los valores correspondientes de cada tratamiento. Se emplearon 6 placas de aluminio para la celda de electrocoagulación y una fuente de poder de 40 amperios. Los resultados con los tratamientos a 2, 4, 6 y 8 amperios indican que la concentración del  $\text{Cr}^{+6}$  removido fueron aumentando conforme pasaba el tiempo en el proceso de electrocoagulación.

El tratamiento de 2 A consiguió valores de remoción de  $\text{Cr}^{+6}$  de 0.370 mg/L a los 5 minutos y 2.210 mg/L a los 20 minutos, teniendo un porcentaje de remoción en esta última de 69.063 % que es cercano al 80 % valor el cual se busca alcanzar. Esta tendencia se repitió en los otros tratamientos alcanzando remociones altas a partir de los 10 minutos. Los mejores resultados se obtuvieron en los tratamientos a 6 A y 8 A llegando a un porcentaje de remoción de 88.750 % y 89.063 % respectivamente a los 20 minutos, siendo esto gran parte de la concentración del  $\text{Cr}^{+6}$  inicial.

Se visualizó que las intensidades de corriente y tiempos empleados tienen una relación proporcional a la remoción de  $\text{Cr}^{+6}$  en la electrocoagulación. La tendencia de remoción de  $\text{Cr}^{+6}$  va aumentando según va pasando el tiempo y

según aumenta la intensidad de corriente empleándose métodos estadísticos para demostrar la influencia positiva de estos factores.

### Evaluación del tiempo

En la tabla 11 se muestran los datos de las concentraciones de Cr<sup>+6</sup> removido, las intensidades de corriente y tiempos empleados.

**Tabla 11**

*Cuadro general de los tratamientos realizados (tiempo vs intensidad de corriente)*

Tiempo (min)	Cr <sup>+6</sup> removido (mg/L)							
	2 A	Prom.	4 A	Prom.	6 A	Prom.	8 A	Prom.
5	0.19	0.370	1.76	1.735	2.27	2.420	2.36	2.465
5	0.55		1.71		2.57		2.57	
10	1.23	1.235	2.14	2.345	2.58	2.590	2.61	2.595
10	1.24		2.55		2.60		2.58	
15	2.57	1.990	2.65	2.500	2.66	2.640	2.50	2.710
15	1.41		2.35		2.62		2.92	
20	1.90	2.210	2.67	2.775	2.70	2.840	2.74	2.850
20	2.52		2.88		2.98		2.96	

Con los datos presentados en la tabla 10 se procedió a realizar diagramas de dispersión por cada intensidad de corriente empleado teniendo como finalidad relacionar la concentración promedio de Cr<sup>+6</sup> removido con los tiempos de electrocoagulación. Esta relación se precisó con el R<sup>2</sup> (coeficiente de determinación).

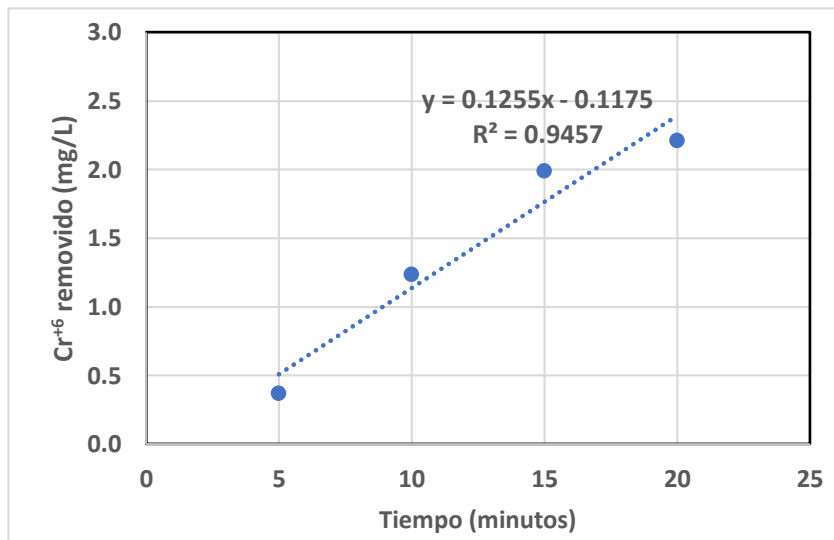
Se ha pretendido un ajuste de línea recta por lo cual es importante tener en cuenta que el R<sup>2</sup> varía entre un rango de:  $0 < R^2 < 1$

Mientras el R<sup>2</sup> sea más cercano a 1 nos indica que la concentración de Cr<sup>+6</sup> se puede explicar en un alto porcentaje con el modelo de regresión lineal del diagrama de dispersión.

Las figuras 16, 17, 18 (ver página 55) y 19 (ver página 55) que están en la siguiente página muestran los diagramas de dispersión con sus modelos de regresión lineal de las concentraciones promedio de  $\text{Cr}^{+6}$  removido a los diferentes tiempos de electrocoagulación para los tratamientos a 2, 4, 6 y 8 amperios respectivamente.

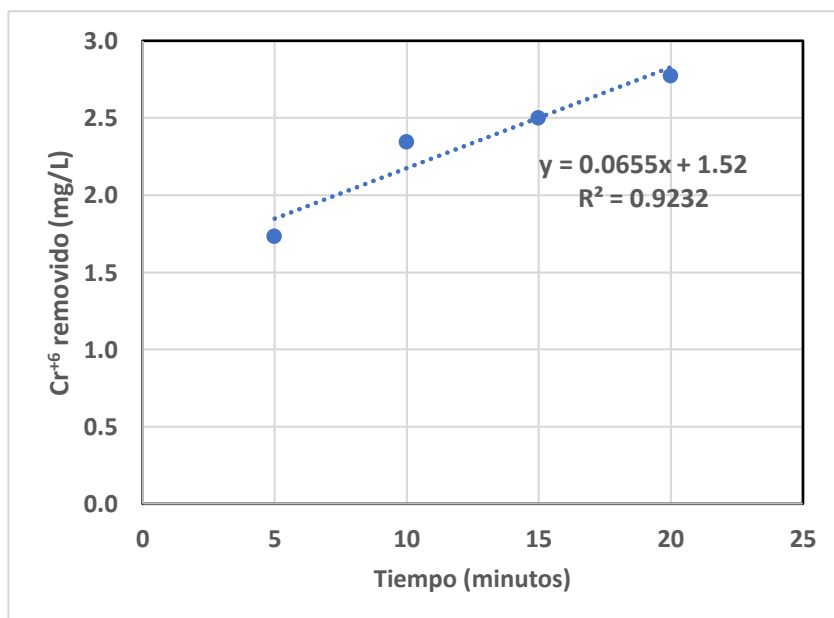
**Figura 16**

*Diagrama de dispersión de  $\text{Cr}^{+6}$  removido vs tiempo (2 A)*



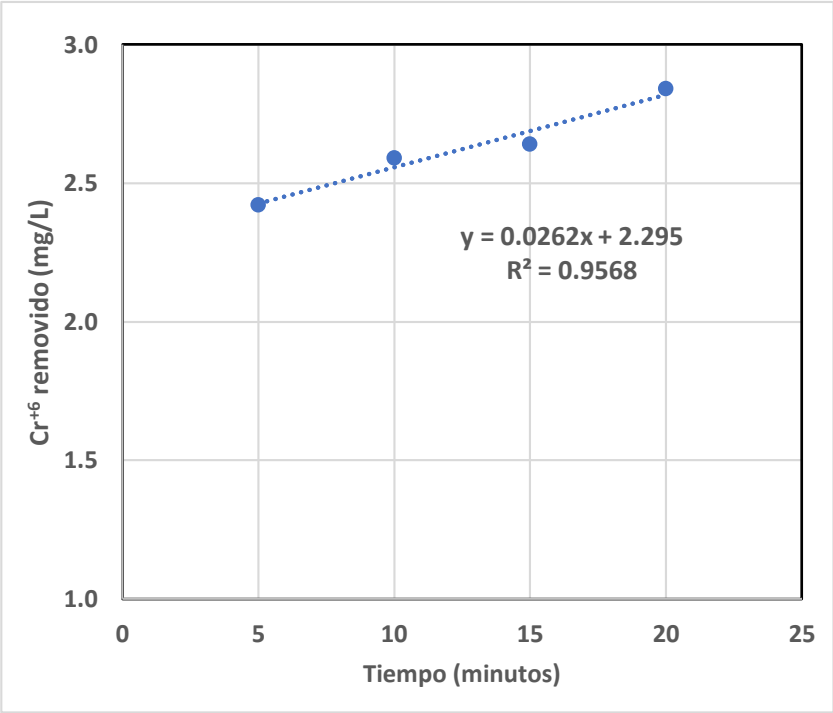
**Figura 17**

*Diagrama de dispersión de  $\text{Cr}^{+6}$  removido vs tiempo (4 A)*



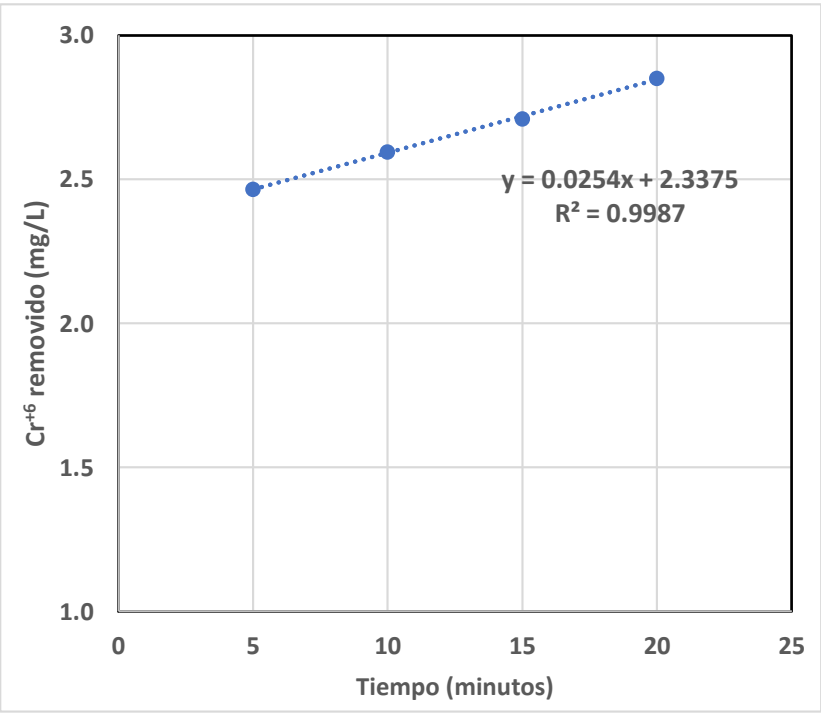
**Figura 18**

*Diagrama de dispersión de Cr<sup>+6</sup> removido vs tiempo (6 A)*



**Figura 19**

*Diagrama de dispersión de Cr<sup>+6</sup> removido vs tiempo (8 A)*



Los diagramas de dispersión indican que los  $R^2$  (coeficientes de determinación) están cercanos a 1 por lo tanto los modelos de regresión lineal explican las concentraciones de  $Cr^{+6}$  con relación al tiempo en un 94.57 %, 92.32 %, 95.68 % y 99.87 % para los tratamientos de 2, 4, 6 y 8 amperios respectivamente.

### ***Prueba de normalidad***

Se empleó la prueba de Shapiro-Wilk para determinar si los datos siguen una distribución de probabilidad normal usando el software estadístico SPSS. La tabla 12 presenta los datos obtenidos para esta prueba de normalidad.

**Tabla 12**

*Prueba de normalidad de  $Cr^{+6}$  removido en función al tiempo a 2, 4, 6 y 8 A*

	<b>Shapiro-Wilk</b>		
	Estadístico	gl	Sig.
<b>2 A</b>	0.928	4	0.584
<b>4 A</b>	0.944	4	0.679
<b>6 A</b>	0.983	4	0.922
<b>8 A</b>	0.997	4	0.989

Tomando los valores de Sig de la tabla 12 para la prueba de Shapiro-Wilk se determinó que, para los tratamientos de 2, 4, 6 y 8 amperios se acepta la hipótesis nula, es decir que tienen una distribución normal.

Si todas las pruebas de normalidad tienen una distribución normal se usará una prueba paramétrica.

Para este método estadístico se trabajó con un nivel de confianza de 95 % y un margen de error ( $\alpha$ ) de 0.05 siendo estos datos los que conforman el nivel de significancia del método.

La prueba paramétrica empleada fue la de Pearson y sus resultados se muestran en la tabla 13 (ver página 57).

**Tabla 13***Correlaciones de Pearson para Cr<sup>+6</sup> removido en función del tiempo*

		<b>Tiempo</b>	<b>2 A</b>	<b>4 A</b>	<b>6 A</b>	<b>8 A</b>
<b>Tiempo</b>	Correlación de Pearson	1.000	0.972	0.961	0.978	0.999
	Sig. (bilateral)		0.028	0.039	0.022	0.001
	N	4	4	4	4	4
<b>2 A</b>	Correlación de Pearson	0.972	1.000	0.972	0.927	0.966
	Sig. (bilateral)	0.028		0.028	0.073	0.034
	N	4	4	4	4	4
<b>4 A</b>	Correlación de Pearson	0.961	0.972	1.000	0.963	0.962
	Sig. (bilateral)	0.039	0.028		0.037	0.038
	N	4	4	4	4	4
<b>6 A</b>	Correlación de Pearson	0.978	0.927	0.963	1.000	0.985
	Sig. (bilateral)	0.022	0.073	0.037		0.015
	N	4	4	4	4	4
<b>8 A</b>	Correlación de Pearson	0.999	0.966	0.962	0.985	1.000
	Sig. (bilateral)	0.001	0.034	0.038	0.015	
	N	4	4	4	4	4

En la tabla 13 se aprecia que los valores de los coeficientes de correlación de Pearson son muy cercanos a 1 con lo cual se afirma que existe una fuerte asociación positiva entre las variables.

También se observa que la gran parte de los valores de Sig tienen valores menores a 0.05 al nivel de significancia donde se aceptaría la hipótesis alterna que indica que sí existe correlación entre dos variables.

### **Evaluación de la intensidad de corriente**

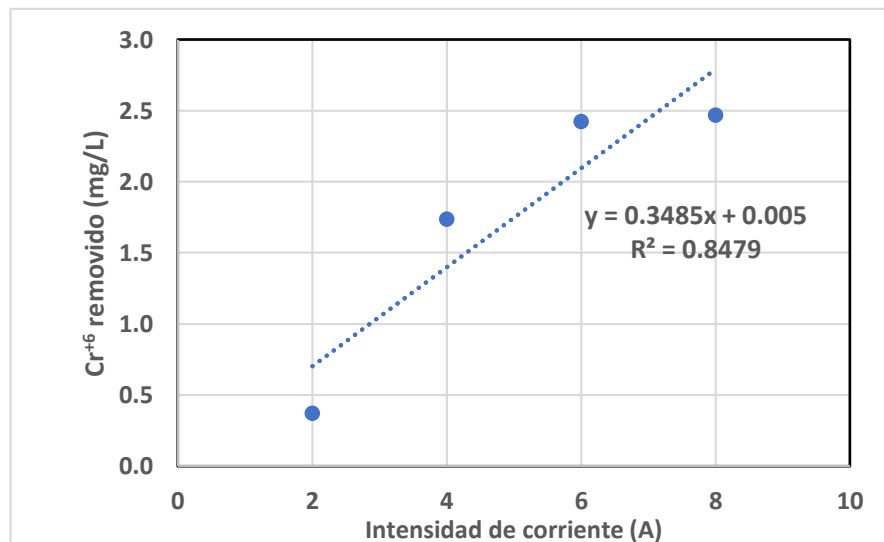
Se realizó el mismo procedimiento anterior pero esta vez para la intensidad de corriente y su influencia en la electrocoagulación. En la tabla 14 (ver página 58) se muestran los datos de las concentraciones de Cr<sup>+6</sup> removido, la intensidad de corriente y tiempos.



**Tabla 14***Cuadro general de los tratamientos realizados (intensidad de corriente vs tiempo)*

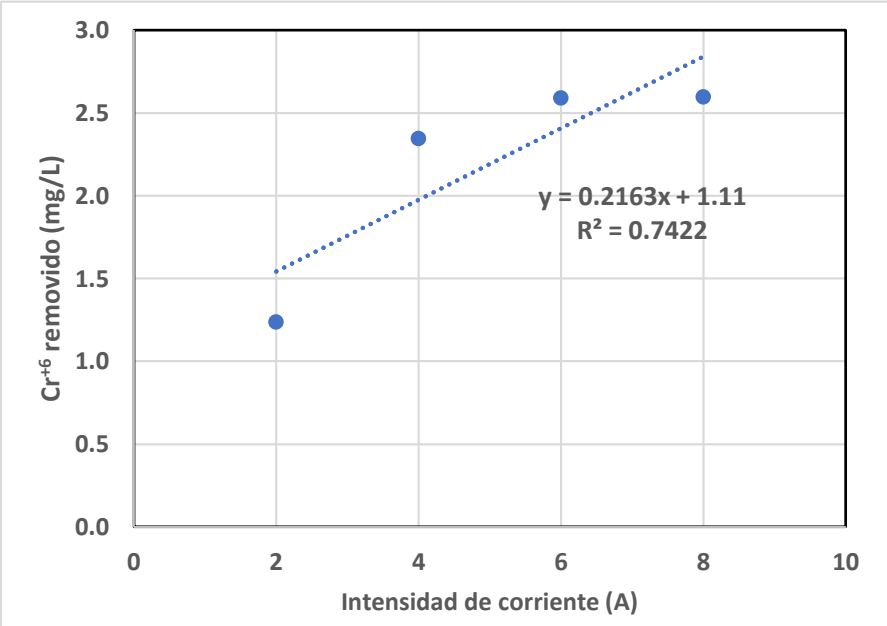
Intensidad de corriente	Cr <sup>+6</sup> removido (mg/L)							
	5 min	Prom.	10 min	Prom.	15 min	Prom.	20 min	Prom.
2	0.19	0.370	1.23	1.235	2.57	1.990	1.90	2.210
2	0.55		1.24		1.41		2.52	
4	1.76	1.735	2.14	2.345	2.65	2.500	2.67	2.775
4	1.71		2.55		2.35		2.88	
6	2.27	2.420	2.58	2.590	2.66	2.640	2.70	2.840
6	2.57		2.60		2.62		2.98	
8	2.36	2.465	2.61	2.595	2.50	2.710	2.74	2.850
8	2.57		2.58		2.92		2.96	

Con los valores de la tabla 14 se procedió a realizar diagramas de dispersión teniendo como finalidad relacionar la concentración promedio de Cr<sup>+6</sup> removido con las intensidades de corriente precisándolos con el R<sup>2</sup>, distinguiendo si los datos se ajustan a una línea recta. Las figuras 20, 21 (ver página 59), 22 (ver página 59) y 23 (ver página 60) muestran los diagramas de dispersión de lo anteriormente planteado.

**Figura 20***Diagrama de dispersión de Cr<sup>+6</sup> removido vs intensidad de corriente (5 minutos)*

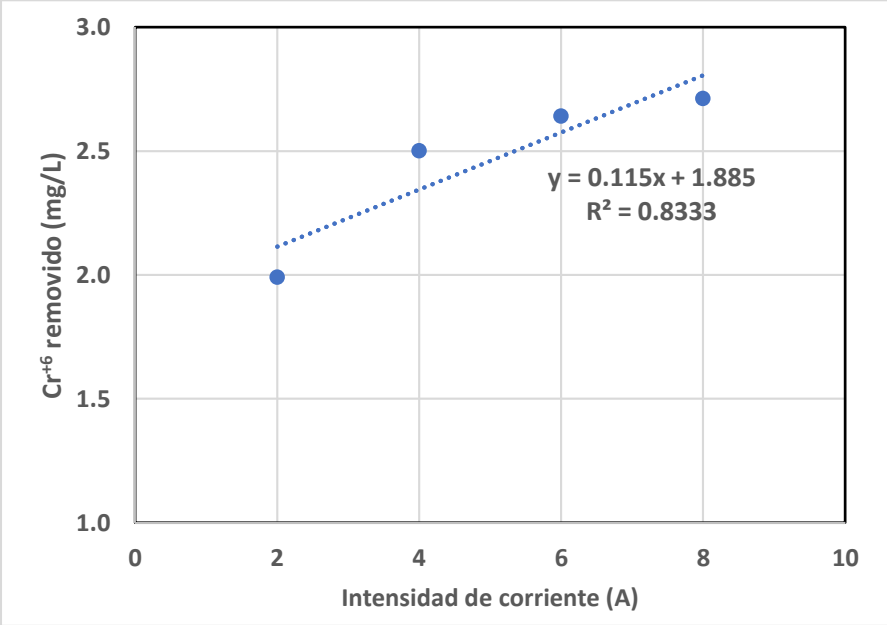
**Figura 21**

*Diagrama de dispersión de Cr<sup>+6</sup> removido vs intensidad de corriente (10 minutos)*



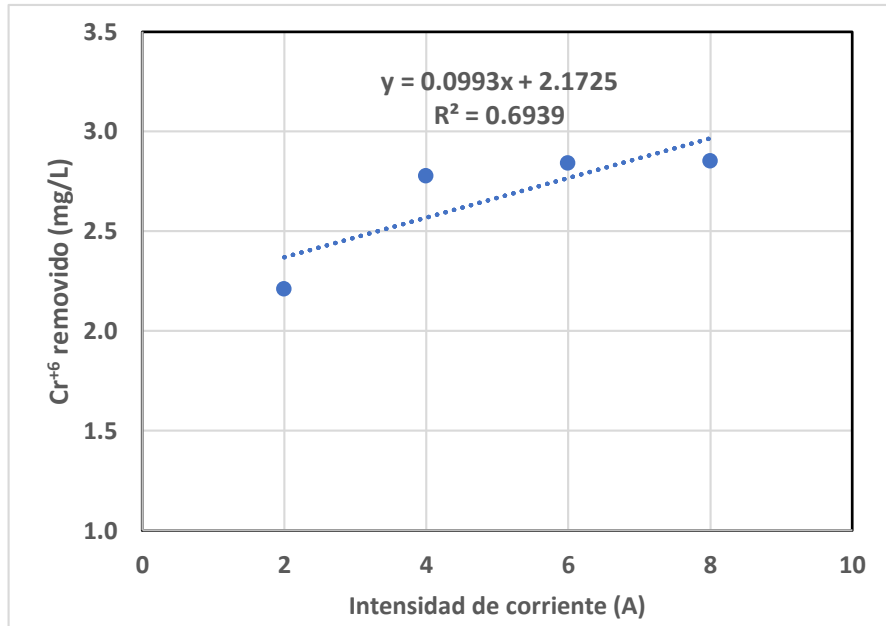
**Figura 22**

*Diagrama de dispersión de Cr<sup>+6</sup> removido vs intensidad de corriente (15 minutos)*



**Figura 23**

*Diagrama de dispersión de Cr<sup>+6</sup> removido vs intensidad de corriente (20 minutos)*



Los diagramas de dispersión indican que los R<sup>2</sup> con los modelos de regresión lineal explican las concentraciones de Cr<sup>+6</sup> con relación a la intensidad de corriente en un 84.79 %, 74.22 %, 83.33 % y 69.39 % para los tratamientos de 5, 10, 15 y 20 minutos respectivamente.

### ***Prueba de normalidad***

Se empleó la prueba de Shapiro-Wilk para determinar si los datos siguen una distribución de probabilidad normal usando el software estadístico SPSS. La tabla 15 presenta los datos obtenidos para esta prueba de normalidad.

**Tabla 15**

*Pruebas de normalidad de Cr<sup>+6</sup> removido en función a la intensidad de corriente a 5, 10, 15 y 20 minutos*

	Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.
<b>5 minutos</b>	0.843	4	0.203
<b>10 minutos</b>	0.755	4	0.043
<b>15 minutos</b>	0.846	4	0.213
<b>20 minutos</b>	0.715	4	0.017

Tomando los valores de Sig de la tabla 15 para la prueba de Shapiro-Wilk se determinó que, para los tratamientos de 10 y 20 minutos se aceptan la hipótesis alterna, es decir que no tienen una distribución normal, a diferencia de los tratamientos de 5 y 15 minutos que siguen una distribución normal porque se acepta la hipótesis nula.

Si todas las pruebas de normalidad no tienen una distribución normal se usará una prueba no paramétrica para validar la correlación de las variables siendo este nuestro caso. La prueba no paramétrica empleada fue Rho de Spearman y sus resultados se muestran en la tabla 16.

**Tabla 16**

*Correlaciones de Rho de Spearman para Cr<sup>6</sup> removido en función a la intensidad de corriente a 5, 10, 15 y 20 minutos*

		Intensidad de corriente	5 minutos	10 minutos	15 minutos	20 minutos
<b>Intensidad de corriente</b>	Coeficiente de correlación	1.000	0.908	0.908	0.537	0.732
	Sig. (bilateral)		0.002	0.002	0.170	0.039
	N	4	4	4	4	4
<b>5 minutos</b>	Coeficiente de correlación	0.908	1.000	0.873	0.587	0.850
	Sig. (bilateral)	0.002		0.005	0.126	0.007
	N	4	4	4	4	4
<b>10 minutos</b>	Coeficiente de correlación	0.908	0.873	1.000	0.275	0.778
	Sig. (bilateral)	0.002	0.005		0.509	0.023
	N	4	4	4	4	4
<b>15 minutos</b>	Coeficiente de correlación	0.537	0.587	0.275	1.000	0.310
	Sig. (bilateral)	0.170	0.126	0.509		0.456
	N	4	4	4	4	4
<b>20 minutos</b>	Coeficiente de correlación	0.732	0.850	0.778	0.310	1.000
	Sig. (bilateral)	0.039	0.007	0.023	0.456	
	N	4	4	4	4	4

Para este método estadístico se trabajó con un nivel de confianza de 95 %. En la tabla 15 (ver página 60) se aprecia que los valores de los coeficientes de correlación de Spearman son cercanos a 1 con lo cual se afirma que existe

una fuerte asociación positiva entre las variables. También se observa que la gran parte de los valores de Sig tienen valores menores a 0.05 al nivel de significancia donde se aceptaría la hipótesis alterna que indica que sí existe correlación entre dos variables.

## VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 6.1. Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados

#### 6.1.1. Prueba de hipótesis

##### **Primera hipótesis específica**

Los resultados del análisis en laboratorio del agua residual de curtiembre mediante espectrofotometría indican que la concentración promedio de  $\text{Cr}^{+6}$  en la muestra inicial sin tratamiento es de 3.2 mg/L demostrando de esta manera que supera los valores máximos admisibles de nuestra normativa vigente que es de 0.5 mg/L.

##### **Segunda hipótesis específica**

$H_0$ : El efecto de la variación del tiempo no influye positivamente en el proceso de electrocoagulación.

$H_1$ : El efecto de la variación del tiempo influye positivamente en el proceso de electrocoagulación.

Los resultados obtenidos en la tabla 11 indican que la prueba de normalidad para medir la relación del efecto del tiempo y la remoción de  $\text{Cr}^{+6}$  es normal, por esta razón se vio necesario emplear una prueba paramétrica de correlación de variables la cual fue Pearson.

En la tabla 12 los coeficientes de correlación han demostrado que hay una fuerte asociación positiva entre las variables, esta misma tabla también mostró veinte valores de significancia (Sig) de las cuales solo dos indicaban que no había relación entre las variables demostrando de esta manera que el 90 % de los valores de significancia afirma una relación entre las variables de tiempo y remoción de  $\text{Cr}^{+6}$ .

Finalmente, con la prueba de correlación de variables de Pearson siendo significativa y positiva podemos concluir que para la segunda hipótesis específica se acepta la hipótesis alterna y se rechaza la hipótesis nula.

### **Tercera hipótesis específica**

H<sub>0</sub>: El efecto de la variación de la intensidad de corriente no influye positivamente en el proceso de electrocoagulación.

H<sub>1</sub>: El efecto de la variación de la intensidad de corriente influye positivamente en el proceso de electrocoagulación.

Los resultados obtenidos en la tabla 14 indican que la prueba de normalidad para medir la relación del efecto de la intensidad de corriente y la remoción de Cr<sup>+6</sup> no es normal, por esta razón se vio necesario emplear una prueba no paramétrica de correlación de variables la cual fue Rho de Spearman.

En la tabla 15 los coeficientes de correlación han demostrado que hay una fuerte asociación positiva entre las variables, esta misma tabla también mostró veinte valores de significancia (Sig) de las cuales solo ocho indicaban que no había relación entre las variables demostrando de esta manera que el 60 % de los valores de significancia afirma una relación entre las variables de tiempo y remoción de Cr<sup>+6</sup>.

Finalmente, con la prueba de correlación de variables de Rho de Spearman siendo significativa y positiva podemos concluir que para la tercera hipótesis específica se acepta la hipótesis alterna y se rechaza la hipótesis nula.

## **6.2. Contrastación de los resultados con otros estudios similares**

Los resultados obtenidos determinaron que la relación proporcional que presentan el tiempo y la intensidad de corriente en el proceso de electrocoagulación tienen una influencia positiva, este resultado es igual al obtenido en el trabajo de investigación de Perales (13). Los porcentajes de rendimiento de remoción fueron altos a partir de los 15 minutos para los tratamientos a 2 A, 4 A, 6 A y 8 A siendo el valor más alto el tratamiento a 8 amperios que fue de 89.706 % de remoción de Cr<sup>+6</sup> a los 20 minutos, resultado similar obtenido en el trabajo de Arboleda y Herrera (7) que lograron remociones de Cr<sup>+6</sup> del 99 % a 40 minutos de tratamiento con efluentes de curtiembre. De la misma forma este valor alto se obtuvo en la investigación de Perales (13) que logró un porcentaje de remoción de Cr<sup>+6</sup> del 100 % a los 40 minutos empleando

electrodos de aluminio con un voltaje de 30 V. Este resultado difiere un poco con el nuestro debido al tiempo de contacto en la cual están los electrodos con el efluente de curtiembre, el diseño de la celda de electrocoagulación y la fuente de poder para el paso de electricidad son dos factores que permiten extender el tiempo de tratamiento por electrocoagulación. Asimismo, Aguilar & Soto (11) en su trabajo de investigación alcanzaron porcentajes de remoción de  $\text{Cr}^{+6}$  en aguas residuales de curtiembre de 98.85 % teniendo una concentración de  $\text{Cr}^{+6}$  inicial de 0.87 mg/L y finalizando con una concentración de 0.01 mg/L a los 45 minutos. A pesar de que la carga inicial del contaminante del efluente sea menor a la de nuestro caso que fue de 3.20 mg/L el resultado del proceso de electrocoagulación tiende a una remoción casi en su totalidad de  $\text{Cr}^{+6}$ , esto implica que la técnica de electrocoagulación para aguas residuales de curtiembre es adaptable para muchos casos de nivel de contaminación.

Los resultados obtenidos en nuestra parte experimental corroboran los mencionados en el trabajo de Córdova (9) que nos muestra la relevancia del proceso de electrocoagulación y su eficiencia que es de hasta 90% para eliminación de contaminantes en los efluentes, además de afirmar que la densidad de corriente y el tiempo de electrólisis son directamente proporcional en relación con el  $\text{Cr}^{+6}$  removido.



## VII. CONCLUSIONES

1. Se redujo el contenido de  $\text{Cr}^{+6}$  en las aguas residuales de curtiembre mediante electrocoagulación en un 89.063 % empleando una intensidad de corriente de 8 A y un tiempo de operación de 20 minutos.
2. Se determinó el contenido de  $\text{Cr}^{+6}$  del agua residual de curtiembre antes del tratamiento teniendo un valor promedio de 3.20 mg/L, de esta forma se comprueba que supera los valores máximos admisibles de la norma legislativa ambiental.
3. La variación del tiempo de electrocoagulación sobre la remoción de  $\text{Cr}^{+6}$  tiene un efecto positivo en el tratamiento obteniéndose mayores porcentajes de remoción conforme se incrementaba el tiempo de operación, siendo 20 minutos el tiempo con mejores resultados.
4. La variación de la intensidad de corriente de electrocoagulación sobre la remoción de  $\text{Cr}^{+6}$  tiene un efecto positivo en el tratamiento obteniéndose mayores porcentajes de remoción conforme se incrementaba la intensidad de corriente, siendo 8 A el que mostró mejores resultados.

## VIII. RECOMENDACIONES

1. Emplear una fuente de energía que pueda soportar el paso de electricidad por tiempos prolongados para tener un mayor panorama de tiempos de operación en tratamientos de electrocoagulación.
2. Realizar un adecuado muestreo del agua residual a tratar para posteriores estudios y no tener inconvenientes al usar herramientas de tratamientos de datos.
3. Evaluar el grosor y dimensiones de los electrodos en el proceso de electrocoagulación para la remoción de  $\text{Cr}^{+6}$ .
4. Implementar un agitador mecánico que ayude a la homogenización de la mezcla durante el proceso de electrocoagulación y evaluar las corridas experimentales a diferentes RPM.

## IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CHÁVEZ, A. *Descripción de la nocividad del cromo proveniente de la industria curtiembre y de las posibles formas de removerlo*. 17, Medellín: s.n., 2010, Revista Ingenierías Universidad de Medellín, Vol. 9, págs. 41-50. 1692-3324.
2. RESTREPO, A., ARANGO, A. y GARCÉS, L. *La electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas*. 2, 2006, Producción + Limpia, Vol. 1, págs. 58-77.
3. SICEX. SiceX Promoting Global Trade. [En línea] 30 de 08 de 2021. [Citado el: 02 de 08 de 2022.] <https://sicex.com/blog/industria-del-cuero-en-colombia/>.
4. HUAMANI, G. *La industria de la curtiembre y su incidencia en el medio ambiente de la ciudad de Lima - 2012*. Callao: s.n., 2014.
5. SALINAS, D. y JOSE SILVA, M. *La contaminación proveniente de la industria curtiembre, una aproximación a la realidad ecuatoriana*. 1, s.l.: Revista Científica UISRAEL, 2022, Vol. 9. 26312786.
6. EL PERUANO. Aprueban Valores Máximos Admisibles (VMA) de las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario. *El Peruano*. 20 de noviembre de 2009, págs. 406305-406307.
7. ARBOLEDA, J. y HERRERA, P. *Evaluación de un proceso de electrocoagulación en un reactor tipo batch para la remoción de cromo hexavalente (Cr+6) con electrodos de aluminio - aluminio y de hierro - aluminio en condiciones de laboratorio*. [ed.] 2015 Colombia: Universidad Santo Tomás. s.l.: Tesis fin de grado. C. A. Peña Guzmán (Dir.), 2015.
8. ROMERO, R. *Diseño de una planta de recuperación del sulfato de cromo (III) proveniente de las aguas del proceso del curtido de cuero, mediante electrocoagulación y reacción química*. s.l.: (Tesis de Título, Escuela Politécnica Nacional), 2015.
9. CÓRDOBA, A. *Tratamiento de agua residual industrial de curtiembre por medio de la electrocoagulación*. 1, Colombia: Tecnológico de Antioquía, 2020, Cuaderno Activa [en línea], Vol. 12, págs. 41-57. ISSN 2027-8101.
10. CRISTANCHO, D., PINTO, L. y TIQUE, J. *Evaluación de la eficiencia de un sistema de electrocoagulación en los vertimientos de curtiembres en el sector de Villapinzón (Cundinamarca)*. 2, 2019, MUTIS, Vol. 9, págs. 34-48.
11. AGUILAR, B. y SOTO, A. *Eficiencia y rentabilidad de la aplicación del tratamiento por electrocoagulación para la reducción del cromo hexavalente en las aguas residuales de Curtiembre, Arequipa, 2021*. s.l.: (Tesis de Título, Universidad César Vallejo), 2021.

12. LAURA, S. y SALINAS, J. *Eficiencia en la remoción del contenido de cromo III por electrocoagulación en las aguas residuales de curtiembre del parque industrial de Río Seco – Arequipa*. s.l.: (Tesis de Título, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa), 2020.
13. PERALES, J. *Influencia del proceso de electrocoagulación en la remoción de cromo hexavalente (Cr+6) en soluciones acuosas a nivel de laboratorio en la Universidad Continental*, 2019. Huancayo: (Tesis de Título, Universidad Continental), 2019.
14. MAYTA, R. y MAYTA J. *Remoción de cromo y demanda química de oxígeno de aguas residuales de curtiembre por electrocoagulación*. 3, Puno: Revista Sociedad Química del Perú, 2017, Vol. 83. 1810-634X.
15. OEFA. Fiscalización ambiental en aguas residuales. [En línea] 2014. [Citado el: 9 de marzo de 2018.] [http://www.oefa.gob.pe/?wpfb\\_dl=7827](http://www.oefa.gob.pe/?wpfb_dl=7827).
16. SINGH, A. *Removal of Chromium from waste water with the help of microbes*. India: e-Journal of Science & Technology, 2008.
17. MORANTE, G. *Electrocoagulación de aguas residuales*. 2, 2002, Revista colombiana de física, Vol. 34, págs. 484-487.
18. MARTÍNEZ, F. *Tratamiento de aguas residuales industriales mediante electrocoagulación y coagulación convencional*. s.l.: (Tesis de doctorado, Universidad de Castilla La Mancha), 2007.
19. CAÑIZARES, P., MARTÍNEZ, F., LOBATO, J. y RODRIGO, M. *Break up of oil in water emulsions by electrochemical techniques*. 1-2, 2007, Journal of Hazardous Materials, Vol. 145, págs. 233-240.
20. APAYDIN, O., KURT, U. y GONULLU, U. *An investigation on the treatment of tannery wastewater by electrocoagulation*. 4, 2009, Global NEST Journal, Vol. 11, págs. 546-555.
21. MORALES, N. y ACOSTA, G. *Sistema de electrocoagulación como tratamiento de aguas residuales galvánicas*. 1, 2010, Ciencia e Ingeniería Neogranadina, Vol. 20, págs. 33-44.
22. SALAS, G. *Eliminación de sulfuros por oxidación en el tratamiento del agua residual de una curtiembre*. 1, 2005, Rev. Per. Quím. Ing. Quím., Vol. 8, PÁGS. 49-54.
23. CASTRO, J., y JAVE, E. *Minimización del cromo (III) mediante hidróxido de calcio en efluentes de la etapa de curtido de pieles en las curtiembres del parque industrial - Trujillo*. s.l.: (Tesis de Título, Universidad Nacional de Trujillo), 2017.

24. MUÑOZ, P., URRUTIA, C. y VAQUERO N. *Aplicación de tecnologías de producción más limpia para la pequeña y mediana industria de curtiembre en el salvador*. s.l.: (Tesis de Título, Universidad de El Salvador), 2005.
25. CASTILLO, M. y LÓPEZ, J. *Tratamiento del agua residual industrial de la curtiembre Rolemt, para el cumplimiento de los valores máximos admisibles*. s.l.: (Tesis de Título, Universidad Privada Antonio Guillermo Urrelo), 2018.
26. CHEN, W., SU, W. y HSU, H. *Continuous flow electrocoagulation for MSG wastewater treatment using polymer coagulants via mixture process design and response surface methods*. 2, 2012, Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, Vol. 43, págs. 246-255.
27. GARCIA, C. y RODRIGUEZ, L. *Influencia del caudal y densidad de corriente eléctrica en el ph, remoción de color y DQO de líquidos de recurtido usando electrocoagulación continua*. s.l.: (Tesis de Título, Universidad Nacional de Trujillo), 2017.
28. PARGA, J., COCKE, D., VALVERDE, V., GOMES, J., KESMEZ, M., MORENO, H., WEIR, M. y MENCER, D. *Characterization of electrocoagulation for removal of chromium and arsenic*. 5, 2005, Chemical Engineering Technology, Vol. 28, págs. 605-612.
29. ARANGO, A. *La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales*. 1, 2005, Revista Lasallista de Investigación, Vol. 2, págs. 49-56.
30. AGUILAR, F. y PALOMINO, A. *Evaluación de un Sistema de Electrocoagulación de Flujo Continuo para la Remoción de Cromo (VI) y DQO de Curtiembre - Huachipa 2018*. s.l.: (Tesis de Título, Universidad César Vallejo), 2018.

## ANEXOS

### 1. Matriz de consistencia

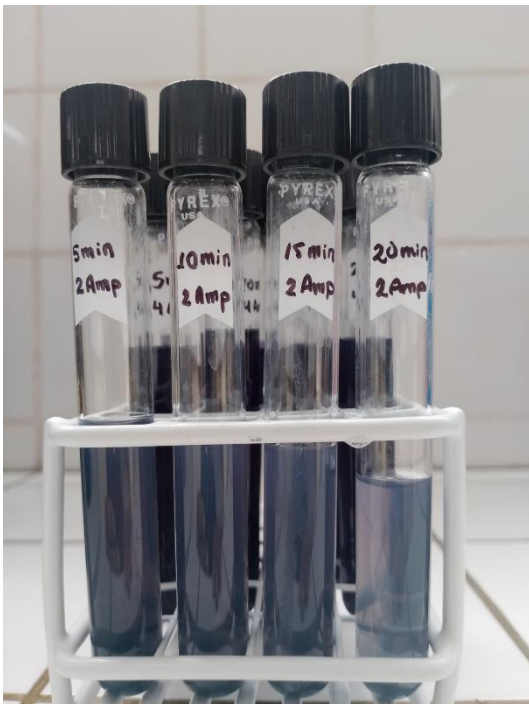
**“Reducción del contenido de cromo hexavalente por electrocoagulación en las aguas residuales de una empresa de curtiembre”**

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES	METODOLOGIA
<b>General</b> ¿Será factible reducir el contenido de cromo hexavalente en las aguas residuales en un proceso de curtido, mediante electrocoagulación?	<b>General</b> Reducir el contenido de cromo hexavalente en las aguas residuales en un proceso de curtido, mediante electrocoagulación.	<b>General</b> Mediante el tratamiento de las aguas residuales en la etapa de curtido por electrocoagulación se logrará más del 80 % de reducción de Cr <sup>+6</sup> .	<b>Variables dependientes</b> G(Y) = Reducción del contenido de Cr <sup>+6</sup>	Amperaje  Tiempo de operación	Amperios  Minutos	Cuantitativa  Cuantitativa
<b>Específico</b> ¿Cuál es el contenido de Cr <sup>+6</sup> en el efluente de la etapa de curtido?	<b>Específico</b> Determinar el contenido de Cr <sup>+6</sup> en el efluente de la etapa de curtido.	<b>Específico</b> El contenido de Cr <sup>+6</sup> en el efluente supera los valores máximos admisibles según la normatividad vigente.			Concentración de Cr <sup>+6</sup>	Análisis cuantitativo en laboratorio
¿Cuál es el efecto de la variación del tiempo en el proceso de electrocoagulación para la remoción de Cr <sup>+6</sup> ?	Determinar el efecto de la variación del tiempo en el proceso de electrocoagulación para la remoción de Cr <sup>+6</sup> .	El efecto de la variación del tiempo influye positivamente en el proceso de electrocoagulación.	<b>Variables independientes</b> F(X) = Electrocoagulación	Contenido de aguas residuales		Análisis cuantitativo obtenido de las corridas experimentales
¿Cuál es el efecto de la variación del amperaje en el proceso de electrocoagulación para la remoción de Cr <sup>+6</sup> ?	Determinar el efecto de la variación del amperaje en el proceso de electrocoagulación para la remoción de Cr <sup>+6</sup> .	El efecto de la variación del amperaje influye positivamente en el proceso de electrocoagulación.			% de remoción	Análisis cuantitativo obtenido de las corridas experimentales

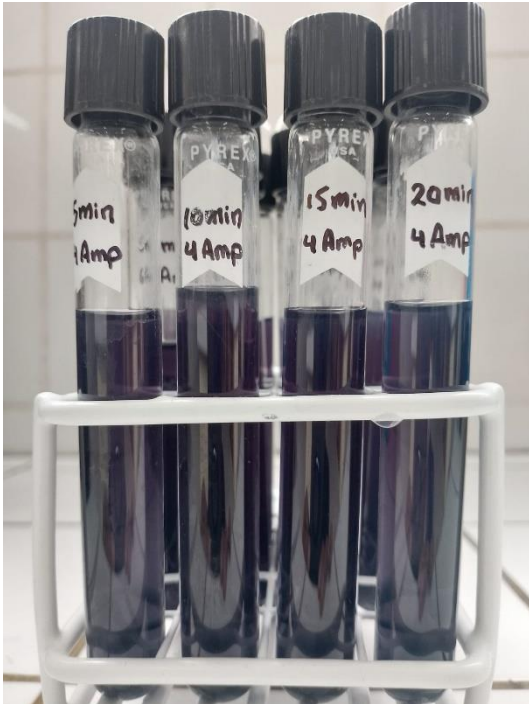
## 2. Apariencia de la muestra inicial



## 3. Muestras tratadas a 2 A y 5 min, 10 min, 15 min y 20 min



**4. Muestras tratadas a 4 A y 5 min, 10 min, 15 min y 20 min**

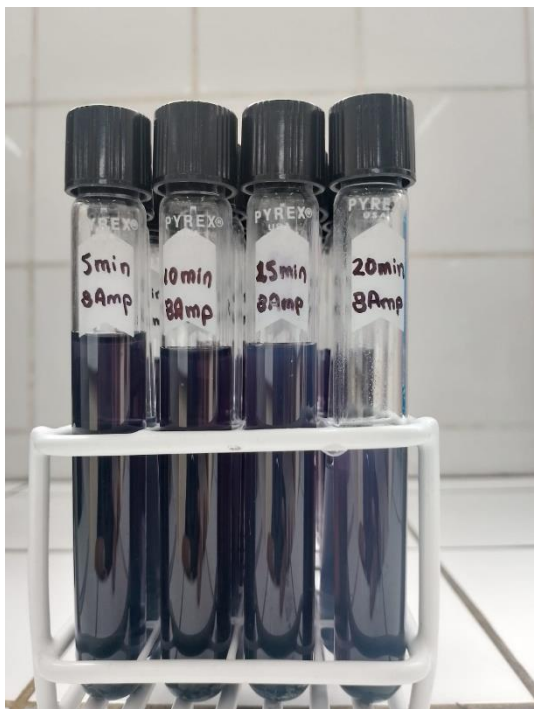


**5. Muestras tratadas a 6 A y 5 min, 10 min, 15 min y 20 min**





## 6. Muestras tratadas a 8 A y 5 min, 10 min, 15 min y 20 min



## 7. Descripción del método espectrofotométrico

La espectrofotometría UV-visible es una técnica analítica que permite determinar la concentración de un compuesto en solución. Se basa en que las moléculas absorben las radiaciones electromagnéticas y a su vez que la cantidad de luz absorbida depende de forma lineal de la concentración. Para hacer este tipo de medidas se emplea un espectrofotómetro, en el que se puede seleccionar la longitud de onda de la luz que pasa por una solución y medir la cantidad de luz absorbida por la misma.

**Ley de Beer – Lambert:** Establece que la absorbancia está directamente relacionada con las propiedades intrínsecas del analito, con su concentración y con la longitud de la trayectoria del haz de radiación al atravesar la muestra. La expresión matemática de la ley de Lambert-Beer es:

$$\varepsilon * b * c = A = -\log \%T \quad (11)$$

Donde

- A es la absorbancia de la muestra.
- T es transmitancia.
- c es concentración del cromóforo.
- b es longitud del paso óptico que contiene la muestra.
- $\epsilon$  es absorptividad molar. Depende del cromóforo en sí mismo, de la  $\lambda$  de las condiciones de medida (pH, T, etc.) Ya que la absorbancia es adimensional las unidades son concentración<sup>-1</sup> x longitud<sup>-1</sup>.

***Instrumentación para la medición de absorbancias de la luz visible y ultravioleta: espectrofotómetro UV-visible.***

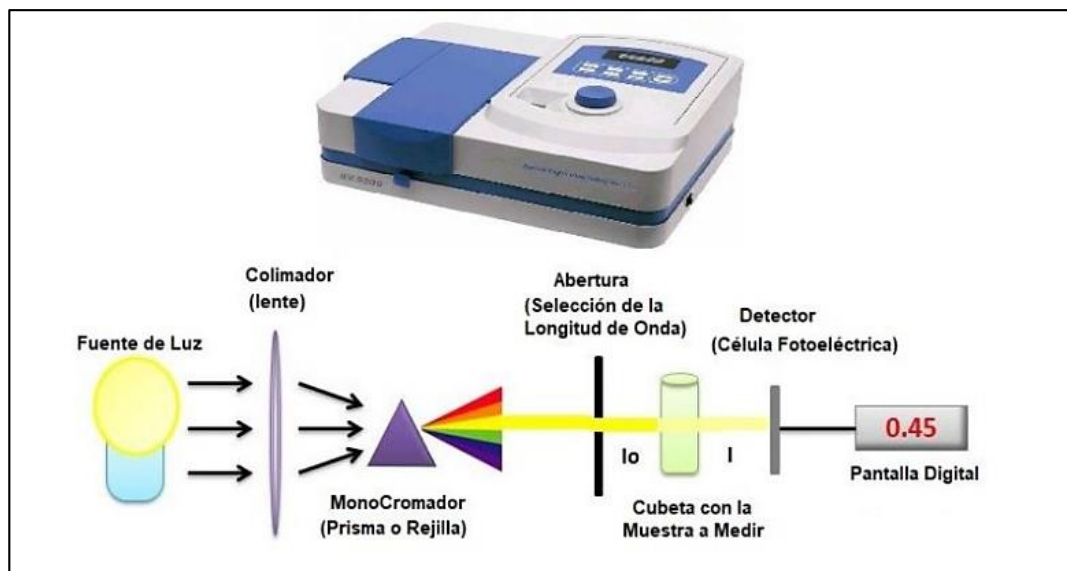
La medición de absorbancia de la luz por las moléculas se realiza en unos aparatos llamados espectrofotómetros. Aunque pueden variar en diseño, en especial con la incorporación de ordenadores para el análisis de datos, todos los espectrofotómetros constan:

- Una fuente de energía radiante: lámpara de deuterio y tungsteno.
- Un monocromador para la selección de radiaciones de una determinada longitud de onda: filtros, prismas, redes de difracción.
- Un compartimento donde se aloja un recipiente transparente (cubetas o tubos) que contenga la muestra. Pueden ser de vidrio, cuarzo o plástico transparente. Para medir en UV se deben usar las de cuarzo o sílice fundido, porque el vidrio no transmite la radiación UV.
- Un detector de luz y un amplificador convertidor de las señales luminosas en señales eléctricas.
- Un registrador o sistema de lectura de datos.

En la figura 1.A (ver página 76) se muestra el espectrofotómetro UV-visible y sus elementos anteriormente descritos.

**Figura 1.A**

*Espectrofotómetro UV-visible*



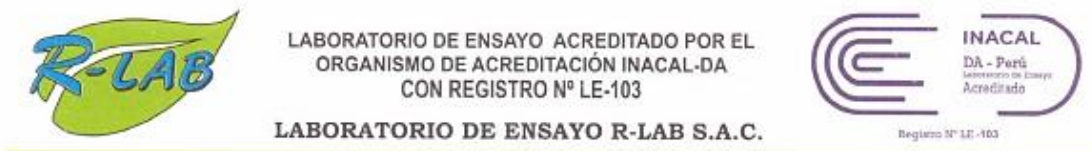
Fuente: [www.etiquetasenrollo.mx](http://www.etiquetasenrollo.mx)

Desde el punto de vista operativo, el primer paso es seleccionar la fuente de luz y longitud de onda a la que se va a realizar la medida. Hay espectrofotómetros de un solo haz (con una sola celdilla para alojar la cubeta con la muestra) y de doble haz (con dos celdillas para dos cubetas). Se mide primero la absorbancia del disolvente (conocido como blanco) y al que se le asigna el valor de cero mediante el ajuste del mando, de forma que la intensidad incidente y transmitida sean iguales ( $I_0 = I_t$ ), y por tanto la absorbancia es cero. A continuación, se pone en la celdilla la cubeta con la muestra y se lee la absorbancia de ésta.

**Curvas de calibrado:** Para obtener una curva de calibrado de un compuesto se preparan soluciones de diferentes concentraciones del mismo (soluciones estándares), determinándose para cada una de ellas el valor de absorbancia a  $\lambda_{max}$ . Estos valores de absorbancia se representan en el eje de abscisas (eje de x) y los de concentración en el eje de ordenadas (eje de y). Se observará que, a bajas concentraciones, el aumento de concentración se corresponde con un incremento lineal en la absorbancia (zona de

cumplimiento de la ley de Lambert-Beer). A concentraciones altas la linealidad se pierde y se observa que la línea se aplana, por lo que las medidas son poco fiables. La representación de Lambert-Beer,  $A = \epsilon \cdot c \cdot l$ , nos permitirá calcular el valor del coeficiente de extinción molar, que corresponde a la pendiente de la recta.

## 8. Informe de ensayo de laboratorio acreditado por Inacal



### INFORME DE ENSAYO N° 2209275A

Cliente	: CYNTHIA RAMOS AUCCASI
Dirección del Cliente	: JR. FEDERICO RECAVARREN MZ. E5 LT. 7 URB. MARISCAL CÁCERES - S.J.L.
(1)Usuario	: CYNTHIA RAMOS AUCCASI
Lugar de Muestreo	: EMPRESA CURTIEMBRE
N° de Orden de Trabajo	: 2209060
Tipo de Matriz y/o Producto	: AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL
Muestreo Realizado por	: CLIENTE
Procedimiento de Muestreo	: NO APLICA
Instructivo de Muestreo	: NO APLICA
Referencia al Plan de Muestreo	: NO APLICA
Número de Muestras	: 48
Fecha de Recepción	: 21/09/2022
Fecha de Inicio y Término de Ensayo	: 23/09/2022 al 26/09/2022

\*Este laboratorio está acreditado de acuerdo con la norma internacional reconocida ISO / IEC 17025. Esta acreditación demuestra la competencia técnica para un alcance definido y el funcionamiento de un sistema de gestión de calidad de laboratorio\*.

(1): Dato proporcionado por el cliente.

Fecha de emisión : 26/09/2022

  
 Leonor Lucía Morocolla Yuto  
 JEFE DE LABORATORIO DE FQ  
 R-LAB S.A.C.

## INFORME DE ENSAYO N° 2209275A

Código de Laboratorio	2209275A-01	2209275A-02	2209275A-03	2209275A-04
(1) Identificación de la Muestra	G1 5min2Amp	G1 5min4Amp	G1 5min6Amp	G1 5min8Amp
(1) Descripción del Punto de Muestreo	No indica	No indica	No indica	No indica
(1) Fecha y hora de muestreo	21/09/2022 09:00	21/09/2022 09:00	21/09/2022 09:00	21/09/2022 09:00
(1) Ubicación Geográfica (AVGS-84)	No indica	No indica	No indica	No indica
Tipo de Matriz y/o Producto	AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL			
Tipo de Ensayo	Unidad	L.D.M.	L.C.M.	Resultados
Cromo Hexavalente	mg/L	0,01	0,04	1,19      1,44      0,03      0,56
	mg/L	Incertidumbre de la Medición ±		0,15      0,19      0,12      0,07

**Nota:**

Condición y estado de la Muestra (s) Ensayada (s): Las muestras llegaron refrigeradas y preservadas al laboratorio.

La (s) muestra(s) llegaron en frasco de polietileno.

La (s) muestra(s) se mantendrán guardadas en condiciones controladas por un periodo de 10 días calendario luego que haya sido entregado el Informe de Ensayo a excepción de las muestras perecibles.

L.C.M. Límite de cuantificación del método; L.D.M. Límite de detección del método.

El Informe de control de calidad será proporcionado a solicitud del cliente.

Los resultados de ensayos se aplican a las muestras como se recibió, habiendo sido suministradas por el cliente.

(1) Datos proporcionados por el cliente.

  
  
**Leonor Lucia Morcoco Yuto**  
 JEFE DE LABORATORIO DE FQ  
 R-LAB S.A.C.

## INFORME DE ENSAYO N° 2209275A

Código de Laboratorio	2209275A-05	2209275A-06	2209275A-07	2209275A-08
(1) Identificación de la Muestra	G1 10min2Amp	G1 10min4Amp	G1 10min6Amp	G1 10min8Amp
(1) Descripción del Punto de Muestreo	No indica	No indica	No indica	No indica
(1) Fecha y hora de muestreo	21/09/2022 09:00	21/09/2022 09:00	21/09/2022 09:00	21/09/2022 09:00
(1) Ubicación Geográfica (AVGS-84)	No indica	No indica	No indica	No indica
Tipo de Matriz y/o Producto	AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL			
Tipo de Ensayo	Unidad	L.D.M.	L.C.M.	Resultados
Cromo Hexavalente	mg/L	0,01	0,04	1,07      1,06      0,55      0,52
	mg/L	Incertidumbre de la Medición ±		0,25      0,14      0,07      0,07

**Nota:**

Condición y estado de la Muestra (s) Ensayada (s): Las muestras llegaron refrigeradas y preservadas al laboratorio.

La (s) muestra(s) llegaron en frasco de polietileno.

La (s) muestra(s) se mantendrán guardadas en condiciones controladas por un periodo de 10 días calendario luego que haya sido entregado el Informe de Ensayo a excepción de las muestras perecibles.

L.C.M. Límite de cuantificación del método; L.D.M. Límite de detección del método.

El Informe de control de calidad será proporcionado a solicitud del cliente.

Los resultados de ensayos se aplican a las muestras como se recibió, habiendo sido suministradas por el cliente.

(1) Datos proporcionados por el cliente.

  
  
**Leonor Lucia Morcoco Yuto**  
 JEFE DE LABORATORIO DE FQ  
 R-LAB S.A.C.

## INFORME DE ENSAYO N° 2209275A

Código de Laboratorio		2209275A-09	2209275A-10	2209275A-11	2209275A-12		
(1) Identificación de la Muestra		G1 15min2Amp	G1 15min4Amp	G1 15min6Amp	G1 15min8Amp		
(1) Descripción del Punto de Muestreo		No indica	No indica	No indica	No indica		
(1) Fecha y hora de muestreo		21/09/2022 09:00	21/09/2022 09:00	21/09/2022 09:00	21/09/2022 09:00		
(1) Ubicación Geográfica (WGS-84)		No indica	No indica	No indica	No indica		
Tipo de Matriz y Producto		AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL					
Tipo de Ensayo	Unidad	L.D.M.	L.C.M.	Resultados			
Cromo Hexavalente	mg/L	0,01	0,04	0,56	0,53	0,49	0,80
	mg/L	Incertidumbre de la Medición ±		0,07	0,07	0,06	0,10

**Nota:**

Condición y estado de la Muestra (s) Ensayada (s): Las muestras llegaron refrigeradas y preservadas al laboratorio.

La (s) muestra(s) llegaron en frasco de polietileno.

La (s) muestra(s) se mantendrán guardadas en condiciones controladas por un periodo de 10 días calendario luego que haya sido entregado el Informe de Ensayo a excepción de las muestras perecibles.

L.C.M. Límite de cuantificación del método; L.D.M. Límite de detección del método.

El informe de control de calidad será proporcionado a solicitud del cliente.

Los resultados de ensayos se aplican a las muestras como se recibió, habiendo sido suministradas por el cliente.

(1) Datos proporcionados por el cliente.

  
  
**Leonor Lucia Morcoba Yulo**  
 JEFE DE LABORATORIO DE PQ  
 R-LAB S.A.C.

## INFORME DE ENSAYO N° 2209275A

Código de Laboratorio		2209275A-13	2209275A-14	2209275A-15	2209275A-16		
(1) Identificación de la Muestra		G1 20min2Amp	G1 20min4Amp	G1 20min6Amp	G1 20min8Amp		
(1) Descripción del Punto de Muestreo		No indica	No indica	No indica	No indica		
(1) Fecha y hora de muestreo		21/09/2022 09:00	21/09/2022 09:00	21/09/2022 09:00	21/09/2022 09:00		
(1) Ubicación Geográfica (WGS-84)		No indica	No indica	No indica	No indica		
Tipo de Matriz y Producto		AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL					
Tipo de Ensayo	Unidad	L.D.M.	L.C.M.	Resultados			
Cromo Hexavalente	mg/L	0,01	0,04	2,33	0,93	0,50	0,53
	mg/L	Incertidumbre de la Medición ±		0,30	0,07	0,06	0,07

**Nota:**

Condición y estado de la Muestra (s) Ensayada (s): Las muestras llegaron refrigeradas y preservadas al laboratorio.

La (s) muestra(s) llegaron en frasco de polietileno.

La (s) muestra(s) se mantendrán guardadas en condiciones controladas por un periodo de 10 días calendario luego que haya sido entregado el Informe de Ensayo a excepción de las muestras perecibles.

L.C.M. Límite de cuantificación del método; L.D.M. Límite de detección del método.

El informe de control de calidad será proporcionado a solicitud del cliente.

Los resultados de ensayos se aplican a las muestras como se recibió, habiendo sido suministradas por el cliente.

(1) Datos proporcionados por el cliente.

  
  
**Leonor Lucia Morcoba Yulo**  
 JEFE DE LABORATORIO DE PQ  
 R-LAB S.A.C.

## INFORME DE ENSAYO N° 2209275A

Código de Laboratorio		2209275A-17	2209275A-18	2209275A-19	2209275A-20		
(1) Identificación de la Muestra		G2 5min2Amp	G2 5min4Amp	G2 5min5Amp	G2 5min8Amp		
(1) Descripción del Punto de Muestreo		No indica	No indica	No indica	No indica		
(1) Fecha y hora de muestreo		21/09/2022 08:00	21/09/2022 02:00	21/09/2022 09:00	21/09/2022 09:00		
(1) Ubicación Geográfica (WGS-84)		No indica	No indica	No indica	No indica		
Tipo de Matriz y/o Producto		AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL					
Tipo de Ensayo	Unidad	L.D.M.	L.C.M.	Resultados			
Cromo Hexavalente	mg/L	0,01	0,04	3,01	1,42	2,29	0,90
	mg/L	Incertidumbre de la Medición ±		0,38	0,19	0,30	0,12

**Nota:**

Condición y estado de la Muestra (s) Ensayada (s): Las muestras llegaron refrigeradas y preservadas al laboratorio.

La (s) muestra(s) llegaron en frasco de polietileno.

La (s) muestra(s) se mantendrán guardadas en condiciones controladas por un periodo de 10 días calendario luego que haya sido entregado el Informe de Ensayo a excepción de las muestras perecibles.

L.C.M. Límite de cuantificación del método; L.D.M. Límite de detección del método.

El informe de control de calidad será proporcionado a solicitud del cliente.

Los resultados de ensayos se aplican a las muestras como se recibió, habiendo sido suministradas por el cliente.

(1) Datos proporcionados por el cliente.


  
**Leonor Lucia Morccolla Yuto**  
 JEFE DE LABORATORIO DE FQ  
 R-LAB S.A.C.

## INFORME DE ENSAYO N° 2209275A

Código de Laboratorio		2209275A-21	2209275A-22	2209275A-23	2209275A-24		
(1) Identificación de la Muestra		G2 10min2Amp	G2 10min4Amp	G2 10min5Amp	G2 10min8Amp		
(1) Descripción del Punto de Muestreo		No indica	No indica	No indica	No indica		
(1) Fecha y hora de muestreo		21/09/2022 08:00	21/09/2022 09:00	21/09/2022 09:00	21/09/2022 09:00		
(1) Ubicación Geográfica (WGS-84)		No indica	No indica	No indica	No indica		
Tipo de Matriz y/o Producto		AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL					
Tipo de Ensayo	Unidad	L.D.M.	L.C.M.	Resultados			
Cromo Hexavalente	mg/L	0,01	0,04	1,95	1,92	1,29	2,12
	mg/L	Incertidumbre de la Medición ±		0,25	0,25	0,17	0,21

**Nota:**

Condición y estado de la Muestra (s) Ensayada (s): Las muestras llegaron refrigeradas y preservadas al laboratorio.

La (s) muestra(s) llegaron en frasco de polietileno.

La (s) muestra(s) se mantendrán guardadas en condiciones controladas por un periodo de 10 días calendario luego que haya sido entregado el Informe de Ensayo a excepción de las muestras perecibles.

L.C.M. Límite de cuantificación del método; L.D.M. Límite de detección del método.

El informe de control de calidad será proporcionado a solicitud del cliente.

Los resultados de ensayos se aplican a las muestras como se recibió, habiendo sido suministradas por el cliente.

(1) Datos proporcionados por el cliente.


  
**Leonor Lucia Morccolla Yuto**  
 JEFE DE LABORATORIO DE FQ  
 R-LAB S.A.C.

## INFORME DE ENSAYO N° 2209275A

Código de Laboratorio		2209275A-25	2209275A-26	2209275A-27	2209275A-28		
(1) Identificación de la Muestra		G2 15min2Amp	G2 15min4Amp	G2 15min6Amp	G2 15min8Amp		
(1) Descripción del Punto de Muestreo		No indica	No indica	No indica	No indica		
(1) Fecha y hora de muestreo		21/09/2022 09:00	21/09/2022 09:00	21/09/2022 09:00	21/09/2022 09:00		
(1) Ubicación Geográfica (WGS-84)		No indica	No indica	No indica	No indica		
Tipo de Matriz y/o Producto		AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL					
Tipo de Ensayo	Unidad	L.D.M.	L.C.M.	Resultados			
Cromo Hexavalente	mg/L	0,01	0,04	2,55	1,50	0,67	0,93
	mg/L	Incertidumbre de la Medición ±		0,33	0,20	0,09	0,12

**Nota:**

Condición y estado de la Muestra (s) Ensayada (s): Las muestras llegaron refrigeradas y preservadas al laboratorio.  
 La (s) muestra(s) llegaron en frasco de polietileno.  
 La (s) muestra(s) se mantendrán guardadas en condiciones controladas por un periodo de 10 días calendario luego que haya sido entregado el Informe de Ensayo a excepción de las muestras perecibles.  
 L.C.M. Límite de cuantificación del método; L.D.M. Límite de detección del método.  
 El informe de control de calidad será proporcionado a solicitud del cliente.  
 Los resultados de ensayos se aplican a las muestras como se recibió, habiendo sido suministradas por el cliente.  
 (1) Datos proporcionados por el cliente.

  
  
**Leonor Lucia Morcote Yuto**  
 JEFE DE LABORATORIO DE FQ  
 R-LAB S.A.C.

## INFORME DE ENSAYO N° 2209275A

Código de Laboratorio		2209275A-29	2209275A-30	2209275A-31	2209275A-32		
(1) Identificación de la Muestra		G2 20min2Amp	G2 20min4Amp	G2 20min6Amp	G2 20min8Amp		
(1) Descripción del Punto de Muestreo		No indica	No indica	No indica	No indica		
(1) Fecha y hora de muestreo		21/09/2022 09:00	21/09/2022 09:00	21/09/2022 09:00	21/09/2022 09:00		
(1) Ubicación Geográfica (WGS-84)		No indica	No indica	No indica	No indica		
Tipo de Matriz y/o Producto		AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL					
Tipo de Ensayo	Unidad	L.D.M.	L.C.M.	Resultados			
Cromo Hexavalente	mg/L	0,01	0,04	1,49	1,35	0,80	1,23
	mg/L	Incertidumbre de la Medición ±		0,19	0,18	0,10	0,15

**Nota:**

Condición y estado de la Muestra (s) Ensayada (s): Las muestras llegaron refrigeradas y preservadas al laboratorio.  
 La (s) muestra(s) llegaron en frasco de polietileno.  
 La (s) muestra(s) se mantendrán guardadas en condiciones controladas por un periodo de 10 días calendario luego que haya sido entregado el Informe de Ensayo a excepción de las muestras perecibles.  
 L.C.M. Límite de cuantificación del método; L.D.M. Límite de detección del método.  
 El informe de control de calidad será proporcionado a solicitud del cliente.  
 Los resultados de ensayos se aplican a las muestras como se recibió, habiendo sido suministradas por el cliente.  
 (1) Datos proporcionados por el cliente.

  
  
**Leonor Lucia Morcote Yuto**  
 JEFE DE LABORATORIO DE FQ  
 R-LAB S.A.C.



## INFORME DE ENSAYO N° 2209275A

Código de Laboratorio		2209275A-33	2209275A-34	2209275A-35	2209275A-36		
(1) Identificación de la Muestra		G3 5min2Amp	G3 5min4Amp	G3 5min6Amp	G3 5min8Amp		
(1) Descripción del Punto de Muestreo		No indica	No indica	No indica	No indica		
(1) Fecha y hora de muestreo		21/09/2022 09:00	21/09/2022 09:00	21/09/2022 09:00	21/09/2022 09:00		
(1) Ubicación Geográfica (WGS-84)		No indica	No indica	No indica	No indica		
Tipo de Matriz y/o Producto		AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL					
Tipo de Ensayo	Unidad	L.D.M.	L.C.M.	Resultados			
Cromo Hexavalente	mg/L	0,01	0,04	2,65	0,95	0,55	0,43
	mg/L	Incertidumbre de la Medición ±		0,34	0,11	0,07	0,06

Nota:

Condición y estado de la Muestra (s) Ensayada (s): Las muestras llegaron refrigeradas y preservadas al laboratorio.

La (s) muestra(s) llegaron en frasco de polietileno.

La (s) muestra(s) se mantendrán guardadas en condiciones controladas por un periodo de 10 días calendario luego que haya sido entregado el Informe de Ensayo a excepción de las muestras perecibles.

L.C.M. Límite de cuantificación del método; L.D.M. Límite de detección del método.

El informe de control de calidad será proporcionado a solicitud del cliente.

Los resultados de ensayos se aplican a las muestras como se recibió, habiendo sido suministradas por el cliente.

(1) Datos proporcionados por el cliente.

  
 Leonor Lucía Marccollia Yuto  
 JEFE DE LABORATORIO DE FQ  
 R-LAB S.A.C.

## INFORME DE ENSAYO N° 2209275A

Código de Laboratorio		2209275A-37	2209275A-38	2209275A-39	2209275A-40		
(1) Identificación de la Muestra		G3 10min2Amp	G3 10min4Amp	G3 10min6Amp	G3 10min8Amp		
(1) Descripción del Punto de Muestreo		No indica	No indica	No indica	No indica		
(1) Fecha y hora de muestreo		21/09/2022 09:00	21/09/2022 09:00	21/09/2022 09:00	21/09/2022 09:00		
(1) Ubicación Geográfica (WGS-84)		No indica	No indica	No indica	No indica		
Tipo de Matriz y/o Producto		AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL					
Tipo de Ensayo	Unidad	L.D.M.	L.C.M.	Resultados			
Cromo Hexavalente	mg/L	0,01	0,04	1,39	0,58	0,53	0,71
	mg/L	Incertidumbre de la Medición ±		0,18	0,07	0,07	0,09

Nota:

Condición y estado de la Muestra (s) Ensayada (s): Las muestras llegaron refrigeradas y preservadas al laboratorio.

La (s) muestra(s) llegaron en frasco de polietileno.

La (s) muestra(s) se mantendrán guardadas en condiciones controladas por un periodo de 10 días calendario luego que haya sido entregado el Informe de Ensayo a excepción de las muestras perecibles.

L.C.M. Límite de cuantificación del método; L.D.M. Límite de detección del método.

El informe de control de calidad será proporcionado a solicitud del cliente.

Los resultados de ensayos se aplican a las muestras como se recibió, habiendo sido suministradas por el cliente.

(1) Datos proporcionados por el cliente.

  
 Leonor Lucía Marccollia Yuto  
 JEFE DE LABORATORIO DE FQ  
 R-LAB S.A.C.

## INFORME DE ENSAYO N° 2209275A

Código de Laboratorio	2209275A-41	2209275A-42	2209275A-43	2209275A-44			
(1) Identificación de la Muestra	G3 15min2Amp	G3 15min4Amp	G3 15min8Amp	G3 15min8Amp			
(1) Descripción del Punto de Muestreo	No indica	No indica	No indica	No indica			
(1) Fecha y hora de muestreo	21/09/2022 09:00	21/09/2022 09:00	21/09/2022 09:00	21/09/2022 09:00			
(1) Ubicación Geográfica (WGS-84)	No indica	No indica	No indica	No indica			
Tipo de Matriz y/o Producto	AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL						
Tipo de Ensayo	Unidad	L.D.M.	L.C.M.	Resultados			
Cromo Hexavalente	mg/L	0,01	0,04	1,59	0,85	0,56	0,23
	mg/L	Incidencia de la Medición a		0,20	0,11	0,07	0,03

**Nota:**

Condición y estado de la Muestra (x) Ensayada (K): Las muestras llegaron refrigeradas y preservadas al laboratorio.  
 La (s) muestra(s) llegaron en frasco de polietileno.  
 La (s) muestra(s) se mantendrán guardadas en condiciones controladas por un periodo de 10 días calendario luego que haya sido entregado el Informe de Ensayo a excepción de las muestras perecibles.  
 L.C.M. Límite de cuantificación del método, L.D.M. Límite de detección del método.  
 El informe de control de calidad será proporcionado a solicitud del cliente.  
 Los resultados de ensayos se aplican a las muestras como se recibió, habiendo sido suministradas por el cliente.  
 (1) Datos proporcionados por el cliente.

  
**Leonor Lucia Morcoco Yuto**  
 JEFE DE LABORATORIO DE PQ  
 R-LAB S.A.C.

## INFORME DE ENSAYO N° 2209275A

Código de Laboratorio	2209275A-45	2209275A-46	2209275A-47	2209275A-48			
(1) Identificación de la Muestra	G3 20min2Amp	G3 20min4Amp	G3 20min8Amp	G3 20min8Amp			
(1) Descripción del Punto de Muestreo	No indica	No indica	No indica	No indica			
(1) Fecha y hora de muestreo	21/09/2022 09:00	21/09/2022 09:00	21/09/2022 09:00	21/09/2022 09:00			
(1) Ubicación Geográfica (WGS-84)	No indica	No indica	No indica	No indica			
Tipo de Matriz y/o Producto	AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL						
Tipo de Ensayo	Unidad	L.D.M.	L.C.M.	Resultados			
Cromo Hexavalente	mg/L	0,01	0,04	0,60	0,32	0,22	0,27
	mg/L	Incidencia de la Medición a		0,08	0,04	0,03	0,05

**Nota:**

Condición y estado de la Muestra (x) Ensayada (K): Las muestras llegaron refrigeradas y preservadas al laboratorio.  
 La (s) muestra(s) llegaron en frasco de polietileno.  
 La (s) muestra(s) se mantendrán guardadas en condiciones controladas por un periodo de 10 días calendario luego que haya sido entregado el Informe de Ensayo a excepción de las muestras perecibles.  
 L.C.M. Límite de cuantificación del método, L.D.M. Límite de detección del método.  
 El informe de control de calidad será proporcionado a solicitud del cliente.  
 Los resultados de ensayos se aplican a las muestras como se recibió, habiendo sido suministradas por el cliente.  
 (1) Datos proporcionados por el cliente.

Norma de Referencia			
Tipo de Ensayo	Código	Título	Año de Versión o Edición
Cromo Hexavalente	SNEAW-APHA- AWWA-WEF Part 3500-Cr, B, 23rd Ed.	Chromium, Colorimetric Method	2017

Fin de documento

  
**Leonor Lucia Morcoco Yuto**  
 JEFE DE LABORATORIO DE PQ  
 R-LAB S.A.C.