



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Dirección General de Estudios de Posgrado
Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y
Geográfica
Unidad de Posgrado

**Reducción de metales pesados (Cu, Ni, Zn y Cr) en
efluentes galvánicos mediante la electrocoagulación**

TESIS

Para optar el Grado Académico de Magíster en Ciencias
Ambientales con mención en Gestión y Control de la
Contaminación

AUTOR

Ernesto LEON VILELA

ASESOR

Dr. Vidal Sixto ARAMBURÚ ROJAS

Lima, Perú

2022



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Leon, E. (2022). *Reducción de metales pesados (Cu, Ni, Zn y Cr) en efluentes galvánicos mediante la electrocoagulación*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Unidad de Posgrado]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Ernesto León Vilela.
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	08350642
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0002-9676-5897
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Dr. Vidal Sixto Aramburú Rojas
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	08608364
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0001-7411-3866
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Dr. Rolando Reátegui Lozano
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	06418510
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Dr. Raymundo Erazo Erazo
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	08439329
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	Dr. Oscar Rafael Tinoco Gómez
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	08606920
Miembro del jurado 3	
Nombres y apellidos	Dr. Vidal Sixto Aramburú Rojas

Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	08608364
Datos de investigación	
Línea de investigación	Áreas C: Ingenierías. Programa: C.0.2 Medio Ambiente y Tecnologías Limpias. Líneas de Investigación: C.0.2.2. Tecnologías para mitigar los impactos ambientales de las actividades industriales.
Grupo de investigación	No aplica.
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento.
Ubicación geográfica de la investigación	Edificio: Empresa Corporación Rey S.A. País: Perú Departamento: Lima Provincia: Callao Distrito: Carmen de la Legua Centro poblado: Corporación Rey S.A. Urbanización: Urb. Parque Internacional de Industria y Comercio. Calle: Av. Oscar R. Benavides 5991. Latitud: -12.0506562 Longitud: -77.0832466
Año o rango de años en que se realizó la investigación	Obligatorio. Ejemplo: Agosto 2012 - setiembre 2013 Febrero 2019 – agosto 2019
URL de disciplinas OCDE	Ciencias del medio ambiente https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.08 Electroquímica https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.04.05



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

SUSTENTACIÓN PÚBLICA

En la Universidad Nacional Mayor de San Marcos – Lima, a los treinta días del mes de marzo del año 2022, siendo las 10:00 horas, se reúnen los suscritos Miembros del Jurado Examinador de Tesis, nombrado mediante Dictamen N° 000180-2022-UPG-VDIP-FIGMMG/UNMSM del 21 de marzo del 2022, con la finalidad de evaluar la sustentación oral de la siguiente tesis:

TITULO

«REDUCCIÓN DE METALES PESADOS (CU, NI, ZN Y CR) EN EFLUENTES GALVÁNICOS MEDIANTE LA ELECTROCOAGULACIÓN»

Que, presenta el Bach. **ERNESTO LEON VILELA**, para optar el **GRADO ACADÉMICO DE MAGISTER EN CIENCIAS AMBIENTALES CON MENCIÓN EN GESTIÓN Y CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN**.

El Secretario del Jurado Examinador de la Tesis, analiza el expediente N° 01759/FIGMMG del 23 de febrero del 2018, en el marco legal y Estatutario de la Ley Universitaria, acreditando que tiene todos los documentos y cumplió con las etapas del trámite según el «Reglamento General de Estudios de Posgrado», aprobado con Resolución Rectoral N° 04790-R-18 del 08 de agosto del 2018.


Luego de la Sustentación, se procede con la calificación de la Tesis, de acuerdo al procedimiento respectivo y se registra en el acta correspondiente en conformidad al Art. 100 del precitado Reglamento, correspondiéndole al graduando la siguiente calificación:


APROBADO (15)

Habiendo sido aprobada la sustentación de la Tesis, el Presidente recomienda a la Facultad se le otorgue el **GRADO ACADÉMICO DE MAGISTER EN CIENCIAS AMBIENTALES CON MENCIÓN EN GESTIÓN Y CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN** al Bach. **ERNESTO LEON VILELA**.

Siendo las 11:00 horas, se dio por concluido al acto académico.


DR. ROLANDO REATEGUI LOZANO
Presidente


DR. RAYMUNDO ERAZO ERAZO
Secretario


DR. OSCAR RAFAEL TINOCO GÓMEZ
Miembro


DR. VIDAL SIXTO ARAMBURÚ ROJAS
Asesor

DEDICATORIA

Para ustedes, por sus grandes enseñanzas y valores que hicieron de mí la persona que soy. Lucila y Ernesto, mis queridos padres, mi más profundo y eterno agradecimiento.

A María Elena, porque juntos siempre creímos que no había nada que impidiera seguir creciendo.

A mis queridas hijas, para que este esfuerzo sea su luz por seguir profesionalmente.

A Samuel Gleiser, por hacer realidad este proyecto.

AGRADECIMIENTOS

A toda mi familia que comprendió que todo esfuerzo requiere de tiempo y dedicación, gracias por entenderlo.

A todas las personas que en una u otra medida ayudaron a que este proyecto se concrete. Mi mayor agradecimiento.

INDICE GENERAL

	Pág.
CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN	01
1.1 Situación problemática	01
1.2 Formulación del Problema	02
1.2.1 Problema general	03
1.2.2 Problemas específicos	03
1.3 Justificación de la investigación	04
1.4 Objetivos	05
1.4.1 Objetivo General	05
1.4.2 Objetivos específicos	05
1.5 Hipótesis y variables	05
1.5.1 Hipótesis General	05
1.5.2 Hipótesis Específicas	05
CAPITULO 2: MARCO TEORICO	06
2.1 Antecedente de investigación	06
2.1.1 Antecedentes internacionales	06
2.1.2 Antecedentes Latinoamérica	07
2.1.3 Antecedentes Nacionales	07
2.2 Bases Teóricas	08
2.2.1 Aguas residuales	08
2.2.2 Tratamiento de aguas residuales industriales	11
2.2.3 Electrocoagulación	11
2.2.4 Etapas de la electrocoagulación	13

2.2.5	Mecanismos de las reacciones químicas en el proceso de electrocoagulación	14
2.2.6	Factores que afectan al proceso de electrocoagulación	17
2.2.7	Ventajas y desventajas de la electrocoagulación	19
2.3	Marco conceptual	20
CAPITULO 3: METODOLOGIA		30
3.1	Tipo y diseño de investigación	30
3.1.1	Esquema de investigación	31
3.1.2	Diseño factorial	31
3.1.3	Diseño experimental	32
3.1.4	Diseño de la celda electrolítica de electrocoagulación	33
3.1.5	Construcción de la celda electrolítica	34
3.1.6	Electrodos	37
3.1.7	Caracterización fisicoquímica del efluente galvánico	38
3.1.8	Materiales, equipos e instrumentos utilizados	38
3.1.9	Procedimiento experimental en celda piloto de EC	42
3.1.10	Recolección de las muestras	47
3.2	Unidad de análisis	48
3.3	Población de estudio	48
3.4	Tamaño de muestra	48
3.5	Selección de muestra	49
3.6	Técnica de recolección de datos	49
CAPITULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN		50
4.1	Análisis e interpretación de resultados.	50
4.1.1	Caracterización inicial del efluente galvánico.	50
4.1.2	Condiciones de operación durante el proceso de Electrocoagulación.	51
4.1.3	Resultados de los porcentajes de remoción de metales Pesados	51
4.1.4	Resultados del porcentaje de remoción del Cromo, Cobre,	

Níquel y Zinc.	54
4.1.5 Comportamiento de la turbidez en el proceso de Electrocoagulación.	58
4.2 Resultados de análisis estadísticos.	63
4.2.1 Prueba de normalidad para el pH y el voltaje.	64
4.2.2 Análisis de varianza (ANOVA) para la remoción del cromo	66
4.2.2.1 Efectos principales para la remoción del cromo	68
4.2.2.2 Superficie de respuesta para la remoción del cromo	69
4.2.2.3 Diagrama de Pareto para la remoción del cromo	69
4.2.3 Análisis de varianza (ANOVA) para la remoción del cobre	70
4.2.3.1 Efectos principales para la remoción del cobre	72
4.2.3.2 Superficie de respuesta para la remoción del cobre	73
4.2.3.3 Diagrama de Pareto para la remoción del cobre	73
4.2.4 Análisis de varianza (ANOVA) para la remoción del níquel	74
4.2.4.1 Efectos principales para la remoción del níquel	76
4.2.4.2 Superficie de respuesta para la remoción del níquel	77
4.2.4.3 Diagrama de Pareto para la remoción del níquel	77
4.2.5 Análisis de varianza (ANOVA) para la remoción del zinc	78
4.2.5.1 Efectos principales para la remoción del zinc	80
4.2.5.2 Superficie de respuesta para la remoción del zinc	81
4.2.5.3 Diagrama de Pareto para la remoción del zinc	81
4.3 Discusión de resultados	82
CONCLUSIONES	84
RECOMENDACIONES	85
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	86
ANEXOS	91

INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Diseño de tratamientos	32
Tabla 2 Diseño experimental	33
Tabla 3 Características de la celda electrolítica	34
Tabla 4 Caracterización inicial del efluente galvánico sin tratamiento	38
Tabla 5 Características fisicoquímicas iniciales del efluente galvánico	49
Tabla 6 Condiciones de operación del proceso de electrocoagulación	50
Tabla 7 Resultados del porcentaje de remoción (%) de carga contaminante	51
Tabla 8 Promedio del porcentaje de remoción (%) de carga contaminante	51
Tabla 9 Caracterización final del tratamiento de los efluentes galvánicos tratados	53
Tabla 10 Porcentaje de remoción del cromo en función del pH y voltaje	53
Tabla 11 Porcentaje de remoción del cobre en función del pH y voltaje	54
Tabla 12 Porcentaje de remoción del níquel en función del pH y voltaje	55
Tabla 13 Porcentaje de remoción del zinc en función del pH y voltaje	56
Tabla 14 Resultados de la turbidez en función del voltaje y tiempo, a pH 6	57
Tabla 15 Resultados de la turbidez en función del voltaje y tiempo, a pH 8	60
Tabla 16 Resultados de la turbidez en función del voltaje y tiempo a pH 10	60
Tabla 17 Prueba de normalidad para el pH (Shapiro – Wilk)	64
Tabla 18 Prueba de normalidad para el voltaje (Shapiro – Wilk)	64
Tabla 19 Análisis de varianza para el porcentaje de remoción del cromo	66
Tabla 20 Coeficientes de regresión para el porcentaje de remoción del cromo	66
Tabla 21 Análisis de varianza para el porcentaje de remoción del cobre	70
Tabla 22 Coeficientes de regresión para el porcentaje de remoción del cobre	70
Tabla 23 Análisis de varianza para el porcentaje de remoción del níquel	74
Tabla 24 Coeficientes de regresión para el porcentaje de remoción del níquel	74
Tabla 25 Análisis de varianza para el porcentaje de remoción del zinc	78
Tabla 26 Coeficientes de regresión para el porcentaje de remoción del zinc	78
Tabla 27 Resultados de la concentración de metales pesados de los efluentes galvánicos tratados	91
Tabla 28 Resultados de los porcentajes de remoción del tratamiento de efluentes galvánicos mediante la electrocoagulación	92

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Contaminantes de importancia en el tratamiento de las aguas residuales	10
Figura 2 Procesos Unitarios según la etapa de tratamiento de las aguas residuales	11
Figura 3 Sistema de electrocoagulación	12
Figura 4 Esquema de investigación	31
Figura 5 Esquema de la celda electrolítica en continuo	34
Figura 6 Diseño del reactor electrolítico continuo	35
Figura 7 Distribución en paralelo monopolar de electrodos	36
Figura 8 Reactor de electrocoagulación en continuo con electrodos en paralelo monopolar	36
Figura 9 Corte de ánodos de hierro	37
Figura 10 Conductímetro HI98312 Hanna Instruments	39
Figura 11 pH-conductivity Benchtop Orion 4	39
Figura 12 Rectificador automático de corriente Fasel	40
Figura 13 Turbidímetro HI 93703 Hanna Instruments	40
Figura 14 Multitester de corriente AC/DC Kyoritsu Kew Snap 2046R	41
Figura 15 Celda electrolítica con electrodos y conectores	41
Figura 16 pH-metro HI981028 Hanna Instruments	42
Figura 17 Muestra patrón de agua residual	43
Figura 18 Electrodos con disposición paralelo monopolar	43
Figura 19 Fuente de energía con variación de voltaje y amperaje	44
Figura 20 Celda de electrocoagulación en operación tratamiento de efluentes	44
Figura 21 Recolección de muestras a analizar de cada operación	45
Figura 22 Lectura del valor del pH	45
Figura 23 Lectura de la turbidez	46
Figura 24 Muestras patrón, muestra en reposo una hora y muestra filtrada	46
Figura 25 Remoción de metales Cu, Ni, Cr y Zn en función al pH y voltaje	52
Figura 26 Porcentaje de remoción del cromo en función del pH y voltaje	54
Figura 27 Porcentaje de remoción del cobre en función del pH y voltaje	55
Figura 28 Porcentaje de remoción del níquel en función del pH y voltaje	56
Figura 29 Porcentaje de remoción del zinc en función del pH y voltaje	57
Figura 30 Variación de la turbidez en función del voltaje y tiempo	58

Figura 31 Porcentaje de remoción de la turbidez en función del voltaje y tiempo, a pH 6	58
Figura 32 Variación de la turbidez en función del voltaje y tiempo, a pH 8	59
Figura 33 Porcentaje de remoción de la turbidez en función del voltaje y tiempo, a pH 8	60
Figura 34 Variación de la turbidez en función del voltaje y tiempo, a pH 10	61
Figura 35 Porcentaje de remoción de la turbidez en función del voltaje y tiempo, a pH 10	61
Figura 36 Efectos principales para la remoción del cromo	67
Figura 37 Superficie de respuesta para la remoción del cromo	68
Figura 38 Diagrama de Pareto estandarizado para la remoción del cromo	69
Figura 39 Efectos principales para la remoción del cobre	71
Figura 40 Superficie de respuesta para la remoción del cobre	72
Figura 41 Diagrama de Pareto estandarizado para la remoción del cobre	72
Figura 42 Efectos principales para la remoción del níquel	75
Figura 43 Superficie de respuesta para la remoción del níquel	76
Figura 44 Diagrama de Pareto estandarizado para la remoción del níquel	77
Figura 45 Efectos principales para la remoción del zinc	79
Figura 46 Superficie de respuesta para la remoción del zinc	80
Figura 47 Diagrama de Pareto estandarizado para la remoción del zinc	81
Figura 48 Gráfico de hipótesis de normalidad - remoción del cromo	93
Figura 49 Gráfico de dispersión de residuos vs. Valores predichos - la remoción del cromo	93
Figura 50 Gráfico de hipótesis de normalidad - remoción del cobre	94
Figura 51 Gráfico de dispersión de residuos vs. Valores predichos - la remoción del cobre	94
Figura 52 Gráfico de hipótesis de normalidad - remoción del níquel	95
Figura 53 Gráfico de dispersión de residuos vs. Valores predichos - la remoción del níquel	95
Figura 54 Gráfico de hipótesis de normalidad - remoción del zinc	96
Figura 55 Gráfico de dispersión de residuos vs. Valores predichos - la remoción del zinc	96
Figura 56 Presentación de celda de electrocoagulación (EC)	100
Figura 57 Pegado de láminas laterales de acrílico de celda de EC	100
Figura 58 Pegado de láminas de acrílico en celda de EC	100
Figura 59 Electrodo de hierro para la celda de EC	100
Figura 60 Completando electrodos en celda de EC	100
Figura 61 Celda de electrocoagulación en construcción	100
Figura 62 Celda de electrocoagulación con el rectificador de corriente DC	101
Figura 63 Celda de EC en operación inicial – ingreso de efluentes	101
Figura 64 Sistema de EC completo para tratamiento de agua residual	101
Figura 65 Celda de EC con disposición monopolar en paralelo de electrodos	101
Figura 66 Control de amperaje en el proceso de electrocoagulación	101
Figura 67 Equipo de electrocoagulación completo	101
Figura 68 Tratamiento de efluentes a pH6 y 60V	102
Figura 69 Tratamiento de efluentes a pH6 y 65V	102
Figura 70 Tratamiento de efluentes a pH6 y 70V	102

INDICE DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A Resultados de remoción de metales pesados en efluentes tratados	91
ANEXO B Validación de los supuestos para el análisis de varianza (ANOVA)	93
ANEXO C Coeficientes de correlación múltiples variables dependientes	97
ANEXO D Ficha de observación	98
ANEXO E Matriz de Consistencia	99
ANEXO F Fotografías	100

NOMENCLATURA

AC/DC	Corriente Alterna / Corriente Continua.
ANOVA	Análisis de varianza (por sus siglas en ingles ANalysis Of VAriance).
A/m²	Densidad de corriente amperios por metro cuadrado.
AOX:	Compuestos Orgánicos halogenados (resultado reacción de sustancias orgánicas).
COT	Carbono orgánico total
DBO:	Demanda Bioquímica de Oxígeno.
DBO5	suele representar el 60-70 % de la DBO.
DBO5s:	Demanda bioquímica de oxígeno soluble (excluida la respectiva de los sólidos).
DQO:	Demanda Química de Oxígeno total.
EC	Electrocoagulación.
EPS	Empresa Prestadora de Servicios.
FTU	Unidad de medida de turbidez (Unidad de Turbidez de la Formazina).
H₀	Hipótesis nula.
H₁	Hipótesis alterna.
INACAL	Instituto Nacional de la Calidad.
L	litros, unidad de volumen.
mm	milímetros, unidad de distancia.
NTP	Norma Técnica Peruana.
SDT:	Sólidos disueltos totales.
SST:	Sólidos en suspensión totales.
OEFA	Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental.
pH:	Grado de acidez de una solución.
V:	voltios, unidad de medida de tensión.

RESUMEN

Los procesos de tratamientos de superficies tienen una gran importancia en todas las esferas de la economía y nuestra sociedad, ya que estos garantizan protección anticorrosiva y una alta durabilidad, pero también son generadores de efluentes con alta carga de contaminantes, sobre todo de metales pesados como el cromo, cobre, níquel y zinc que de acuerdo con su concentración causan daños irreversibles al medio ambiente y a la salud si son vertidos directamente al alcantarillado. El objetivo de esta investigación fue reducir la carga final de metales pesados (Cu, Cr, Ni y Zn) en las aguas residuales de la industria galvánica mediante la tecnología de la electrocoagulación. Se construyó un reactor tipo continuo para el tratamiento de efluentes galvánicos, con una capacidad de 8.5 litros, electrodos de hierro con una separación de 10 mm entre ellos y un caudal de 1 L/min. Se estableció dos variables independientes a evaluar, pH y voltaje. Se utilizaron los niveles de 6, 8 y 10 para el pH y 60, 65, 70 y 75 voltios para el voltaje. Los resultados experimentales demostraron una disminución en la concentración final con porcentajes de remoción que alcanzaron el 94.5% en cromo, 98.8% en cobre, 95.2% en níquel y 99.3% en zinc, el rango de voltaje con los valores más altos de remoción, de acuerdo con cada metal pesado a reducir, fue entre 65 a 75 voltios, siendo el pH 6 donde se obtuvieron las mejores condiciones para el tratamiento de aguas residuales.

Palabras claves: *Electrocoagulación, efluentes industriales, aguas residuales, remoción metales pesados.*

ABSTRACT

Surface treatment processes are of great importance in all spheres of the economy and our society, but they are also generators of effluents with a high load of pollutants, as they guarantee anticorrosive protection and high durability, but they are also generators of effluents with a high load of pollutants, especially heavy metals such as chromium, copper, nickel and zinc which, depending on their concentration, cause irreversible damage to the environment and the health if they are discharged directly into the sewage system. The aim of this research was to reduce the final load of heavy metals (Cu, Cr, Ni and Zn) in the wastewater of the galvanic industry through electrocoagulation technology. A continuous type of reactor was built for the treatment of galvanic effluents, with a capacity of 8.5 liters, iron electrodes with a separation of 10 mm between them and a flow rate of 1 L/min. Two independent variables were established to be evaluated, pH and voltage. Levels of 6, 8 and 10 for pH and 60, 65, 70 and 75 volts for voltage were used. The experimental results showed a decrease in the final concentration with removal percentages reaching 94.5% in chromium, 98.8% in copper, 95.2% in nickel and 99.3% in zinc, the voltage range with the highest removal values, of According to each heavy metal to be reduced, it was between 65 to 75 volts, being pH 6 where the best conditions for wastewater treatment were obtained.

Keywords: Electrocoagulation, industrial effluents, wastewater, heavy metal removal.

INTRODUCCIÓN

Situación Problemática

Alrededor del mundo, lagos, ríos, mares, y otros cuerpos con agua son contaminados por descargas industriales, que se vierten al agua sin tratamiento alguno, llegando a niveles altos de contaminación.

Los procesos de tratamientos de superficies tienen una gran importancia en todas las esferas de la economía y la sociedad, ya que estos garantizan como recubrimientos protectores anticorrosivos una alta durabilidad a: maquinarias, conductores de fluidos, estructuras, transportes, equipos domésticos e industriales entre otros, además de propiciar una estética agradable. Esta actividad, produce fundamentalmente efluentes líquidos de dos tipos; por un lado, aparecen cargas contaminantes altas, en volúmenes relativamente pequeños, de los efluentes generados en los baños de proceso, y por otro, efluentes con cargas contaminantes diluidas en grandes volúmenes de agua, de los efluentes procedentes de los enjuagues o lavados (Chávez, 2009, p. 39-50).

La galvanoplastia es una de las principales industrias que causan mayor contaminación al agua (Milanez et al., 2005), ya que los residuos generados son potencialmente contaminantes, encontrándose conformados mayoritariamente por metales pesados tales como zinc, cobre, níquel, cromo y cadmio (Acosta et al., 2013).

Ante tales desafíos comenzó la preocupación por dar solución a la problemática ambiental, sobre todo dando mucha importancia al tratamiento de residuales. Es así como las actividades de los diferentes sectores industriales se ven en la obligación de evitar o minimizar los impactos negativos al ambiente (Restrepo et al., 2006, Acosta et al., 2013), ya

sea a través de la implementación de prácticas de prevención de la contaminación o del tratamiento de aguas residuales antes de ser vertidos al medio ambiente (Chávez et al., 2009, Acosta et al., 2013).

Esta potencialidad contaminante tiene su justificación al considerar los volúmenes de agua utilizados en los procesos, sobre todo en los de lavado o enjuague que presentan contaminantes en descargas continuas.

Formulación del Problema

Actualmente la mayoría de las industrias de tratamiento de superficies, también conocidas como industrias galvánicas, vierten directamente sus residuos a los distintos medios receptores agua, aire y suelo. El producto residual no es tratado una vez generado al final del proceso, y esto supone un grave riesgo para la salud y el medio ambiente debido a que metales como Cu, Zn, Pb, Ni, Cr y otros pueden ser fácilmente absorbidos por peces y vegetales debido a su alta solubilidad en los medios acuáticos, por lo que pueden acumularse en el cuerpo humano a través de la cadena alimenticia. Los compuestos de cromo (VI) han sido asociados con cáncer al pulmón en trabajadores y han causado cáncer en animales (ATSDR 2008). Lo que se hace es trasladar la contaminación (residuos, emisiones y vertidos) de un medio a otro (Cardona, 2007).

Surge entonces la necesidad de dar un tratamiento a los productos residuales, de manera que el impacto sobre el medio ambiente pueda reducirse. En el sector de la galvanotecnia, donde se generan gran cantidad de residuos tóxicos y peligrosos procedentes fundamentalmente del lavado de las líneas galvánicas y de los baños agotados, se ha enfatizado la introducción de mejoras en los procesos encaminadas a la minimización y valorización de residuos (Sáez, 2010).

Es así como la electrocoagulación se comporta como un proceso que emplea los fundamentos de la electroquímica, la coagulación y flotación o precipitación, para eliminar los contaminantes del agua (Holt et al., 2006, Acosta et al., 2013).

La descontaminación electroquímica es el resultado de la combinación de varios procesos, aún en discusión (Willmot, 1998; Panizza y Cerisola, 2004), que pueden

resumirse en: electroreducción, electrooxidación, electrocoagulación y electroflotación (Lavorante, 2011).

El uso de esta clase de tecnología implica utilizar un reactor de electrocoagulación, este equipo se puede considerar como una celda electrolítica cuyos elementos conductores de corriente o electrodos, son sumergidos en el fluido a tratar, que contiene los metales o sustancias que van a ser retirados (Tchamango et al., 2010, Acosta et al., 2013) y que es aprovechado como medio electrolítico (Ashraf et al., 2010; Zhao et al., 2011, Acosta et al., 2013).

En estos tiempos de cambio y responsabilidad ambiental, algunas empresas apuestas su crecimiento aplicando tecnologías emergentes para el tratamiento de sus efluentes industriales, primero para el cumplimiento de las normas ambientales y segundo para la reutilización de las aguas residuales tratadas debido a que este tipo de industrias utiliza fuertes cantidades de agua en sus procesos, sobre todo en las etapas de enjuagues.

Por ello, este trabajo busca establecer un tratamiento, de las aguas residuales generadas en los procesos de recubrimiento galvánicos, mediante la técnica de electrocoagulación, cuya aplicación en el país es de muy poca presencia, y generar que esta tecnología, debido a los costos y ventajas que ofrece, vaya ocupando los espacios que las tecnologías tradicionales irán dejando.

Problema General

¿En qué medida la electrocoagulación reducirá el contenido de metales pesados en los efluentes galvánicos?

Problemas Específicos

- ¿Cómo influyen los parámetros de operación del proceso de electrocoagulación: el voltaje y el pH en la reducción de la concentración de los metales pesados en los efluentes galvánicos?
- ¿Cuál es la eficiencia de remoción de los metales pesados, con el proceso de electrocoagulación, en el tratamiento de los efluentes galvánicos?

Justificación de la Investigación

Las operaciones galvánicas, absolutamente necesarias en el sector del metal, son susceptibles de generar importantes impactos ambientales, derivados principalmente de la elevada toxicidad de los productos químicos que utiliza, y cuya gestión y tratamiento es clave para la conservación del medio ambiente (Ribera F. 2006).

Esta potencialidad contaminante tiene su justificación al considerar los volúmenes de agua utilizados en los procesos, sobre todo en los de lavado o enjuague que presentan contaminantes en descargas continuas.

Esta actividad industrial genera hasta un 90% de sustancias descartadas a través de las aguas residuales, quedando solo el 10% de éstas depositadas tras el recubrimiento de los diferentes productos terminados (Morales, 2011).

La insuficiente atención y control de los problemas ambientales generados por la actividad galvánica es una de las carencias más importantes del que hacer ambiental nacional.

En todo este contexto, existen tecnologías convencionales y tecnologías emergentes que proponen alternativas de reducción de contaminantes y obtener efluentes tratados. Las tecnologías convencionales, por lo general, son costosas, requieren mucho espacio y consumen grandes cantidades de productos químicos que generan grandes volúmenes de lodos residuales (Franco, 2017). Hoy en día existen una serie de tecnologías emergentes que están basadas en la electroquímica y que actualmente se presentan como alternativas competitivas frente a las tecnologías tradicionales (Morales, 2011). Se puede mencionar en este grupo la electrocoagulación (Restrepo, Arango, 2006). Este es un proceso simple y eficiente donde el agente de floculación se genera por electro oxidación de un ánodo de sacrificio, generalmente hecho de hierro o aluminio. En este proceso, el tratamiento se realiza sin añadir ningún agente químico coagulante o floculante, de tal manera que se reduce así la cantidad de los lodos que se deben eliminar (Acosta G., Bourdón A. 2013).

El presente trabajo de investigación se justifica por proponer la tecnología de electrocoagulación, basada en la electroquímica, como una alternativa viable, en la

disminución del contenido de metales pesados de los efluentes galvánicos y cumplir con las normativas ambientales vigentes en el país.

Objetivos

Objetivo General

Reducir el contenido de metales pesados en los efluentes galvánicos, mediante la electrocoagulación.

Objetivos Específicos

Objetivo Específico 1. Determinar los valores de los parámetros de electrocoagulación que influyen en la mayor reducción de la concentración de los metales pesados, como son: voltaje y pH.

Objetivo Específico 2. Determinar el porcentaje de remoción de los metales pesados en los efluentes galvánicos tratados.

Hipótesis y Variables

Hipótesis General

La aplicación del proceso de electrocoagulación reducirá la concentración de metales pesados en los efluentes galvánicos.

Hipótesis Específicas

Hipótesis Específica 1. El voltaje y el pH influirá en la reducción de la concentración de metales pesados con el proceso de electrocoagulación.

Hipótesis Específica 2. El proceso de electrocoagulación reducirá los metales pesados de los efluentes galvánicos.

MARCO TEÓRICO

Antecedentes de la Investigación

El sector de tratamiento de superficies está formado principalmente por empresas pequeñas y medianas, que desarrollan una actividad que tiene por objetivo modificar la estructura inicial de una superficie para proporcionarle unas condiciones de resistencia a los agentes externos o al desgaste, una estética determinada, etc.

Una característica importante es la gran variedad de productos químicos que se utilizan en los procesos y el tradicionalismo con el que se realizan algunos de los tratamientos de superficies.

Existen varias tecnologías de remediación que pueden ser utilizadas para tratar aguas con carga contaminante, por ejemplo, a través de intercambio iónico, ósmosis inversa, precipitación, adsorción y electrocoagulación (Abu Bkar et al. 2013).

Antecedente Internacional

La electrocoagulación ha sido objeto de estudio en diferentes partes del mundo por la remoción de metales pesados; En Turquía, Akbal y Camci (2011), llegaron a alcanzar remociones del 100% de Cu, 100% de Cr y 100% de Ni de efluentes galvánicos por electrocoagulación utilizando electrodos Fe-Al con configuraciones monopolares.

En México, Estrada A. (2014) obtuvo una remoción del cromo entre 98% a 99.9%, tratando efluentes galvánicos, trabajando a una densidad de corriente entre 56-222 A/m², aplicando un voltaje entre 15-25 voltios, con un tiempo de operación de 20-110 minutos y un pH óptimo de 5. En Grecia, Gatsios et al. (2015), eliminaron metales tóxicos (Cu, Mn y Zn), en agua industriales reales llegando a obtener 89% para Mn, 100% para Cu y 100% para Zn como porcentajes máximos de remoción, después de 90 minutos de tratamiento utilizando electrodos de hierro. En Serbia, Prica et al. (2015) llegó a obtener remociones

mayores al 80% para metales pesados como Cu, Zn y Ni de aguas residuales mediante tratamientos de electrocoagulación / flotación (Durante, 2016).

Kabdash *et al.* (2009), removieron Ni y Zn de aguas residuales procedentes del recubrimiento metálico, utilizaron un reactor con densidad de corriente de 2.25 a 9 mA/cm², 1.8 L de efluente industrial, 6 placas de acero monopolar distanciados por 3 mm, microprocesos de 2-4 minutos. La capacidad de eliminación del Ni se vio afectada por la disminución del pH inicial; eliminación del 20-66% de COT (carbono orgánico total) (Ferniza, 2017).

Antecedente Latinoamericano

En Latinoamérica, la electrocoagulación también fue objeto de estudio: En Colombia, destacan los trabajos de Morales y Acosta (2010), implementando para su evaluación, un sistema piloto de electrocoagulación para el tratamiento de agua residual de origen galvánico, obteniendo porcentajes mayores al 47% de remoción para Cr⁺⁶, Pb y Zn. Así mismo, en Colombia, García *et al.* (2014) aplicó la electrocoagulación en aguas contaminadas por mercurio, utilizando electrodos de fierro y aluminio, obteniendo una eliminación del 99% del contaminante.

En México, García *et al.* (2015) utilizando paneles solares como energía, utilizó la electrocoagulación para remover, de las aguas residuales industriales, obteniendo el 89% para el DQO, el 97% para el color, 91% para la turbidez y el 48% para el COT (carbono orgánico total).

Antecedente Nacional

En el ámbito nacional, tenemos los trabajos de Westres S. (2013) donde mediante la electrocoagulación a efluentes industriales de una planta productora de sulfatos de zinc, y a condiciones de proceso de 5 A/dm² y pH entre 6 a 9, logró reducir la turbidez de 36 NTU a 0.35 NTU en un proceso continuo utilizando electrodos de aluminio.

Cueva R. y Huaroc A. (2015) removieron el 99.29% para grasas y aceites, el 80% para DQO y 81.32% para DBO de las aguas residuales de una planta lechera, aplicando la electrocoagulación mediante la energía eólica.

Aguilar E. (2015), evaluó, en una celda de electrocoagulación a escala laboratorio, la eficiencia de la remoción del DQO de aguas residuales de la industria de pinturas, obteniendo un 87% para el DQO, en un tiempo de tratamiento de 15 minutos, una intensidad de corriente de 5 amperios y un pH de 7,12.

Poma J. y Quispe S. (2016) que, mediante la electrocoagulación en aguas residuales urbanas, obtuvieron porcentajes de remoción del 85,9% para DBO, 75,3% para DQO, 93,8% para aceites y grasas, 100% para coliformes totales y 98% para escherichia coli, entre otros.

Pérez L. (2018) en su Tesis "Uso de la electrocoagulación para reducir la carga de contaminantes en la planta de tratamiento de aguas residuales Ajeper-Huachipa 2017 II" obtiene porcentaje de remoción del 97% en DQO, 95% en SST y 92% en DBO5, para periodos de tiempo de 30 y 45 minutos, con una densidad de corriente de 5 A/cm², utilizando electrodos de aluminio y hierro a una distancia de electrodos de 20 mm.

Bases Teóricas

A continuación, tenemos los siguientes conceptos teóricos.

Aguas Residuales

Son aquellas aguas cuyas características originales han sido modificadas por actividades humanas y que por su calidad requieren un tratamiento previo, antes de ser reusadas, vertidas a un cuerpo natural de agua o descargadas al sistema de alcantarillado. (OEFA, 2014)

En esta investigación, se revisa con mayor énfasis la contaminación existente en las aguas residuales industriales de origen galvánico que ha generado preocupación en los últimos años, debido a su alto contenido de contaminantes metálicos que conlleva a un problema ambiental.

Aguas Residuales Domésticas

Las aguas residuales domesticas provienen de áreas residenciales y de actividades de tipo doméstico, de establecimientos comerciales y de instituciones tales como hospitales, escuelas, universidades, edificios, etc. Estas se originan básicamente en la cocina, baños y la lavandería, independientemente hay actividades en estos establecimientos e instituciones

que generan aguas residuales catalogables como industriales y hasta tóxicos. (Aguilar, 2015, p.10)

Aguas Residuales Industriales

Las aguas residuales industriales las constituyen los desechos líquidos provenientes de una fábrica o empresa que produce cualquier clase de material o artículo sometido a oferta y demanda en el mercado y son diferentes de las aguas de suministros utilizadas por el establecimiento en sus procesos de producción. Aquí pueden incluirse algunas corrientes generadas en el comercio y los hospitales o similares. (Aguilar, 2015, p.10)

Aguas Residuales Municipales

Son aquellas aguas residuales domésticas que pueden estar mezcladas con aguas de drenaje pluvial o con aguas residuales de origen industrial previamente tratadas, para ser admitidas en los sistemas de alcantarillado de tipo combinado. (OEFA, 2014)

En el Perú, uno de los principales problemas asociados a las aguas residuales es el déficit de cobertura por Entidades Prestadoras de Servicios de Saneamiento (EPS Saneamiento) a nivel nacional. De las 50 EPS Saneamiento que brindan el servicio de alcantarillado, sólo se brinda cobertura al 69,65% de la población urbana. La población no cubierta vierte directamente sus aguas residuales sin tratamiento al mar, ríos, lagos, quebradas o, las emplean para el riego de cultivos. (OEFA, 2014)

Contaminantes de Importancia en el Agua Residuales

El agua residual contiene muchos contaminantes, para su determinación existen métodos de análisis cuantitativos los que sirven para hallar la composición química del agua residual, así como análisis cualitativos para conocer las características físicas y biológicas. (Aguilar, 2015, p. 11). En la Figura 1, resumimos estos contaminantes.

Figura 1

Contaminantes de importancia en el tratamiento de las aguas Residuales

Contaminantes	Razón de la importancia
Sólidos en Suspensión	Los sólidos en suspensión pueden dar lugar al desarrollo de depósitos de fango y de condiciones anaerobias cuando se vierte agua residual sin tratar al entorno acuático.
Materia orgánica biodegradable	Compuesta principalmente por proteínas, carbohidratos, grasas animales, la materia orgánica biodegradable se mide, en la mayoría de las ocasiones, en función de la DBO (demanda bioquímica de oxígeno) y de la DQO (demanda química de oxígeno).
Patógeno	Pueden transmitirse enfermedades contagiosas por medio de los organismos patógenos presentes en el agua residual.
Nutrientes	Tanto el nitrógeno como el fósforo, junto con el carbono, son nutrientes esenciales para el crecimiento. Cuando se vierten al entorno acuático, estos nutrientes pueden favorecer el crecimiento de una vida acuática no deseada. Cuando se vierten al terreno en cantidades excesivas, también pueden provocar la contaminación del agua subterránea.
Contaminantes prioritarios	Son compuestos orgánicos o inorgánicos determinados en base a su carcinogenicidad, mutagenicidad, teratogenicidad o toxicidad aguda conocida o sospechada. Muchos de estos compuestos se hallan presentes en el agua residual.
Materia orgánica refractaria	Esta materia orgánica tiende a resistir los métodos convencionales de tratamiento. ejemplos típicos son los agentes tenso activos, los fenoles y los pesticidas agrícolas.
Metales pesados	Los metales pesados son, frecuentemente, añadidos al agua residual en el curso de ciertas actividades comerciales e industriales, y puede ser necesario eliminarlos si se pretende reutilizar el agua residual
Sólidos inorgánicos disueltos	Los constituyentes inorgánicos tales como el calcio, sodio y los sulfatos se añaden al agua de suministro como consecuencia del uso del agua y es posible que se deban eliminar si se va a reutilizar el agua residual.

Nota. Adaptado de Ingeniería de Aguas Residuales, tratamiento, vertido y reutilización (p. 653) por Metcalf & Eddy, 1996, Mc Graw Hill.

Tratamiento de Aguas Residuales Industriales

Para la reducción de la contaminación de aguas residuales existen procesos físicos, químicos y biológicos, estos de acuerdo con las necesidades del efluente, se pueden utilizar de forma individual o combinados. El tratamiento de agua se puede subdividirse en cuatro etapas: preliminares (etapa de pre-tratamiento), tratamientos primarios (clarificación), tratamientos secundarios (desinfección) y tratamientos terciarios (acondicionamiento

químico). En la figura 2, se muestra las operaciones o procesos unitarios descritos. (Metcalf & Eddy, 1996)

Figura 2

Procesos Unitarios según la etapa de tratamiento de las aguas Residuales

Tipo de tratamiento	Operaciones o procesos unitarios
Preliminares	Dilaceración, desbaste, filtración, flotación, remoción por gravedad, tanque Imhoff, filtración por membrana, remoción de grasas y aceites, tamizado grueso y fino y micro tamizado.
Primarios	Tamizado, sedimentación primaria
Secundarios	Lodos activados, reactores de lecho fijo, sistemas de lagunaje, sedimentación secundaria, deshidratación.
Terciarios	Coagulación química, floculación, sedimentación seguida de filtración y carbón activado. Intercambio iónico, osmosis inversa, electrocoagulación.

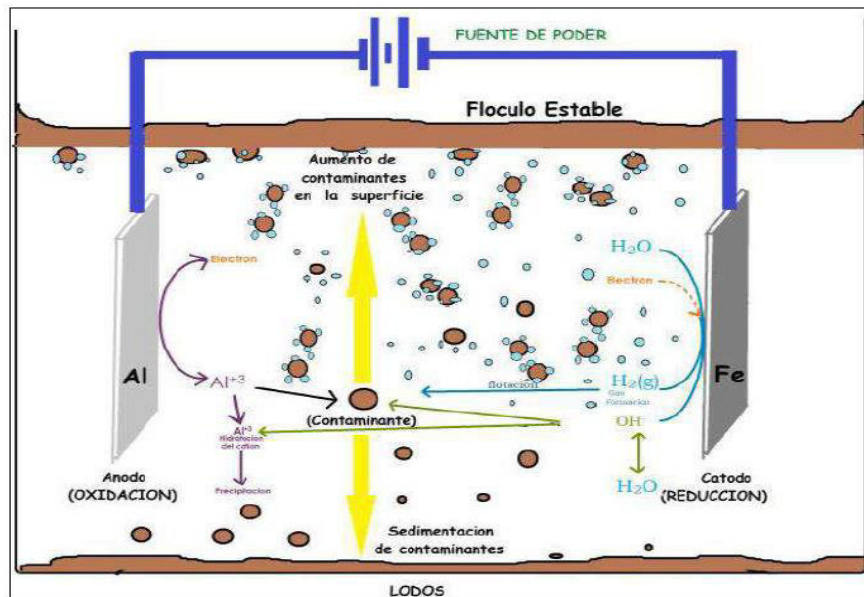
Nota. Adaptado de Ingeniería de Aguas Residuales, tratamiento, vertido y reutilización (p. 259) por Metcalf & Eddy, 1996, Mc Graw Hill.

Electrocoagulación

La Electrocoagulación es una técnica utilizada para el tratamiento de las aguas residuales. Los diversos contaminantes que se desechan como efluente de los distintos procesos productivos son removidos por aplicación del principio de coagulación, pero en este caso no se hace el uso de coagulante químico; la función de coagulación la lleva a cabo la corriente eléctrica que es aplicado al medio líquido contaminado (Restrepo, 2006). En la figura 3 se muestra un sistema de electrocoagulación.

Figura 3.

Sistema de Electrocoagulación



Nota. Adaptado de Evaluación de la eficiencia de una celda de electrocoagulación a escala laboratorio para el tratamiento de agua. E. Aguilar, 2015, Tesis para optar Grado Académico de Magister. UNMSM Lima.

En el proceso de electrocoagulación hay generación de coagulantes in situ por la disolución de iones de aluminio o de hierro de los electrodos de aluminio o hierro respectivamente. La generación de iones metálicos tiene lugar en el ánodo y en el cátodo hay liberación de burbujas de hidrógeno gaseoso las cuales ayudan a la flotación de las partículas floculadas, las mismas que serán retiradas posteriormente (Arango, 2005).

Podemos definir la Electrocoagulación como un proceso en el cual son desestabilizadas las partículas de los contaminantes que se encuentran suspendidas, emulsionadas o disueltas en el efluente induciendo corriente eléctrica a través de placas metálicas (electrodos) dispuestas de forma tal que la corriente sea uniformemente repartida por el efluente a tratar, en nuestro caso utilizaremos el Hierro como cátodo y ánodo; ya que este metal cumple eficientemente la función de transmitir la corriente eléctrica en el efluente,

además que su costo de reposición es bajo, a comparación de otros materiales (Restrepo, 2006, p.65).

La electrocoagulación (EC) utiliza una corriente eléctrica a través de electrodos (Hierro o aluminio) produciendo iones positivos. Estos iones neutralizan las cargas iónicas presentes en los contaminantes. Una vez neutralizadas las cargas iónicas, se obtienen compuestos eléctricamente estables que, obedeciendo a las fuerzas de Van der Waals, comienzan a atraerse entre sí. Esto genera partículas cada vez más grandes (700nm) que, por diferencia de densidades tienden a flotar o por gravedad se precipitan, haciendo posible su remoción por precipitación y/o filtración (Chávez, 2009).

La corriente eléctrica proporciona la fuerza electromotriz, que provoca una serie de reacciones químicas, cuyo resultado final es la desestabilización de las partículas contaminantes, las cuales poseen carga superficial negativa que impiden que las partículas se aproximen unas a otras, logrando así la formación de óxidos y/o complejos. Por lo general este estado produce partículas sólidas menos coloidales y emulsionadas o solubles. Cuando esto ocurre los contaminantes llegan a formar componentes hidrofóbicos, que bien precipitan o flotan, facilitando la remoción por métodos de separación secundarios. Los iones metálicos se liberan y dispersan en el medio líquido y tienden a formar óxidos metálicos que atraen eléctricamente a los contaminantes que han sido desestabilizados (Restrepo et al, 2006, p.66).

Etapas de la Electrocoagulación

Según Mollah et al, 2004 el proceso de electrocoagulación sigue las siguientes etapas:

1. Formación de Coagulantes por oxidación electrolítica del electrodo de sacrificio. Inicialmente se da la corrosión electroquímica del metal producto del paso de corriente eléctrica por el sistema. El metal se desprende en forma de cationes desde la superficie del ánodo de sacrificio, mientras que en la superficie del cátodo se puede dar la hidrólisis del agua, obteniendo como producto iones hidroxilo e hidrógeno gaseoso. Los

iones de hidroxilos (formados o presentes en el agua residual) reaccionan para formar complejos metálicos de características diferentes.

2. Desestabilización de los Contaminantes, partículas suspendidas y rompimiento de la emulsión. Las partículas coloidales se desestabilizan debido a la compresión de su doble capa difusa, este fenómeno se da por la interacción de las partículas con los complejos metálicos formados anteriormente. Estos complejos metálicos también favorecen la neutralización de cargas presentes en el agua residual y la reducción de la repulsión electrostática entre los coloides, dando paso al proceso de coagulación.

3. Coagulación de las fases desestabilizadas para formar flóculos. El proceso de coagulación da paso a la formación de redes que atrapan las partículas coloidales presentes *en el agua residual*.

Mecanismos de las Reacciones Químicas en el Proceso de Electrocoagulación

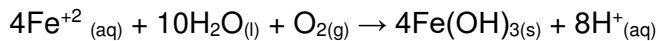
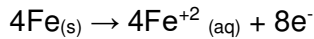
Restrepo et al., (2006) afirma que “Durante la electrólisis ocurren una serie de procesos físicos y químicos que permiten la remoción de los contaminantes, los cuales se pueden describir de la siguiente manera” (p. 65):

El lado positivo sufre reacciones anódicas, mientras que el negativo sufre reacciones catódicas. Las placas de metal, tales como hierro o aluminio son utilizadas como electrodo de sacrificio o placa consumible que aporta iones al sistema. Estos iones liberados neutralizan las cargas de las partículas desestabilizando los sistemas de suspensión de los contaminantes iniciando la coagulación. Los iones liberados remueven cualquier contaminante, bien sea por reacción química y precipitación o agregando materiales coloidales que bien pueden flotar o precipitarse. Además, como el agua contiene partículas coloidales, aceites u otros contaminantes, éstos se mueven a través del campo eléctrico aplicado y pueden ionizarse, sufrir reacciones de electrólisis o de hidrólisis o formar radicales libres que alteran las propiedades físicas y químicas del agua y de los contaminantes, resultando en un estado reactivo y excitado lo cual es causa de la liberación, destrucción o insolubilidad de los contaminantes. (Mollah, 2001).

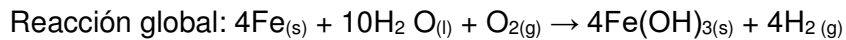
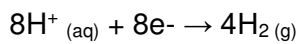
Para el caso en el cual el hierro actúa como ánodo, se han propuesto dos mecanismos que explican la formación in situ de dos posibles coagulantes. Estos pueden ser hidróxido ferroso $\text{Fe}(\text{OH})_2$ o hidróxido férrico $\text{Fe}(\text{OH})_3$ (Restrepo et al., 2006, p. 66).

Mecanismo 1: Formación del hidróxido férrico

En el ánodo ocurren las siguientes reacciones:

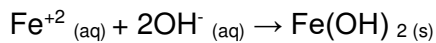
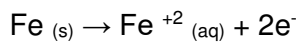


En el cátodo ocurre la reacción:

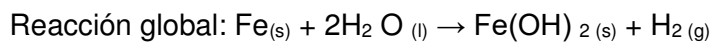
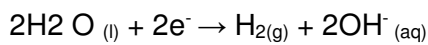


Mecanismo 2: Formación del hidróxido ferroso

En el ánodo se dan las reacciones:



En el cátodo:

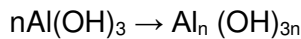
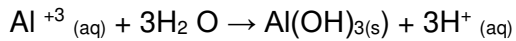


Luego de la formación de los hidróxidos de hierro los coloides se aglomeran, especialmente aquellos con carga negativa, y posteriormente otras partículas de contaminantes interactúan con estos aglomerados, siendo removidos por formación de complejos o atracciones electrostáticas.

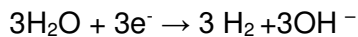
Cuando el aluminio actúa como ánodo las reacciones son las siguientes: (Restrepo et al., 2006, p.67)

En el ánodo:





En el cátodo:



Los iones Al^{+3} en combinación con los OH^- reaccionan para formar algunas especies monoméricas como $\text{Al}(\text{OH})_2^+$, $\text{Al}_2(\text{OH})_2^+$, $\text{Al}(\text{OH})_2^+$, y otras poliméricas, tales como $\text{Al}_6(\text{OH})_{15}^{3+}$, $\text{Al}_7(\text{OH})_{17}^{4+}$, $\text{Al}_8(\text{OH})_{20}^{4+}$, $\text{Al}_{13}\text{O}_4(\text{OH})_{24}^{7+}$ y $\text{Al}_{13}(\text{OH})_{34}^{5+}$ que por procesos de precipitación forman el $\text{Al}(\text{OH})_{3(\text{s})}$, como se muestra en la reacción de ánodo. El $\text{Al}(\text{OH})_{3(\text{s})}$ es una sustancia amorfa de carácter gelatinoso, que expone una gran área superficial con propiedades absorbentes y que es propicia para los procesos de adsorción y atracción de las partículas contaminantes. (Restrepo et al., 2006, p. 67)

En un proceso electroquímico se producen simultáneamente 6 reacciones básicas entre dos electrodos y la solución electrolítica.

- Oxidación: Se proporcionan electrones al ánodo para oxidar las impurezas presentes en la solución.
- Reducción: Se captan electrones por el cátodo para reducir las impurezas (el negativo reduce)
- Electroforesis: Los iones con carga positiva se mueven del ánodo al cátodo; mientras que los iones con carga negativa se mueven desde el cátodo al ánodo.
- Ataque electroquímico: Si el ánodo está hecho de un metal barato, el ánodo se somete a una ionización de modo de oxidación para liberar cationes.
- Electrolisis: El agua se gasifica, se descompone en hidrogeno y oxígeno.
- Polarización: Las moléculas y las impurezas del agua se polarizan en respuesta a la aplicación del campo eléctrico, de forma que los iones con carga negativa se acumulan en el ánodo y los de carga positiva en el cátodo.

Factores que Afectan al Proceso de Electrocoagulación

El proceso de electrocoagulación es afectado por diferentes factores. Entre los más importantes se encuentran la naturaleza y concentración de los contaminantes, el pH del agua residual y la conductividad. Estos factores determinan y controlan las reacciones ocurridas en el sistema y la formación del coagulante. (Restrepo et al., 2006, p.66)

pH. El pH influye sobre la eficiencia de la corriente en el proceso de solubilidad del metal para formar hidróxido. Se ha observado en diferentes investigaciones que el pH varía durante el proceso de electrocoagulación, y esta variación es dependiente del material de los electrodos y del pH inicial del agua a tratar. El pH durante el proceso puede incrementarse para aguas residuales ácidas, efecto atribuido a la generación de hidrógeno molecular que se origina en el cátodo. En contraposición, en aguas residuales alcalinas el pH puede decrecer y, dependiendo de la naturaleza del contaminante, el pH influye sobre la eficiencia del proceso. (Restrepo et al., 2006, p. 70).

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. (Restrepo et al., 2006, p. 71).

El suministro de corriente al sistema de electrocoagulación determina la cantidad de iones liberados por los respectivos electrodos.

En general un aumento de la densidad de corriente genera un aumento en la remoción de contaminante. Una densidad de corriente demasiado grande produciría una disminución significativa en la eficacia. La selección de la densidad de corriente podría realizarse teniendo en cuenta otros parámetros de operación, como pH y temperatura. (Restrepo et al., 2006, p. 71).

Temperatura. Los efectos de la temperatura sobre la electrocoagulación no han sido muy investigados, pero se ha encontrado que la eficiencia en la corriente se incrementa inicialmente hasta llegar a 60° C, punto donde se hace máxima para luego decrecer. El incremento de la eficiencia con la temperatura es atribuido al incremento en la actividad de destrucción de la película de óxido de aluminio de la superficie del electrodo. (Restrepo et al., 2006, p. 72).

Conductividad. Cuando la conductividad del agua a tratar no es elevada, es frecuente la adición de un electrolito soporte para aumentar su valor, consiguiéndose así una disminución en el potencial de la celda y, por tanto, un ahorro energético considerable. Una de las sales más empleadas para este fin es el cloruro sódico, ya que se ha determinado que los iones cloruro pueden contrarrestar los efectos negativos de aniones como el HCO_3^- y el SO_4^{2-} . En este sentido, la existencia de iones bicarbonato y sulfato en el agua a tratar puede conducir a la precipitación de iones Ca^{2+} y Mg^{2+} , y a la formación de una capa aislante en la superficie de los electrodos, que podría ocasionar un aumento en el potencial de la celda. (Chen, 2004, p. 17).

Ventajas y Desventajas de la Electrocoagulación

Ventajas. Son muchas las ventajas de la electrocoagulación. Entre las más relevantes están (Mollah, 2004, p. 4):

- Los costos de operación son menores comparativamente con los de procesos convencionales usando polímeros.
- Requiere de equipos simples y de fácil operación.
- Elimina requerimientos de almacenamiento y uso de productos químicos.
- Genera lodos más compactos y en menor cantidad, lo que involucra menor problemática de disposición de estos lodos.
- Produce flóculos más grandes que aquellos formados en la coagulación química y contienen menos agua ligada.

- Alta efectividad en la remoción de un amplio rango de contaminantes.
- Purifica el agua y permite su reciclaje.
- El paso de la corriente eléctrica favorece el movimiento de las partículas de contaminante más pequeñas, incrementando la coagulación.
- Reduce la contaminación en los cuerpos de agua.
- El agua tratada por electrocoagulación contiene menor cantidad de sólidos disueltos que aquellas tratadas con productos químicos,
- Situación que disminuye los costos de tratamiento de estos efluentes en el caso de ser reusados.
- Puede generar aguas potables, incoloras e inodoras.
- Los contaminantes son arrastrados por las burbujas a la superficie del agua tratada, donde pueden ser removidos con mayor facilidad.

Desventajas. Las principales desventajas del proceso de electrocoagulación son (Mollah M. 2004, p. 4):

- Es necesario reponer los electrodos de sacrificio.
- Los lodos contienen altas concentraciones de hierro y aluminio, dependiendo del material del electrodo de sacrificio utilizado.
- Puede ser un tratamiento costoso en regiones en las cuales el costo de la energía eléctrica sea alto.
- El óxido formado en el ánodo puede, en muchos casos, formar una capa que impide el paso de la corriente eléctrica, disminuyendo de esta forma la eficiencia del proceso.

Marco Conceptual

Ánodo

El ánodo es el polo positivo de un terminal conductor o un electrodo en un proceso electroquímico que toma electrones de los aniones en la solución y está conectado al terminal positivo de la fuente de corriente directa. (Lee, 2005).

Cátodo

Es un electrodo a través del cual la corriente eléctrica fluye de un dispositivo eléctrico polarizado. El cátodo por lo general es el electrodo con carga negativa, en la que se da la reacción de reducción, donde su estado de oxidación se reduce debido a que recibe electrones. (González, 2010).

Conductividad

Es igual al inverso de la resistividad. Se mide en S/cm (S=Siemens). Con objeto de minimizar la caída óhmica, y por lo tanto el consumo específico de energía, todas las partes por las que circula la corriente eléctrica (electrodos, electrolitos, circuito externo, conexiones eléctricas, membranas) deben poseer una alta conductividad. Sin embargo, para evitar las fugas de corriente en las conexiones bipolares, los componentes de una celda no directamente involucrados en el transporte electrónico deben escogerse entre los de mínima conductividad. (J. Ochoa 1996)

Contaminación

La contaminación es un cambio desfavorable en las características físicas, químicas o biológicas del aire, del agua o de la tierra, que es o podría ser perjudicial para la vida humana, para la de aquellas especies deseables, para nuestros procesos industriales, para nuestras condiciones de vivienda o para nuestros recursos culturales; o que desperdicie o deteriore recursos que son utilizados como materias primas. (Science Advisory Board, de la EPA).

Densidad de corriente

Se define como la intensidad de la corriente por unidad de área efectiva de electrodo. Se mide en amperio por metro cuadrado (A/m^2). La densidad de corriente es un parámetro de suma importancia puesto que de la misma dependen:

- La velocidad del proceso.
- La selectividad.
- La eficacia de la corriente.
- El consumo específico de energía.
- La velocidad de corrosión de un electrodo.

La densidad de corriente y el potencial de un electrodo están relacionados, dentro de un determinado intervalo de potenciales. (J. Ochoa 1996)

Desempeño ambiental

Resultados medibles de la gestión que hace una organización sobre sus aspectos ambientales (ISO 14050:2003).

Electrodos

Los electrodos son materiales conductores de la electricidad, a través de los cuales se verifica la transferencia electrónica con la disolución en la que se encuentran las sustancias cuya transformación se desea. (J. Ochoa 1996).

Desde el punto de vista electroquímico es un elemento conductor de electricidad que establece el contacto eléctrico entre un circuito externo, conectado a otro(s) electrodo(s), y una solución electrolítica". (Martínez & Hernández, 2005)

Electroquímica

La Electroquímica trata de la interrelación de los fenómenos químicos y eléctricos, así como del estudio de las propiedades eléctricas de las soluciones de los electrolitos, estableciendo una relación entre la acción química y eléctrica de tales sistemas. En general, la electroquímica se encarga de estudiar las situaciones donde se dan reacciones de oxidación y reducción encontrándose separadas, físicamente o temporalmente, en un entorno conectado a un circuito eléctrico. (es.wikipedia.org)

Estándar de Calidad Ambiental (ECA)

El Estándar de Calidad Ambiental es legalmente “la medida que establece el nivel de concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, presentes en el aire, agua o suelo, en su condición de cuerpo receptor, que no representa riesgo significativo para la salud de las personas. (www.minam.gob.pe)

Estudio de Impacto Ambiental (EIA)

Los EIA son instrumentos de gestión y contiene una descripción de la actividad propuesta y de los efectos directos o indirectos previsibles de dicha actividad en el medio físico y social, a corto y largo plazo, así como la evaluación técnica de los mismos. Deben indicar las medidas necesarias para evitar o reducir el daño a niveles tolerables e incluirán un breve resumen del estudio para efectos de su publicidad. (definición 4.11 - Guía Peruana GP 900.200 2007)

Evaluación de Ciclo de Vida (ECV)

Recopilación y evaluación de las entradas, las salidas y de los impactos ambientales potenciales de un sistema de producto a lo largo de su ciclo de vida. (NTP-ISO 14040:2006)

Flotación

Operación física que consiste en generar pequeñas burbujas de gas (aire), que se asociarán a las partículas presentes en el agua y serán elevadas hasta la superficie, de donde son arrastradas y sacadas del sistema. Obviamente, esta forma de eliminar materia en suspensión será adecuada en los casos en los que las partículas tengan una densidad inferior o muy parecida a la del agua, así como en el caso de emulsiones, es decir, una dispersión de gotas de un líquido inmiscible, como en el caso de aceites y grasas. En este caso las burbujas de aire ayudan a “flotar” más rápidamente estas gotas, dado que generalmente la densidad de estos líquidos es menor que la del agua. (Rodríguez et al., 2006)

Impacto Ambiental

Cualquier cambio en el medio ambiente, ya sea adverso o beneficioso, total o parcialmente resultante de las actividades, productos o servicios de una organización. (NTP-ISO 14050:2003).

Para la Organización de la Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2011), el impacto ambiental es un cambio o una alteración en el medio ambiente, siendo una causa o un efecto debido a la actividad y a la intervención humana. Este impacto puede ser positivo o negativo, el negativo representa una ruptura en el equilibrio ecológico, causando graves daños y perjuicios en el medio ambiente, así como en la salud de la persona y demás seres vivos.

Mejor Tecnología Disponible – MTD (Best Available Technology - BAT)

Son los medios más eficaces y avanzados para el desarrollo de las actividades productivas y de sus modalidades de explotación, que demuestren la capacidad práctica de determinadas técnicas para constituir, en principio, la base de los valores límites de emisión destinados a evitar o, cuando ello no sea aplicable, reducir en general las emisiones y el impacto ambiental. En este contexto, se definen los siguientes términos:

- Tecnología: la técnica, métodos y procedimientos utilizados, incluyendo el diseño de la instalación y la forma de su construcción, uso, mantenimiento y abandono.
- Mejor tecnología: las técnicas más eficaces para proteger el ambiente en su conjunto.
- Disponible: las técnicas accesibles en el mercado, cuya utilización permita la producción de bienes y servicios bajo condiciones competitivas, tanto en términos técnicos como económicos. (definición 4.15 - Guía Peruana GP 900.200 2007).

Límite Máximo Permisible (LMP)

Es la concentración o grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, que caracterizan a un efluente o a una emisión, que al ser excedido puede

causar daños a la salud, bienestar humano y al ambiente. Su cumplimiento es exigible legalmente. (definición 4.14 - Guía Peruana GP 900.200 2007)

Operación unitaria

Aquella de naturaleza física donde no ocurren reacciones químicas. Este tipo de operación es común a todas las industrias de proceso. Las operaciones unitarias estudian principalmente la transferencia y los cambios de energía, transferencias y cambios de materiales que se llevan a cabo por medios físicos, pero también por medios fisicoquímicos. (definición 4.16 - Guía Peruana GP 900.200 2007)

Organización

Compañía, corporación, firma, empresa, autoridad o institución, o parte o combinación de ellas, sean o no sociedades, públicas o privadas, que tiene sus propias funciones y administración (NTP-ISO 14050:2003).

NOTA. Para organizaciones con más de una unidad operativa, una sola unidad operativa puede definirse como una organización. (NTP -ISO 14001).

Política ambiental

Declaración de la organización de sus intenciones y principios respecto a su desempeño ambiental global, que provee un marco para la acción y para el establecimiento de sus objetivos y metas ambientales. (NTP-ISO 14050:2003)

Potencial de electrodo

Cuando un material conductor (electrodo) se pone en contacto con una disolución electrolítica se produce espontáneamente una diferencia de potencial eléctrico en la interfase electrodo disolución. Tal diferencia se denomina potencial de electrodo, y se mide en voltios (V). La diferencia de potencial representa el trabajo que hay que realizar para desplazar la unidad de carga eléctrica entre los dos extremos de la interfase. Si para

desplazar un culombio es preciso realizar un trabajo de un julio, la diferencia de potencial es un voltio. (J: Ochoa 1996)

Precipitación

Consiste en la eliminación de una sustancia disuelta indeseable, por adición de un reactivo que forme un compuesto insoluble con el mismo, facilitando así su eliminación por cualquiera de los métodos descritos en la eliminación de la materia en suspensión.

El término precipitación se utiliza más para describir procesos como la formación de sales insolubles, o la transformación química de un ión en otro con mayor o menor estado de oxidación que provoque la formación de un compuesto insoluble. (Rodríguez et al., 2006)

Prevención de la Contaminación

Uso de procesos, prácticas, materiales o productos que evitan, reducen o controlan la contaminación, lo que puede incluir el reciclado, el tratamiento, los cambios en procesos, los mecanismos de control, el uso eficaz de recursos y la sustitución de materiales. (NTP-ISO 14050:2003).

NOTA: Los beneficios potenciales de la prevención de la contaminación incluyen la disminución de impactos ambientales adversos, la mejora de la eficiencia y la reducción de los costos. (NTP-ISO 14001).

Procesos electroquímicos

Está basado en la utilización de técnicas electroquímicas, haciendo pasar una corriente eléctrica a través del agua (que necesariamente ha de contener un electrolito) y provocando reacciones de oxidación-reducción tanto en el cátodo como en el ánodo. Por tanto, se utiliza energía eléctrica como vector de descontaminación ambiental, siendo su costo una de las principales desventajas de este proceso. Sin embargo, como ventajas cabe destacar la versatilidad de los equipos, la ausencia tanto de la utilización de reactivos como de la presencia de fangos y la selectividad, pues controlar el potencial de electrodo permite seleccionar la reacción electroquímica dominante deseada.

Las consecuencias de las reacciones que se producen pueden ser indirectas, como en el caso de la electrocoagulación, electroflotación o electrofloculación, donde los productos formados por electrolisis sustituyen a los reactivos químicos, y supone una alternativa con futuro a la clásica adición de reactivos. (Rodríguez et al., 2006, p. 46).

Producción Más Limpia (PML)

La Producción Más Limpia es la aplicación continua de una estrategia ambiental preventiva e integrada para los procesos, productos y servicios con el objetivo de incrementar la eficiencia integral de la organización y reducir los riesgos sobre la población humana y el ambiente. Puede ser aplicada a los procesos utilizados en cualquier industria, para productos y servicios diversos brindados dentro de la sociedad. (Definición 4.22 - Guía Peruana GP 900.200 2007).

Reacción Electroquímica

Una reacción electroquímica la podemos definir como una reacción redox en la que el intercambio de electrones tiene lugar en un electrodo. El cambio químico es producido por el intercambio de electrones realizado entre un electrodo y un aceptor o donador de electrones en una disolución.

Rectificador

La corriente eléctrica constituye la fuerza primaria directora del proceso. El suministro de energía debe de realizarse a través de una fuente de alimentación de corriente continua, es preciso emplear aparatos adecuados para rectificar la corriente alterna en continua. Tales aparatos se denominan rectificadores (J. Ochoa. 1996). A grandes rasgos un equipo de alimentación de corriente consiste en:

- Un transformador
- Un rectificador

El transformador es necesario puesto que la corriente eléctrica de la red se suministra a alto voltaje. Por lo tanto, es necesario transformarla a un voltaje correspondiente al específico de cada proceso. Por otra parte, la corriente de la red es alterna, lo que exige rectificarla a corriente continua por medio del rectificador. Si es posible se procuran conectar varias celdas en serie con el objeto de lograr que el voltaje sea lo más próximo posible al de la red, minimizando así los costes de transformación. (J. Ochoa 1996).

Los más utilizados hoy en día son los tiristores. En lo referente a los costes y limitándonos exclusivamente a los rectificadores (no hay que olvidar que un sistema electrolítico consta de otros componentes lo que se trata es de minimizar el coste del conjunto, no de cada una de las partes), de ser posible se utilizan los de baja intensidad y alto voltaje, pues es la forma más eficiente de utilizar la energía eléctrica. (J. Ochoa 1996).

Resistencia Eléctrica

La oposición que todo conductor presenta al paso de la corriente eléctrica se denomina resistencia eléctrica, y se mide en ohmios (Ω). Un ohmio representa la resistencia de un conductor al paso de una corriente eléctrica cuando la diferencia de potencial entre sus extremos es de un voltio. La intensidad de la corriente (I) y el voltaje (V) están relacionados con la resistencia eléctrica (R), a temperatura constante, por medio de la

Ley de Ohm:

$$V = I \times R \quad (1)$$

El término R también se denomina caída óhmica. Es muy importante que la caída óhmica entre los dos electrodos de una celda o de un módulo sea lo más baja posible, con objeto de minimizar el consumo específico de energía del proceso. (J. Ochoa 1996).

Resistividad

La resistencia eléctrica R es una función de las dimensiones del material conductor, de su naturaleza y de la temperatura. Viene dada por la siguiente expresión:

$$R = (\rho l/A) \quad (2)$$

Donde:

- R, es la resistencia eléctrica, en Ω
- l, la longitud del conductor, en cm.
- A, el área transversal del conductor, en cm^2 .
- ρ , la resistividad, en Ωcm

La resistividad representa la resistencia específica de un material de 1 cm de longitud y de sección transversal de 1 cm^2 . Es una función de la temperatura y de la naturaleza del material. Con objeto de minimizar el consumo de energía es de interés que la resistividad de los electrodos sea lo más pequeña posible. (J. Ochoa 1996).

Sedimentación

Operación física en la que se aprovecha la fuerza de la gravedad que hace que una partícula más densa que el agua tenga una trayectoria descendente, depositándose en el fondo del sedimentador. Esta operación será más eficaz cuanto mayor sea el tamaño y la densidad de las partículas a separar del agua, es decir, cuanto mayor sea su velocidad de sedimentación, siendo el principal parámetro de diseño para estos equipos. A esta operación de sedimentación se le suele denominar también decantación. (Rodríguez et al., 2006).

Sistema de Gestión Ambiental (SGA)

Parte del sistema de gestión global que incluye la estructura de la organización, las actividades de planificación, las responsabilidades, las prácticas, procedimientos, procesos y recursos para desarrollar, implementar, realizar, revisar y mantener la política ambiental. (NTP-ISO 14050:2003).

Voltaje

El voltaje de una celda de Electrocoagulación es la diferencia de potencial, en voltios, entre los dos electrodos extremos. Es la suma de varias contribuciones:

- Potencial de equilibrio del ánodo.
- Potencial de equilibrio del cátodo.
- Sobre voltajes.
- Caída óhmica en el o los electrodos.
- Caída óhmica en las membranas (Electrodiálisis).

METODOLOGÍA

En este estudio se evaluó el método de electrocoagulación como alternativa para el tratamiento de las aguas residuales de origen galvánico, con el propósito de reducir las concentraciones de los metales pesados (Cr, Cu, Ni y Zn), para lo cual se midieron las concentraciones de los metales pesados antes y después del tratamiento y así determinar su porcentaje de remoción.

Tipo y Diseño de Investigación

El tipo de investigación es aplicada porque el proceso de electrocoagulación implementado para la reducción de la concentración de metales pesados en las aguas residuales industriales de la Planta Galvánica de Empresa de Fabricación de Suministros Textiles fue validado mediante pruebas experimentales en el laboratorio AGQ (acreditada por INACAL).

En el diseño de investigación, con la finalidad de lograr los objetivos planteados, se recurrió a un diseño metodológico experimental, debido a que se manipularán varios ensayos que nos ayudó a evaluar cuáles son los valores que harán al proceso de electrocoagulación más eficiente para remover los metales pesados. Tenemos además que el alcance de la investigación es explicativo, porque se explica las causas como las variables independientes influyen en la concentración final de los metales pesados en los efluentes galvánicos.

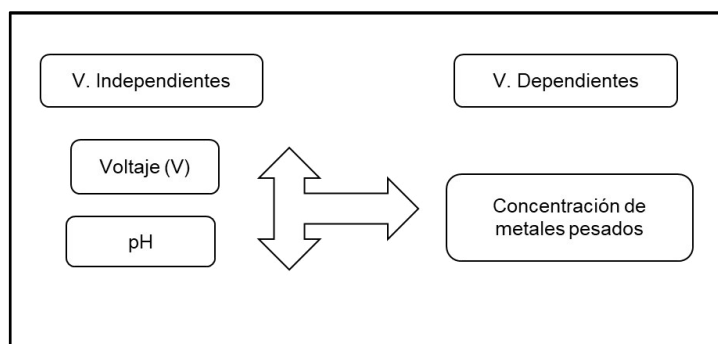
De acuerdo con Hernández et al., (2015), la investigación experimental “se refiere a un estudio en el que se manipulan intencionalmente una o más variables independientes (supuestas causas-antecedentes), para analizar las consecuencias que la manipulación tiene sobre una o más variables dependientes (supuestos efectos-consecuentes), dentro de una situación de control” (p. 121)

Esquema de Investigación

La presente investigación, tiene un esquema de relación causal, al plantear el efecto que tendrá las variables independientes (pH y voltaje) hacia la variable dependiente (concentración de metales pesados), de acuerdo con la figura 4.

Figura 4

Esquema de investigación



Nota: Adaptado de Influencia del tiempo y voltaje en la disminución de la carga orgánica por electrocoagulación del agua residual de la Curtiembre Cuenca S.A.C. Guerrero A. 2017 (p.16)

Diseño Factorial

En la investigación se aplicó un diseño factorial con dos factores independientes (pH y voltaje), siendo el tipo de investigación bifactorial, donde se realizan todas las posibles combinaciones entre los valores de las variables. Los factores que se consideran son: voltaje con cuatro niveles (60, 65, 70 y 75 voltios) y el pH con tres niveles (pH 6, pH 8 y pH10). Así, tendremos 4x3 combinaciones de tratamientos, que resultan 12 combinaciones de tratamientos, con una réplica por combinación de tratamiento. En la tabla 1, se muestra el diseño de tratamientos:

Tabla 1*Diseño de tratamientos*

pH Voltaje	P1	P2	P3
V1	P1V1	P2V1	P3V1
V2	P1V2	P2V2	P3V2
V3	P1V3	P2V3	P3V3
V4	P1V4	P2V4	P3V4

Donde:

Voltaje

V1 = 60 voltios

V2 = 65 voltios

V3 = 70 voltios

V4 = 75 voltios

pH

P1 = pH 6

P2 = pH 8

P3 = pH10

Diseño Experimental

Para esta investigación, se estableció un diseño experimental de dos factores (variables independientes: voltaje y pH) y una variable de respuesta (variable dependiente: concentración final de metales pesados). El primer factor corresponde al voltaje (en los niveles de 60V, 65V, 70V y 75V) y el segundo factor corresponde al pH (en los niveles de 6, 8 y 10).

El diseño experimental planteado, nos permitirá entender mejor el proceso para determinar la manera en que las variables de ingreso afectan a las variables de salida (Cueva y Huaroc, 2015, P. 78). También el diseño experimental nos ayudará a observar cómo las variables independientes van a interactuar entre sí, y proporcionar las mejores condiciones de obtener el mayor porcentaje de remoción de metales pesados. En la tabla 4, se muestra el resumen del diseño experimental.

Tabla 2*Diseño experimental*

No.	Voltaje (V)	pH	Tratamiento
1		6	P1V1
2	60	8	P2V1
3		10	P3V1
4		6	P1V2
5	65	8	P2V2
6		10	P3V2
7		6	P1V3
8	70	8	P2V3
9		10	P3V3
10		6	P1V4
11	75	8	P2V4
12		10	P3V4

El diseño experimental permitirá investigar el efecto individual y la interacción entre los factores sobre la variable respuesta, al elaborar un análisis de varianza ANOVA. (Aguilar, 2015, P. 74)

Diseño de la Celda Electrolítica de Electrocoagulación

Para el proyecto se construyó una celda de electrocoagulación de tipo continuo en acrílico, cuyas medidas son: 31 cm de altura, 17 cm de ancho y 36 cm de largo. El sistema consta de cuatro compartimentos situados en continuo, haciendo una rampa con un ángulo de 20 grados. En la tabla 3, se resume las medidas de la celda construida y en la Figura 5, se muestra el diseño del reactor electrolítico en continuo:

Tabla 3*Características de la celda electrolítica*

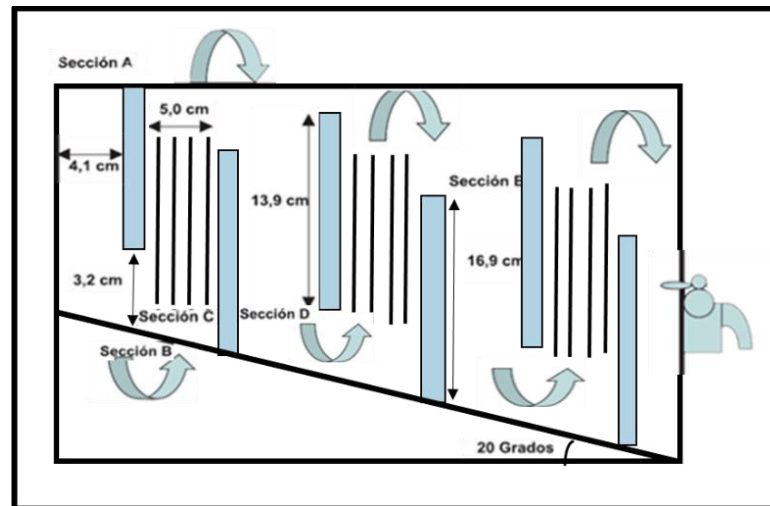
Característica	Dimensiones
Altura (cm)	31,0
Largo (cm)	36,0
Ancho (cm)	17,0
Espesor del acrílico (cm)	0.5
Volumen total de la celda (ml)	8500

Figura 5*Esquema de la celda electrolítica en continuo****Construcción de la Celda Electrolítica***

El prototipo que se diseñó para este proyecto fue un reactor con flujo continuo, construido en acrílico, diseñado de acuerdo con las características del sistema AP, en honor a sus creadores, André Fish y Jean Philippe Deprat (Jaramillo et al. 2005, p. 145-158). Las dimensiones de la celda de electrocoagulación son: 31,0 cm de alto, 17,0 cm de ancho y 36,0 cm de largo, dividido en 5 secciones (A, B, C, D y E). La Figura 6, muestra el esquema del reactor con sus diferentes secciones y dimensiones (Jaramillo et al. 2005, p. 145-158).

Figura 6

Diseño del reactor electrolítico continuo

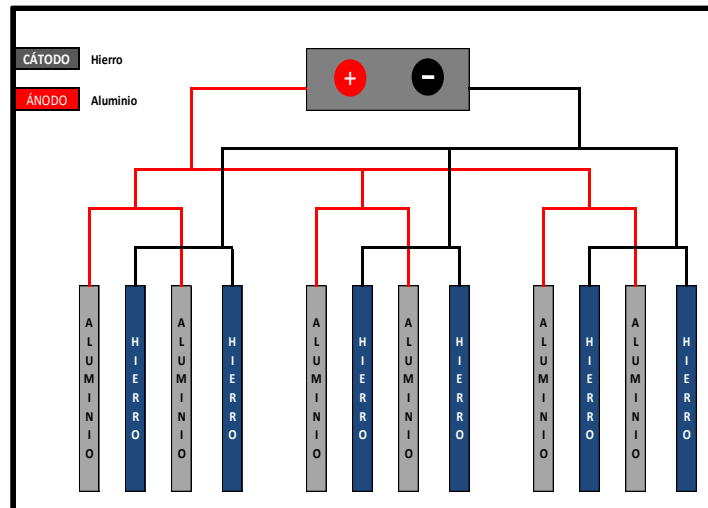


Nota. Adaptado de Construcción de un reactor electroquímico para electrocoagulación como método alternativo en la descontaminación de aguas residuales. (Jaramillo et al., 2005, p. 145-158)

La sección A mide 4,1 cm, la sección B mide 3,2 cm, la sección C mide 5,0 cm, la sección D mide 13,9 cm y la sección E mide 16,9 cm. El reactor fue construido en acrílico con una capacidad de 8,5 L de operación. El sistema consta de cuatro compartimentos situados en continuo y haciendo una rampa con un ángulo de 20 grados. Tres compartimentos están equipados cada uno con 4 electrodos de hierro y aluminio, con una separación entre ellos de 1 cm, con un área activa de 228,0 cm², producto de las dimensiones de los ánodos: 15.0 cm largo, 15.2 cm y 2.3 mm de espesor. En la figura 7, se muestra la distribución de los electrodos conectados con una configuración en forma paralelo monopolar. En la figura 8, se muestra al reactor de electrocoagulación en continuo con los electrodos conectados en forma paralelo monopolar.

Figura 7

Distribución en paralelo monopolar de electrodos

**Figura 8**

Reactor de electrocoagulación en continuo con electrodos en paralelo monopolar



Electrodos

Se utilizaron electrodos de hierro, basándonos en las referencias bibliográficas de tener como referente el costo y la facilidad de encontrarlos en el mercado. Los electrodos utilizados tienen unas medidas de 15 cm de largo, 15.2 cm de ancho y 2.3 mm de espesor.

Figura 9*Corte de ánodos de hierro*

El área generada, por electrodo, es de 456 cm². La distancia de electrodos se consideró de 10 mm y la distancia del electrodo a la cara lateral es de 1 cm. El número de electrodos se determinó de acuerdo con la siguiente fórmula (Arango, 2007, p. 64):

$$\# \text{ Electrodo} = \frac{\text{ancho de celda} - 2 * (\text{dist. electrodos a cara lateral})}{(\text{dist. máxima entre electrodos} + \text{espesor de placa})}$$

Sustituyendo valores:

$$\# \text{ Electrodo} = \frac{170 - 2 * (10)}{(10 + 2.3)} = 12.195 \approx 12$$

De acuerdo con los resultados, se utilizan 12 electrodos (6 electrodos de hierro y 6 electrodos de aluminio), puestos con una disposición en paralelo monopolar.

Caracterización Físicoquímica del Efluente Galvánico

El efluente industrial seleccionado para las pruebas de electrocoagulación proviene de las descargas de los procesos industriales de una planta industrial galvánica, que fue

monitoreada en la misma planta de tratamiento de la Empresa de Fabricación de Suministros Textiles.

Para las pruebas experimentales realizadas, se tomó en consideración el pH por ser una variable que influye en el proceso de electrocoagulación, encontrándose un pH 6, tomándose una muestra para su análisis fisicoquímico. Para los pH 8 y pH 10, las muestras iniciales fueron tomadas antes y después del ajuste del pH según sea el caso.

Las tres muestras iniciales presentaron una coloración amarronada ligeramente verdosa turbia con presencia de sólidos suspendidos y alta turbiedad. A continuación, se muestra en la tabla 4, la caracterización fisicoquímica inicial del efluente galvánico:

Tabla 4

Caracterización inicial del efluente galvánico sin tratamiento

CONDICIONES INICIALES				
Descripción de Muestra	Cromo Total (Cr) mg/L	Cobre total (Cu) mg/L	Níquel total (Ni) mg/L	Zinc total (Zn) mg/L
Concentración inicial	116.88	236.176	132.18	82.87
Temperatura °C			23°C	
Turbidez (FTU)			996	
Conductividad (μ S/cm)			5.8	
pH			7.01	

Materiales, Equipos e Instrumentos Utilizados

Materiales

- Guantes quirúrgicos
- Baldes plásticos de 1 galón
- Tachos plásticos de 150 litros
- Envases plásticos de 1 litro
- Mascarillas

Equipos e Instrumentos

- Conductímetro HI98312 Hanna Instruments

Figura 10

Conductímetro HI98312 Hanna Instruments



- pH-Conductímetro Benchtop Orions 4 Star-Thermo electro Corp.

Figura 11

pH-conductivity Benchtop Orion 4 Star – Thermo electro Corp.



- Termómetro de 0 a 100°C
- Cronómetro
- Rectificador de corriente continua con variación de voltaje y amperaje marca FASEEL

Figura 12

Rectificador automático de corriente Fasel



- Turbidímetro HI 93703 Hanna instruments, rango 0 a 1000 FTU

Figura 13

Turbidímetro HI 93703 Hanna instruments



- Multitester de corriente AC/DC KYORITSU KEW SNAP 2046R

Figura 14

Multitester de corriente AC/DC KYORITSU KEW SNAP 2046R



- Celda electrolítica (31 x 17 x 36 cm) tipo continuo, de material acrílico.
Electrodos (hierro) con medidas: 15.0cm x 15.2cm x 2.3 cm

Figura 15

Celda electrolítica con electrodos y conectores



Materiales de Laboratorio

- Papel filtro Agua destilada
- Material de vidrio
- pH-metro HI981028 Hanna Instruments

Figura 16

pH-metro HI981028 Hanna Instruments



Materiales Para la Construcción de la Celda de Electrocoagulación

- Láminas de acrílico
- Placas de hierro
- Cables de conexión
- Mangueras plásticas de 1/8"
- Pegamento UHU
- Silicona

Procedimiento Experimental en Celda Piloto de Electrocoagulación

A continuación, se describe el procedimiento que se desarrolló para el diseño de experimentos, aplicando una corriente continua a través de electrodos de hierro, en el tratamiento de efluentes galvánicos, utilizando la celda de electrocoagulación de 8.5 L en operación tipo continuo:

- Se tomaron muestras iniciales regulando el pH de experimentación, empezando con la regulación de pH 6.

Figura 17

Muestra patrón de agua residual



- Se prepara el montaje de los electrodos de hierro, de acuerdo con la disposición en paralelo monopolar, teniendo en cuenta la distancia de 10 mm.

Figura 18

Electrodos con disposición paralelo monopolar y 10 mm de distancia



- Se conecta la fuente de energía regulándose los voltajes.

Figura 19

Fuente de energía con variación de voltaje y amperaje



- Se hace circular el efluente galvánico en la celda de electrocoagulación, de acuerdo con el modelo tipo continuo.

Figura 20

Celda de EC en operación – tratamiento de efluente



- Se aplicó la corriente eléctrica, desde la fuente de alimentación de energía, y se dejó el desarrollo del sistema por 20 minutos, transcurrido el tiempo se muestrea cada tratamiento.

Figura 21

Recolección de muestras a analizar de cada operación



- Se realiza la lectura de los datos experimentales del pH, voltaje, turbidez, temperatura y conductividad.

Figura 22

Lectura del valor del pH

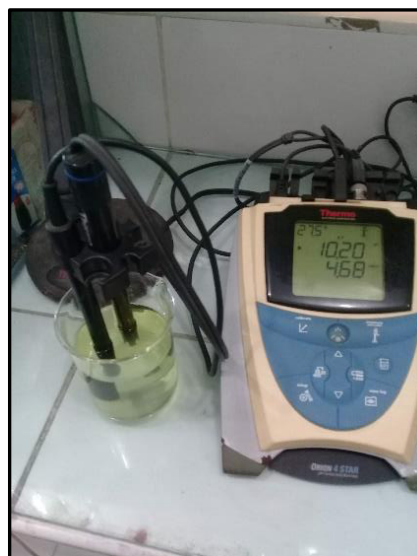


Figura 23

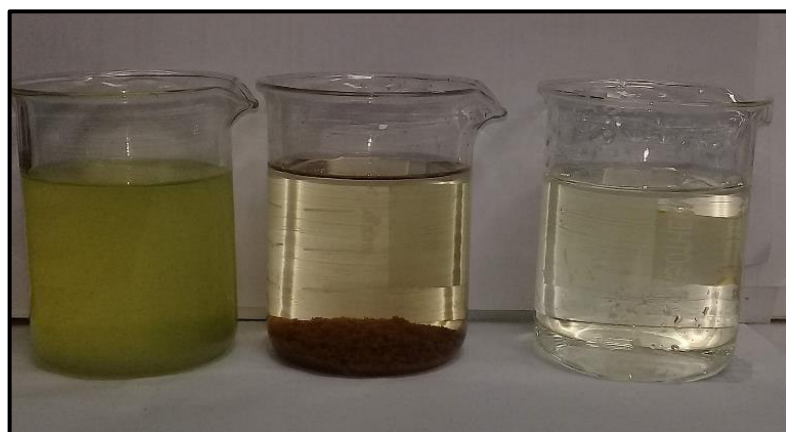
Lectura de la turbidez



- Las muestras del efluente tratado, por cada tiempo de operación, se deja en reposo por 1 hora para finalmente filtrarla.

Figura 24

*Muestras patrón, muestra en reposo 1 hora y muestra filtrada
(presentadas de izquierda a derecha)*



- Terminada la operación se desconecta el sistema de alimentación continua.
- Se apaga la fuente de energía.
- Se envía la muestra para su análisis y posterior comparación.
- Se retira los ánodos para su mantenimiento y limpieza.
- Se evacúa el líquido remanente de la celda de electrocoagulación para su mantenimiento y limpieza.

Recolección de las Muestras

Para la recolección de las muestras, se siguió ciertas especificaciones técnicas como:

- La toma de muestras fue en las instalaciones de la Empresa de Fabricación de Suministros Textiles – Planta Galvánica, ubicado en el distrito de Carmen de la Legua, Callao.
- Utilización de frascos plásticos cerrados y limpios, entregados por el laboratorio AGQ PERU (acreditado por INACAL).
- Las tomas de muestras se realizaron en los frascos plásticos, los cuales se enjuagaron tres veces con el agua residual, por cada tratamiento, previa al llenado de estos.
- Se tomaron muestras durante tres días. Cada día se reguló inicialmente el pH, empezando con el pH 10, luego pH 8 y finalmente pH 6, los ajustes al valor deseado del pH fueron dados utilizando ácido sulfúrico 99% para disminuirlo y soda caustica para aumentarlo.
- Regulado el pH, se va regulando los voltajes a 60V, 65V, 70V y 75V respectivamente y cada 20 minutos se recolecte 20 L de agua residual, por cada voltaje, tomándose de lo recolectado, 1 L de muestra para los análisis respectivos, en los frascos plásticos.

Unidad de Análisis

La unidad de análisis fue de 8.5 litros de agua residual de la Planta de Tratamientos de Superficies (Planta Galvánica) de la Empresa de Fabricación de Suministros Textiles., por cada tratamiento.

Población de Estudio

Volumen de agua residual de la Planta de Tratamientos de Superficies (Planta de Galvánica), alrededor de 30 m³/día, de la Empresa de Fabricación de Suministros Textiles ubicada la Av. Oscar R. Benavides, distrito de Carmen de la Legua, de la Provincia Constitucional del Callao, departamento de Lima.

Tamaño de Muestra

La muestra que se utilizó para la presente investigación fue de 204 litros de agua residual de la Planta Galvánica de la Empresa de Fabricación de Suministros Textiles. El muestreo se realizó en tres días, con 8 muestras por día, las cuales posteriormente se llevaron a los laboratorios de AGQ PERU (acreditada por INACAL) para su análisis respectivo.

Selección de Muestra

La selección de muestra que se consideró es un muestreo aleatorio simple, porque toda la población tiene la misma probabilidad de ser seleccionados. La selección de la muestra puede realizarse a través de cualquier mecanismo probabilístico en el que todos los elementos tengan las mismas opciones de salir.

Técnicas de Recolección de Datos

La técnica de recolección de datos, utilizada en el proyecto, fue la observación y el instrumento para la recolección de datos fue la ficha de observación para los datos obtenidos con el tratamiento (anexo D).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis e Interpretación de Resultados

Los resultados obtenidos, luego de las pruebas de electrocoagulación, han permitido identificar y cuantificar la influencia en la variación del pH y el voltaje aplicado en la disminución de la concentración final de los metales pesados en los efluentes galvánicos que son del estudio.

Caracterización Inicial del Efluente Galvánico

La base para nuestro estudio fue la caracterización fisicoquímica inicial del efluente galvánico, que presentaba una coloración verde-marrón y un pH entre 6.98 y 7.04, casi neutro, el cual fue regulado antes de las pruebas de electrocoagulación a un pH de 6, que es el inicio de los tratamientos.

Los resultados generales de la caracterización inicial del efluente galvánico se muestran en la tabla 5.

Tabla 5

Características fisicoquímicas iniciales del efluente galvánico

CONDICIONES INICIALES				
Descripción de Muestra	Cromo Total (Cr) mg/L	Cobre total (Cu) mg/L	Níquel total (Ni) mg/L	Zinc total (Zn) mg/L
Concentración inicial	116.88	236.176	132.18	82.87
Temperatura °C			23°C	
Turbidez (FTU)			996	
Conductividad (µS/cm)			5.8	
pH			7.01	

Condiciones de Operación Durante el Proceso de Electrocoagulación

En la tabla 6 se muestran las condiciones de operación durante el proceso de electrocoagulación para los diferentes niveles de pH y voltaje de corriente, para un proceso en continuo.

Tabla 6

Condiciones de operación del proceso de electrocoagulación

PARÁMETROS	VALORES
Tipo de muestra	Agua residual industrial (Efluente galvánico)
Tipo de operación	Continuo
Volumen de muestra	2.8 L
Tiempo de sedimentación	60 min
Material de electrodos	Hierro (12 und.)
Configuración de electrodos	Monopolar en paralelo
Espacio entre electrodos	10 mm
área de electrodos	5472 (cm ²)
área efectiva de electrodos	4195 (cm ²)
Número de ensayos	24 ensayos (12 de pruebas y 12 de réplica)
Niveles de pH	6, 8 y 10
Niveles de voltaje	60, 65, 70 y 75 voltios
Temperatura de proceso	23°C

Resultados de los Porcentajes de Remoción de Metales Pesados

En la tabla 7, se muestran los porcentajes de la remoción de los parámetros evaluados durante las doce pruebas (cada prueba con una réplica), obteniéndose los siguientes resultados.

Tabla 7

Resultados del porcentaje de remoción (%) de carga contaminante

Porcentaje de remoción (%) de metales en efluentes galvánicos tratados										
# prueba	Voltaje (v)	pH	% remoc. Cr		% remoc. Cu		% remoc. Ni		% remoc. Zn	
1	60	6	90.5%	91.3%	96.0%	97.1%	90.2%	97.9%	93.2%	92.7%
2	65	6	91.0%	91.5%	98.8%	98.7%	94.2%	96.1%	98.6%	97.5%
3	70	6	93.3%	94.3%	98.1%	97.3%	94.8%	93.9%	99.4%	99.1%
4	75	6	92.2%	96.9%	97.7%	98.2%	94.0%	93.2%	94.2%	98.6%
5	60	8	76.9%	76.0%	86.5%	88.2%	84.3%	90.8%	88.6%	85.6%
6	65	8	87.3%	88.9%	91.2%	92.1%	91.6%	90.4%	95.4%	91.8%
7	70	8	81.7%	85.6%	91.8%	94.6%	93.0%	91.5%	95.9%	91.0%
8	75	8	89.8%	91.4%	95.0%	96.1%	89.6%	91.9%	92.7%	93.8%
9	60	10	76.5%	34.5%	76.2%	79.0%	57.1%	66.3%	80.0%	89.9%
10	65	10	99.4%	30.9%	73.5%	77.7%	53.4%	59.7%	73.6%	84.9%
11	70	10	77.5%	69.3%	76.6%	78.4%	52.7%	57.9%	77.1%	78.5%
12	75	10	73.1%	75.6%	56.9%	60.1%	50.7%	52.3%	78.5%	71.3%

En la tabla 8 se muestran los promedios de los porcentajes de remoción de metales, a los diferentes niveles de pH y voltaje. Observamos que a un pH de 6 se obtienen los mayores porcentajes de remoción de todos los metales en estudio (se ha obtenido 99.3% para el caso del zinc). También observamos que a un pH 10 y 75v el níquel alcanza el menor valor de porcentaje de remoción (51.5%).

Tabla 8

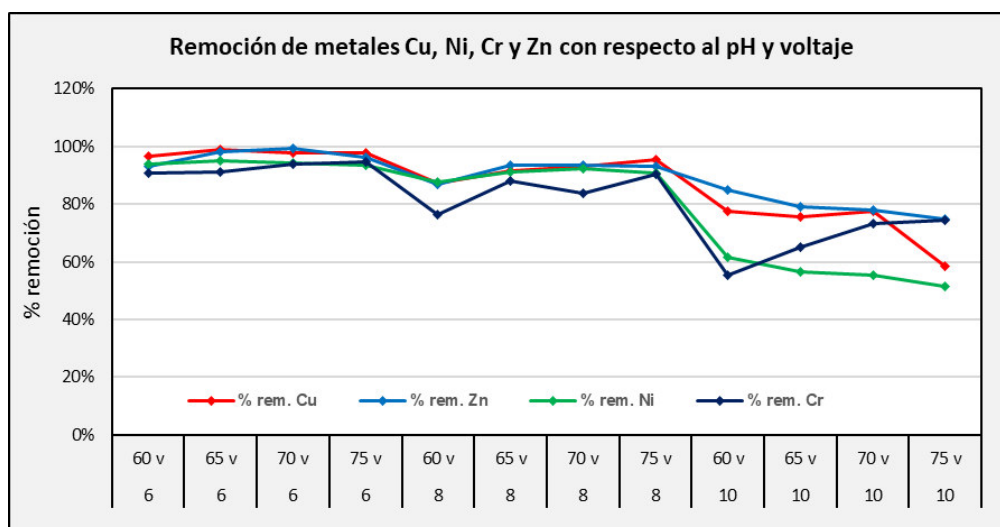
Promedios del porcentaje de remoción (%) de carga contaminante

Prueba	pH	Voltaje	% rem. Cr	% rem. Cu	% rem. Ni	% rem. Zn
P1	6	60	90.9%	96.5%	94.1%	93.0%
P2	6	65	91.2%	98.8%	95.2%	98.1%
P3	6	70	93.8%	97.7%	94.3%	99.3%
P4	6	75	94.5%	98.0%	93.6%	96.4%
P5	8	60	76.5%	87.4%	87.6%	87.1%
P6	8	65	88.1%	91.6%	91.0%	93.6%
P7	8	70	83.7%	93.2%	92.3%	93.4%
P8	8	75	90.6%	95.6%	90.8%	93.2%
P9	10	60	55.5%	77.6%	61.7%	85.0%
P10	10	65	65.1%	75.6%	56.6%	79.3%
P11	10	70	73.4%	77.5%	55.3%	77.8%
P12	10	75	74.3%	58.5%	51.5%	74.9%

En la figura 25 se tiene las eficiencias de remoción de los metales pesados en función del pH y el voltaje. Observamos que en el rango de pH 6 a 8, los porcentajes de remoción del cobre, níquel y zinc ligeramente se incrementan, bajando considerablemente a un pH 10, independientemente del voltaje aplicado. En el caso de cromo, el porcentaje de remoción disminuye a medida que se incrementa el pH, observándose además que para un pH determinado la remoción se incrementa a medida que sube el voltaje.

Figura 25

Remoción de metales Cu, Ni, Cr y Zn en función al voltaje y pH



En la tabla 9, se muestran las concentraciones iniciales y los valores finales máximos alcanzados en el proceso de electrocoagulación a las aguas residuales de origen galvánico: 94.5% para el Cromo (Cr), 98.8% para el cobre (Cu), 95.2% para el níquel (Ni) y 99.3% para el Zinc (Zn).

Tabla 9

Caracterización final del tratamiento de los efluentes galvánicos tratados

Caracterización final del tratamiento de agua residual galvánica			
Descripción de Muestra	Afluente	Efluente	% remoción
Cromo total (Cr) mg/L	116.88	6.4	94.5%
Cobre total (Cu) mg/L	236.176	2.92	98.8%
Níquel total (Ni) mg/L	132.18	6.4015	95.2%
Zinc total (Zn) mg/L	82.87	0.6115	99.3%

Resultados del Porcentaje de Remoción del Cromo, Cobre, Níquel y Zinc

En la tabla 10, se muestra los resultados del porcentaje de remoción del cromo en función de los factores pH y voltaje en sus diferentes niveles.

Tabla 10

Porcentaje de remoción del cromo en función del pH y voltaje

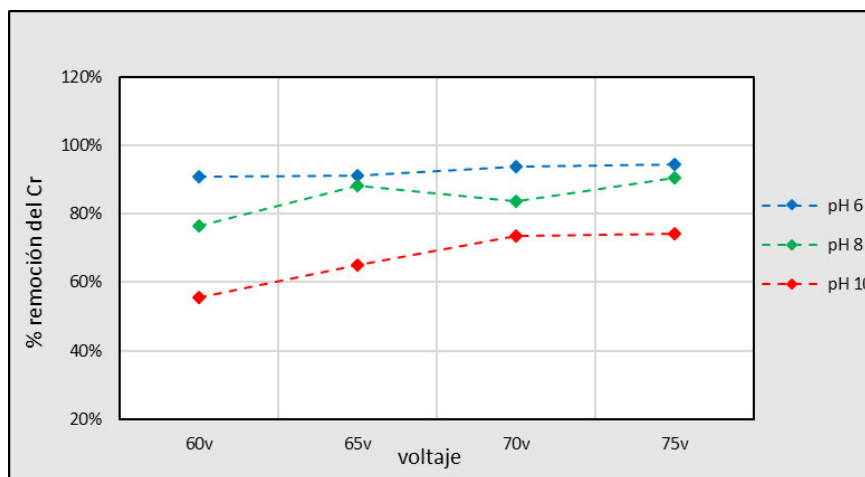
remoción de cromo (%)			
voltaje	pH 6	pH 8	pH 10
60	90.9%	76.5%	55.5%
65	91.2%	88.1%	65.1%
70	93.8%	83.7%	73.4%
75	94.5%	90.6%	74.3%

En la figura 26, se muestra que a medida que aumenta el voltaje, la remoción del cromo va también aumentando; sin embargo, a medida que el pH aumenta, la remoción del cromo presenta menores valores. La mejor eficiencia de remoción del cromo se ha obtenido a las condiciones de pH 6 y 75 voltios, obteniéndose un 94.5%. En los trabajos realizados por Bazrafshan et al., (2006) encontramos para un rango

de pH entre 3 a 10 un porcentaje de remoción del 99.9% a pH 3 y 40v (rango de 20v a 40v). Sus resultados también muestran una ligera disminución del porcentaje de remoción del cromo cuando el proceso de electrocoagulación se realiza a pH 10.

Figura 26

Porcentaje de remoción del cromo en función del pH y voltaje



En la tabla 11, se muestra los resultados del porcentaje de remoción del cobre en función de los factores pH y voltaje en sus diferentes niveles.

Tabla 11

Porcentaje de remoción del cobre en función del pH y voltaje

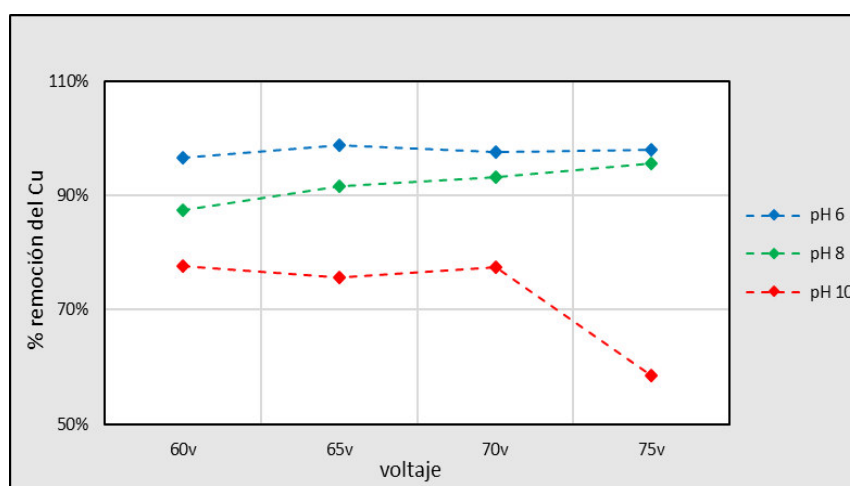
remoción de cobre (%)			
voltaje	pH 6	pH 8	pH 10
60	96.5%	87.4%	77.6%
65	98.8%	91.6%	75.6%
70	97.7%	93.2%	77.5%
75	98.0%	95.6%	58.5%

En la figura 27, se muestra que a medida que aumenta el voltaje, la remoción del cobre va también aumentando; sin embargo, a medida que el pH aumenta, la remoción del cobre

va presentando menores valores. La mejor eficiencia de remoción del cobre se ha obtenido a las condiciones de pH 6 y 65 voltios, obteniéndose un 98.8%. Similares valores obtuvieron Dermentzis et al., (2010) trabajando en la reducción del cobre a pH entre 2 a 9, obtiene una remoción del cobre mayor al 97%, muy por el contrario, la remoción disminuye considerablemente cuando el pH está en 10.

Figura 27

Porcentaje de remoción del cobre en función del pH y voltaje



En la tabla 12 se muestra los resultados del porcentaje de remoción del níquel en función de los factores pH y voltaje en sus diferentes niveles.

Tabla 12

Porcentaje de remoción del níquel en función del pH y voltaje

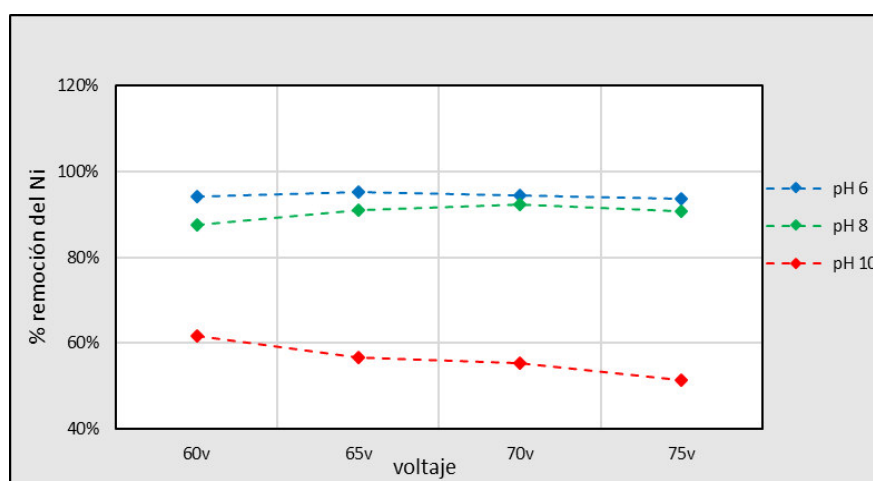
remoción de níquel (%)			
voltaje	pH 6	pH 8	pH 10
60	94.1%	87.6%	61.7%
65	95.2%	91.0%	56.6%
70	94.3%	92.3%	55.3%
75	93.6%	90.8%	51.5%

En la figura 28, se muestra que a medida que aumenta el voltaje, la remoción del níquel va también aumentando; sin embargo, a medida que el pH aumenta, la remoción del

níquel va presentando menores valores. La mejor eficiencia de remoción del níquel se ha obtenido a las condiciones de pH 6 y 65 voltios, obteniéndose un 95.2%. Beyazit (2014) analizando diferentes tipos de electrodos obtuvo una remoción de níquel del 100% trabajando a pH 9.

Figura 28

Porcentaje de remoción del níquel en función del pH y voltaje



En la tabla 13 se muestra los resultados del porcentaje de remoción del zinc en función de los factores pH y voltaje en sus diferentes niveles.

Tabla 13

Porcentaje de remoción del zinc en función del pH y voltaje

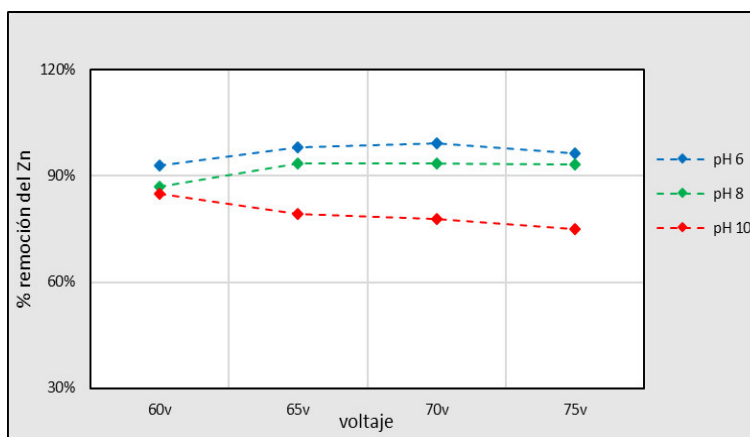
remoción de zinc (%)			
voltaje	pH 6	pH 8	pH 10
60	93.0%	87.1%	85.0%
65	98.1%	93.6%	79.3%
70	99.3%	93.4%	77.8%
75	96.4%	93.2%	74.9%

En la figura 29 se muestra que a medida que el pH aumenta la remoción disminuye para un valor determinado de voltaje. Se observa que a un pH 10 la disminución es más

acentuada conforme aumenta el voltaje. La mejor eficiencia de remoción para el zinc se ha obtenido a las condiciones de pH 6 y 70 voltios, con un valor de 99.3%. Adhoum et al (2004) consiguió remover, en efluentes del tipo galvánico, el zinc en 99.9% en un rango de pH entre 2 a 10, siendo el pH 8 donde se alcanzó el mayor valor de remoción.

Figura 29

Porcentaje de remoción del zinc en función del pH y voltaje



Comportamiento de la Turbidez en el Proceso de Electrocoagulación

En la tabla 14 se muestra el comportamiento de la turbidez a pH 6 en función del tiempo y a los distintos niveles de tensión (60V, 65V, 70V y 75V).

Tabla 14

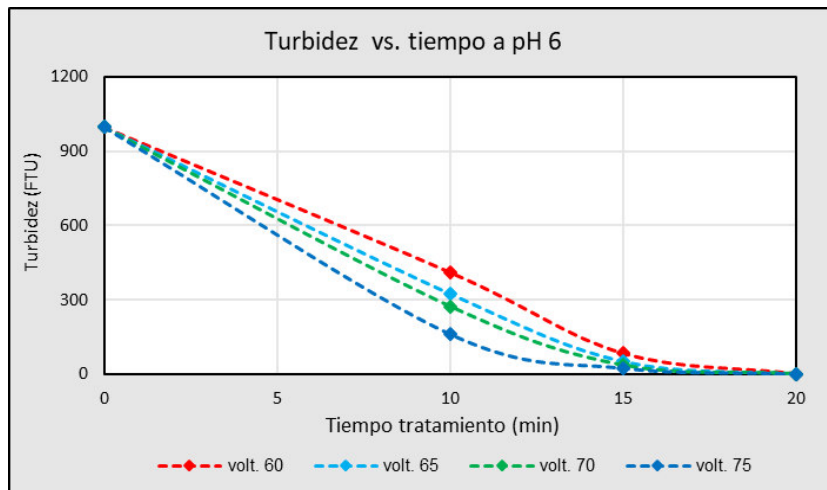
Resultados de la turbidez en función del voltaje y tiempo, a pH 6

Condiciones pH inicial del efluente				
pH = 6.0				
Tiempo (min)	Turbidez final (FTU)			
	60 V	65 V	70 V	75 V
0	996	996	996	996
10	410	325	273	161
15	83	52	35	23
20	0	0	0	0

En la figura 30 se muestra la variación de la turbidez con respecto a la variación de la tensión y el tiempo.

Figura 30

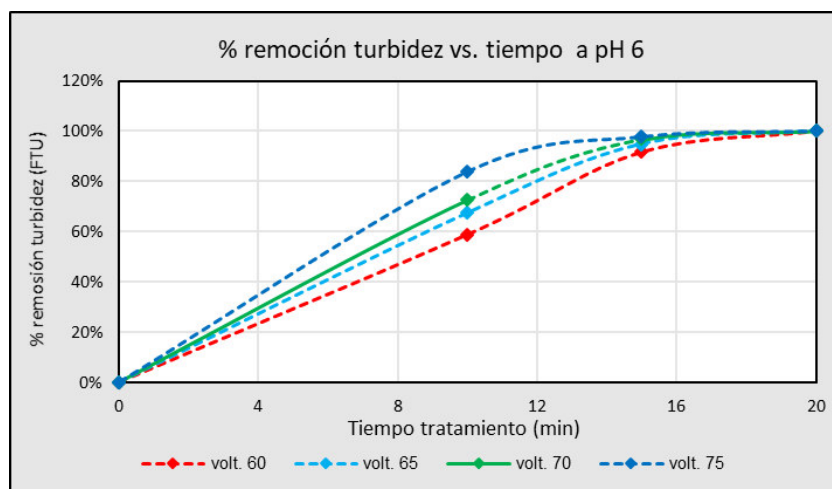
Variación de la turbidez en función del voltaje y tiempo, a pH 6



En la figura 31, con los resultados de la tabla 14, se muestran las eficiencias de remoción de la turbidez a pH 6 en función de la tensión y el tiempo, observándose el aumento del porcentaje de remoción de la turbidez conforme aumenta la tensión para un mismo tiempo.

Figura 31

Porcentaje de remoción de la turbidez en función del voltaje y tiempo, a pH 6



En la tabla 15 se muestra el comportamiento de la turbidez a pH 8 en función del tiempo y a los distintos niveles de tensión (60V, 65V, 70V y 75V).

Tabla 15

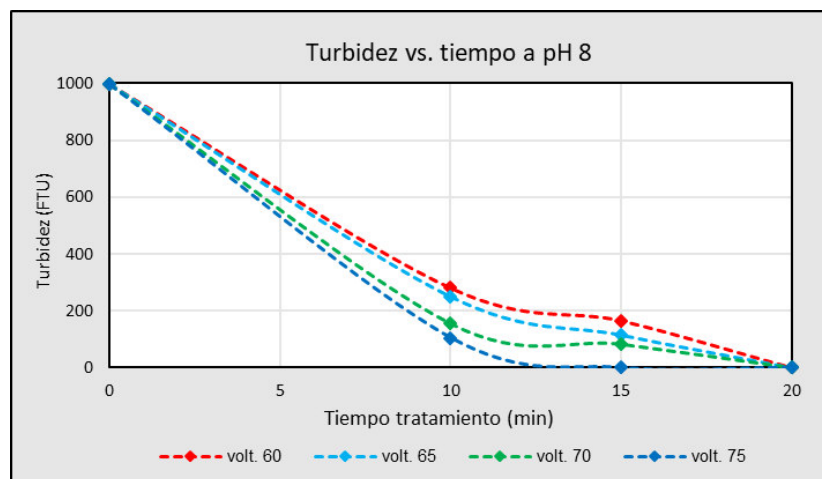
Resultados de la turbidez en función del voltaje y tiempo, a pH 8

Condiciones pH inicial del efluente				
pH = 8.0				
Tiempo (min)	Turbidez final (FTU)			
	60 V	65 V	70 V	75 V
0	996	996	996	996
10	280	250	155	105
15	165	115	83	0
20	0	0	0	0

En la figura 32 se muestra la variación de la turbidez con respecto a la variación de la tensión y el tiempo, a pH 8.

Figura 32

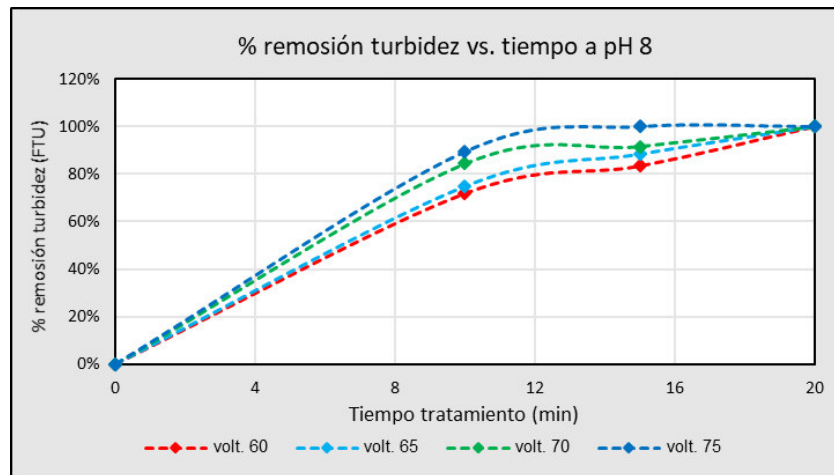
Variación de la turbidez en función del voltaje y tiempo, a pH 8



En la figura 33, con los resultados de la tabla 15, se muestran las eficiencias de remoción de la turbidez a pH 8 en función de la tensión y el tiempo, observándose el aumento del porcentaje de remoción de la turbidez conforme aumenta la tensión para un mismo tiempo.

Figura 33

Porcentaje de remoción de la turbidez en función del voltaje y tiempo, a pH 8.



En la tabla 16 se muestra el comportamiento de la turbidez a pH 10 en función del tiempo y a los distintos niveles de tensión (60V, 65V, 70V y 75V).

Tabla 16

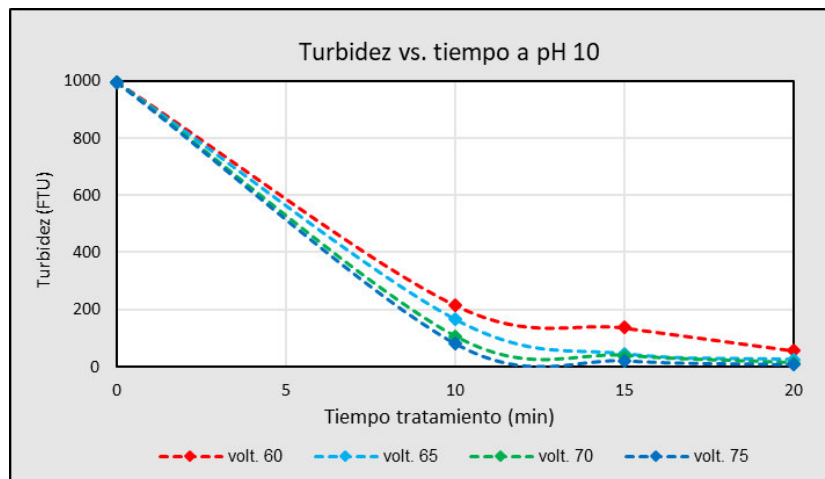
Resultados de la turbidez en función del voltaje y tiempo, a pH 10

Condiciones pH inicial del efluente				
pH = 10.0				
Tiempo (min)	Turbidez final (FTU)			
	60 V	65 V	70 V	75 V
0	996	996	996	996
10	215	165	105	81
15	136	45	38	21
20	56	25	13	8

En la figura 34 se muestra la variación de la turbidez con respecto a la variación de la tensión y el tiempo, a pH 10.

Figura 34

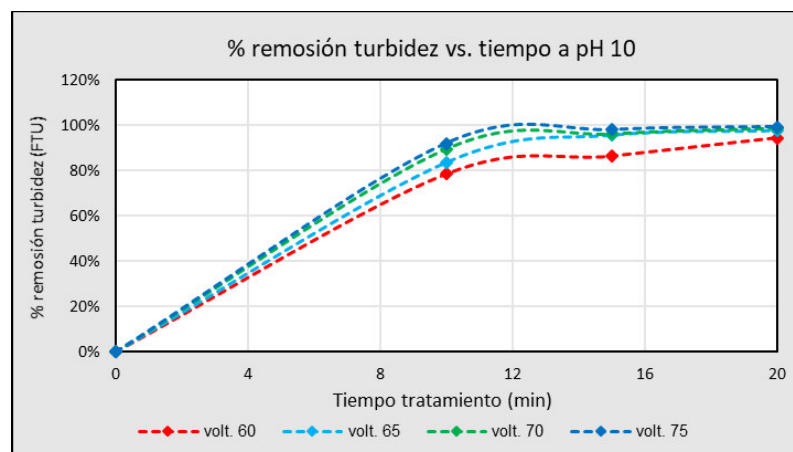
Variación de la turbidez en función del voltaje y tiempo, a pH 10



En la figura 35, con los resultados de la tabla 16, se muestran las eficiencias de remoción de la turbidez a pH 10 en función de la tensión y el tiempo, observándose el aumento del porcentaje de remoción de la turbidez conforme aumenta la tensión para un mismo tiempo.

Figura 35

Porcentaje de remoción de la turbidez en función del voltaje y tiempo, a pH 10



Resultados de Análisis Estadísticos

De acuerdo con el diseño experimental planteado para la evaluación de la remoción de los metales pesados (cobre, níquel, zinc y cromo) en efluentes galvánicos se distribuyó las variables estadísticas y sus tratamientos, evaluando los resultados de la

electrocoagulación mediante un análisis de varianza (ANOVA) estableciendo un $p < 0.05$. Para el análisis estadístico se utilizó como herramienta el programa STATGRAPHICS Centurion XVI.I y el Minitab 19.

El análisis de varianza (ANOVA) está basado en la comprobación de las siguientes hipótesis:

- H_0 (hipótesis Nula): El pH y el voltaje son factores que no inciden en la remoción de metales pesados.
- H_i (hipótesis Alternativa): El pH y el voltaje son factores que inciden en la remoción de metales pesados.

El modelo estadístico utilizado para el análisis está dado por:

$$y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

$$i = 1, \dots, a \text{ (1,2,3,4)}$$

$$j = 1, \dots, b \text{ (1,2,3)}$$

$$k = 1, \dots, n \text{ (1,2)}$$

Donde:

μ : es el porcentaje medio global de remoción de metales pesados.

α_i : es el efecto al i -ésimo nivel causado por el nivel i del factor A (voltaje).

β_j : es el efecto al j -ésimo causado por el nivel j del factor B (pH).

$(\alpha\beta)_{ij}$: es el efecto causado por la interacción del nivel i del factor voltaje y el nivel j del factor pH.

ε_{ijk} : es el error aleatorio.

El modelo de regresión lineal está dado por:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \varepsilon$$

Donde:

β_0 : media global.

β_1 : es el efecto al i-ésimo nivel causado por el nivel i del factor A (voltaje).

β_2 : el efecto al j-ésimo causado por el nivel j del factor B (pH).

$(\alpha\beta)_{ij}$: el efecto causado por la interacción del nivel i del factor voltaje y el nivel j del factor pH.

Prueba de Normalidad para el pH y el Voltaje

Se realizó una prueba de normalidad a las variables pH y voltaje planteándose el siguiente criterio para la prueba de hipótesis:

H_0 : hipótesis nula, Si $P > 0.05$ La distribución es Normal.

H_1 : hipótesis alterna, Si $P < 0.05$ No existe distribución Normal.

Aplicamos la prueba de Shapiro-Wilk que se utiliza para muestras menores a 30 datos u observaciones (en el estudio se utilizaron 24 datos), la cual indica que el P tiene que ser mayor al 0.05 para la validación de datos normales. En las tablas 17 y 18 se analiza la prueba de normalidad para las variables pH y voltaje, en la cual se observa que el P es mayor al 0.05, para la validación de datos normales, por lo cual se valida la prueba de normalidad.

Tabla 17*Prueba de normalidad para el pH (Shapiro – Wilk)*

Pruebas de normalidad para el pH							
pH		Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Cromo	6	0.188	4		0.971	4	0.850
	8	0.210	4		0.963	4	0.799
	10	0.223	4		0.933	4	0.609
Cobre	6	0.269	4		0.917	4	0.522
	8	0.233	4		0.961	4	0.786
	10	0.412	4		0.673	4	0.051
Niquel	6	0.309	4		0.804	4	0.110
	8	0.374	4		0.768	4	0.056
	10	0.234	4		0.924	4	0.559
Zinc	6	0.210	4		0.942	4	0.667
	8	0.378	4		0.778	4	0.069
	10	0.293	4		0.864	4	0.274

Tabla 18*Prueba de normalidad para el voltaje (Shapiro – Wilk)*

Pruebas de normalidad para el voltaje							
voltaje		Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Cromo	60	0.265	3		0.954	3	0.586
	65	0.345	3		0.838	3	0.210
	70	0.280	3		0.937	3	0.517
	75	0.357	3		0.815	3	0.150
Cobre	60	0.279	3		0.939	3	0.523
	65	0.315	3		0.892	3	0.360
	70	0.327	3		0.872	3	0.301
	75	0.383	3		0.756	3	0.131
Niquel	60	0.301	3		0.911	3	0.422
	65	0.349	3		0.832	3	0.192
	70	0.364	3		0.800	3	0.115
	75	0.373	3		0.778	3	0.064
Zinc	60	0.384	3		0.753	3	0.060
	65	0.373	3		0.779	3	0.065
	70	0.365	3		0.797	3	0.107
	75	0.357	3		0.815	3	0.151

Análisis de Varianza (ANOVA) para la Remoción del Cromo

Se realizó un análisis de varianza para determinar qué factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre la remoción del cromo. La validación de los supuestos se encuentra en el Anexo B. En la tabla 19 y 20 se muestra el resumen del análisis de varianza.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo así ajustado explica 97.0645% de la variabilidad en remoción del Cromo. El estadístico R-Cuadrada ajustada, que es más apropiada para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 94.6183%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 0.0289882. El error absoluto medio (MAE) de 0.01655 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se presentan en el archivo de datos. Puesto que el valor-P es mayor que 0.05, no hay indicación de una autocorrelación serial en los residuos con un nivel de confianza del 95.0%.

R-cuadrada = 97.0645 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 94.6183 por ciento

Error estándar del estimado = 0.0289882

Error absoluto medio = 0.01655

Estadístico Durbin-Watson = 3.29294 (P=0.8840)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0.681355

Tabla 19

Análisis de varianza para el porcentaje de remoción del cromo

Análisis de Varianza de dos factores: % remoción cromo vs. Voltaje, pH					
Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado Medio	F calculado	F crítico
Regresión	5	0.16671	0.03334	39.67	0.0000
A: pH	1	0.13008	0.13008	154.78	0.0000
B: voltaje	1	0.02240	0.02240	26.66	0.0020
AA	1	0.00628	0.00628	7.47	0.0340
BB	1	0.00141	0.00141	1.68	0.2420
AB	1	0.00654	0.00654	7.78	0.0320
Error	6	0.00504	0.00084		
Total	11	0.17175			
$R^2 = 97.06\%$					

Tabla 20

Coeficientes de regresión para el porcentaje de remoción del cromo

Coeficientes codificados				
Parámetro	Estimación	Error Estándar	Estadístico T	Valor-P
Constante	0.8606	0.0179	48.15	0.0000
A: pH	-0.1275	0.0102	-12.44	0.0000
B: voltaje	0.058	0.0112	5.16	0.0020
AA	-0.0485	0.0178	-2.73	0.0340
BB	-0.0244	0.0188	-1.3	0.2420
AB	0.0384	0.0138	2.79	0.0320

Los resultados de ajustar un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre cromo y las variables independientes, está dado por la siguiente ecuación lineal ajustada:

$$Cr = 0.8606 - 0.1275 \cdot \text{pH} + 0.058 \cdot \text{Voltaje} + 0.0384 \cdot \text{pH} \cdot \text{Voltaje} - 0.0485 \cdot \text{pH} \cdot \text{pH} - 0.0244 \cdot \text{Voltaje} \cdot \text{Voltaje}$$

Para determinar si el modelo puede simplificarse, note que el valor-P más alto de las variables independientes es 0.2420, que corresponde a Voltaje*Voltaje. Puesto que el valor-

P es mayor o igual que 0.05, ese término no es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95.0% o mayor.

En lo que se refiere a la significatividad de los factores y su interacción, a un nivel de confianza del 95%, en las tablas 19 se muestran valores de F críticos menores a 0.05 de los factores mostrando un efecto estadísticamente significativo para la reducción de la concentración del cromo. Por lo dicho podemos concluir que se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna porque los factores y su interacción inciden en la remoción del cromo.

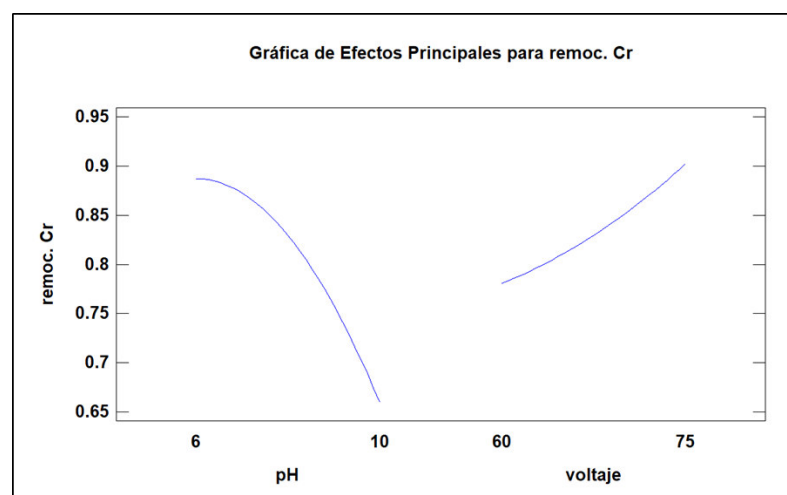
H_0 : El pH y el voltaje factores que no inciden en la remoción de cromo.

H_1 : El pH y el voltaje son factores que inciden en la remoción de cromo.

Efectos Principales para la Remoción del Cromo. En la figura 36, se puede observar la incidencia que tienen por separado los factores en la disminución de la concentración del cromo, mostrando los puntos máximos y mínimos en cada uno de los factores.

Figura 36

Efectos principales para la remoción del cromo



Superficie de Respuesta para la Remoción del Cromo. En la figura 37, se muestra la superficie de respuestas que permite observar la relación de los factores utilizados durante el proceso experimental para la reducción del cromo de acuerdo con el modelo ajustado de los datos.

Figura 37

Superficie de respuesta para la remoción del cromo.

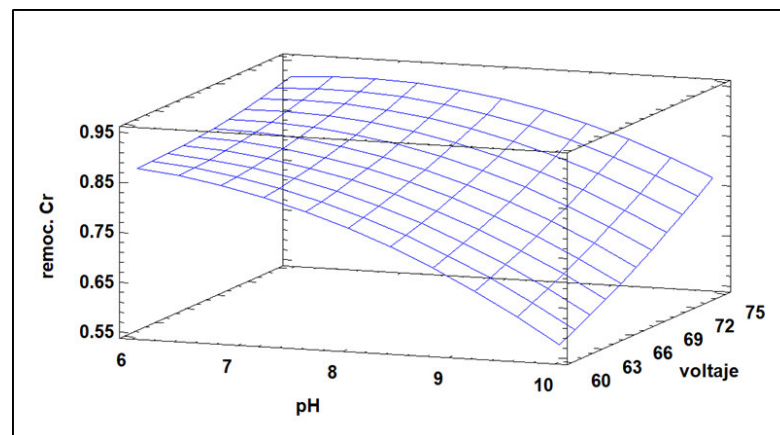
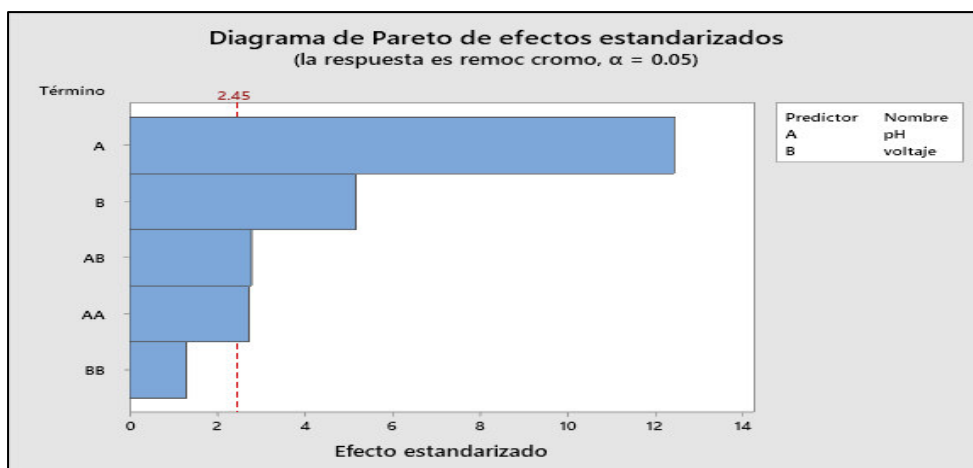


Diagrama de Pareto para la Remoción del Cromo. El diagrama de Pareto permite asignar un orden de prioridades de los factores significativos en el proceso de remoción del cromo. La línea vertical se emplea para estimar cuales efectos son estadísticamente significativos, cualquier barra que cruce la línea corresponde a un efecto estadísticamente significativo con el nivel de confianza del 95%. En la figura 38, el único valor que no sobrepasa la línea vertical es la interacción BB, el cual se considera como un factor no significativo en el proceso de remoción del cromo. Para este caso los factores que sobrepasan la línea vertical son el pH, el voltaje y las interacciones AA y AB las cuales afectan en forma significativa el porcentaje de remoción del cromo.

Figura 38

Diagrama de Pareto Estandarizado para la Remoción del Cromo



Análisis de Varianza (ANOVA) para la Remoción del Cobre

Se realizó un análisis de varianza para determinar qué factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre la remoción del cobre. La validación de los supuestos se encuentra en el Anexo B. En la tabla 21 y 22, se muestra el resumen del análisis de varianza. El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo así ajustado explica 94.1129% de la variabilidad en la remoción del Cobre. El estadístico R-Cuadrada ajustada, que es más apropiada para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 89.2069%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 0.0361315. El error absoluto medio (MAE) de 0.0215241 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa. Puesto que el valor-P es menor que 0.05, hay indicación de una posible correlación serial con un nivel de confianza del 95.0%.

R-cuadrada = 94.1129 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 89.2069 por ciento

Error estándar del estimado = 0.0361315

Error absoluto medio = 0.0215241

Estadístico Durbin-Watson = 1.39984 (P=0.0091)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = 0.17965

Tabla 21

Análisis de varianza para el porcentaje de remoción del cobre

Análisis de Varianza de dos factores: % remoción cobre vs. Voltaje, pH					
Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado Medio	F calculado	F crítico
Regresión	5	0.15543	0.03109	11.53	0.0050
A: pH	1	0.12930	0.12930	47.95	0.0000
B: voltaje	1	0.00113	0.00113	0.42	0.5410
AA	1	0.01277	0.01277	4.73	0.0720
BB	1	0.00366	0.00366	1.36	0.2880
AB	1	0.00857	0.00857	3.18	0.1250
Error	6	0.01618	0.00270		
Total	11	0.17161			
$R^2 = 94.11\%$					

Tabla 22

Coefficientes de regresión para el porcentaje de remoción del cobre

Coefficientes codificados				
Parámetro	Estimación	Error Estándar	Estadístico T	Valor-P
Constante	0.9413	0.032	29.4	0.0000
A: pH	-0.1271	0.0184	-6.92	0.0000
B: voltaje	-0.013	0.0201	-0.65	0.5410
AA	-0.0692	0.0318	-2.18	0.0720
BB	-0.0393	0.0337	-1.17	0.2880
AB	-0.0439	0.0246	-1.78	0.1250

Los resultados de ajustar un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre cobre y las variables independientes, está dado por la siguiente ecuación lineal ajustada:

$$Cu = 0.9413 + 0.1271 \cdot \text{pH} + 0.013 \cdot \text{Voltaje} - 0.0439 \cdot \text{pH} \cdot \text{Voltaje} - 0.0692 \cdot \text{pH} \cdot \text{pH} - 0.0393 \cdot \text{Voltaje} \cdot \text{Voltaje}$$

Para determinar si el modelo puede simplificarse, note que el valor-P más alto de las variables independientes es 0.2880, que corresponde a Voltaje*Voltaje. Puesto que el valor-

P es mayor o igual que 0.05, ese término no es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95.0% o mayor.

En lo que se refiere a la significatividad de los factores y su interacción, a un nivel de confianza del 95%, en la tabla 21 se muestran valores de F críticos menores a 0.05 para el factor pH mostrando un efecto estadísticamente significativo para la reducción de la concentración del cobre, por lo cual se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna debido a que el pH incide en mayor magnitud que el voltaje y su interacción, en la remoción del cobre.

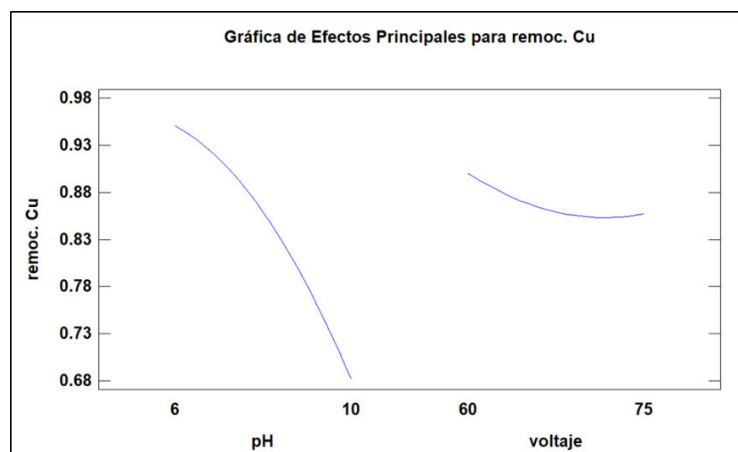
H_0 : El pH y el voltaje factores que no inciden en la remoción de cobre.

H_1 : El pH y el voltaje son factores que inciden en la remoción de cobre.

Efectos Principales para la Remoción del Cobre. En la figura 39, se puede observar la incidencia que tienen por separado los factores en la disminución de la concentración del cobre, mostrando los puntos máximos y mínimos en cada uno de los factores.

Figura 39

Efectos principales para la remoción del cobre



Superficie de Respuesta para la Remoción del Cobre. En la figura 40, se muestra la superficie de respuestas que permite observar la relación de los factores utilizados durante el proceso experimental para la reducción del cobre de acuerdo con el modelo ajustado de los datos.

Figura 40

Superficie de Respuesta para la Remoción del Cobre

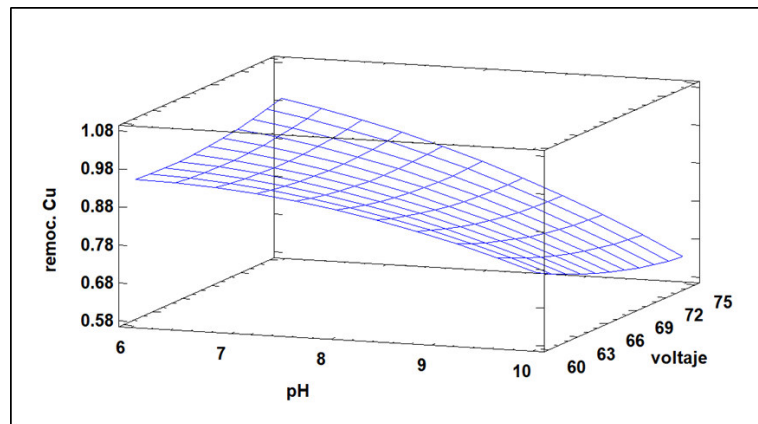
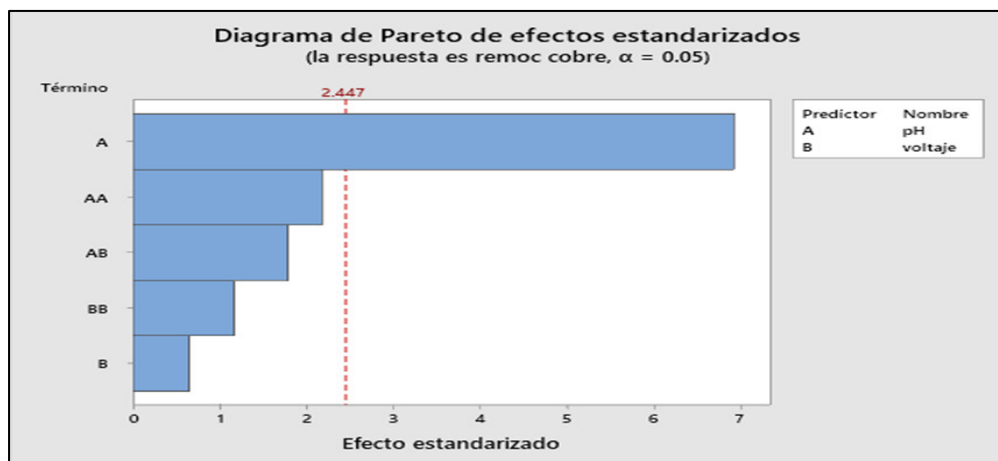


Diagrama de Pareto para la Remoción del Cobre. El diagrama de Pareto permite asignar un orden de prioridades de los factores significativos en el proceso de remoción del cobre. La línea vertical se emplea para estimar cuales efectos son estadísticamente significativos, cualquier barra que cruce la línea corresponde a un efecto estadísticamente significativo con el nivel de confianza del 95%. En la figura 41 el único valor que sobrepasa la línea vertical es el factor pH, el cual se considera como un factor significativo en el proceso de remoción del cobre. Para este caso los factores que no son significativos son las interacciones AB, AA, BB y el voltaje.

Figura 41

Diagrama de Pareto estandarizado para la remoción del cobre



Análisis de Varianza (ANOVA) para la Remoción del Níquel

Se realizó un análisis de varianza para determinar qué factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre la remoción del níquel. La validación de los supuestos se encuentra en el Anexo B. En las tablas 23 y 24 se muestra el resumen del análisis de varianza.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo así ajustado explica 98.993% de la variabilidad en la remoción del Níquel. El estadístico R-Cuadrada ajustada, que es más apropiada para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 98.1538%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 0.0223678. Este valor puede usarse para construir límites para nuevas observaciones, seleccionando la opción de Reportes del menú de texto. El error absoluto medio (MAE) de 0.0130697 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación. Puesto que el valor-P es menor que 0.05, hay indicación de una posible correlación serial con un nivel de confianza del 95.0%.

R-cuadrada = 98.993 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 98.1538 por ciento

Error estándar del estimado = 0.0223678

Error absoluto medio = 0.0130697

Estadístico Durbin-Watson = 1.33588 (P=0.0065)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = 0.31287

Tabla 23

Análisis de varianza para el porcentaje de remoción del níquel.

Análisis de Varianza de dos factores: % remoción níquel vs. Voltaje, pH					
Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado Medio	F calculado	F crítico
Regresión	5	0.35326	0.07065	126.91	0.0000
A: pH	1	0.28890	0.28890	518.95	0.0000
B: voltaje	1	0.00092	0.00092	1.65	0.2470
AA	1	0.06099	0.06099	109.56	0.0000
BB	1	0.00025	0.00025	0.44	0.5300
AB	1	0.00220	0.00220	3.95	0.0940
Error	6	0.00334	0.00056		
Total	11	0.35660			
$R^2 = 98.99\%$					

Tabla 24

Coefficientes de regresión para el porcentaje de remoción del níquel

Coeficientes codificados				
Parámetro	Estimación	Error Estándar	Estadístico T	Valor-P
Constante	0.9096	0.0145	62.52	0.0000
A: pH	-0.19003	0.00834	-22.78	0.0000
B: voltaje	-0.01172	0.00914	-1.28	0.2470
AA	-0.1512	0.0144	-10.47	0.0000
BB	-0.0102	0.0153	-0.67	0.5300
AB	-0.0223	0.0112	-1.99	0.0940

Los resultados de ajustar un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre cobre y las variables independientes, está dado por la siguiente ecuación lineal ajustada:

$$Ni = 0.9096 - 0.19003 \cdot pH - 0.01172 \cdot Voltaje - 0.0223 \cdot pH \cdot Voltaje - 0.1512 \cdot pH \cdot pH - 0.0102 \cdot Voltaje \cdot Voltaje$$

Para determinar si el modelo puede simplificarse, note que el valor-P más alto de las variables independientes es 0.5300, que corresponde a Voltaje*Voltaje. Puesto que el valor-P es mayor o igual que 0.05, ese término no es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95.0% o mayor.

En lo que se refiere a la significatividad de los factores y su interacción, a un nivel de confianza del 95%, en la tabla 23 se muestran valores de F críticos menores a 0.05 del factor pH y de las interacciones AA y BB mostrando un efecto estadísticamente significativo para la reducción de la concentración del níquel. Por lo dicho podemos concluir que se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna porque el factor pH y la interacción AA inciden en la remoción del níquel.

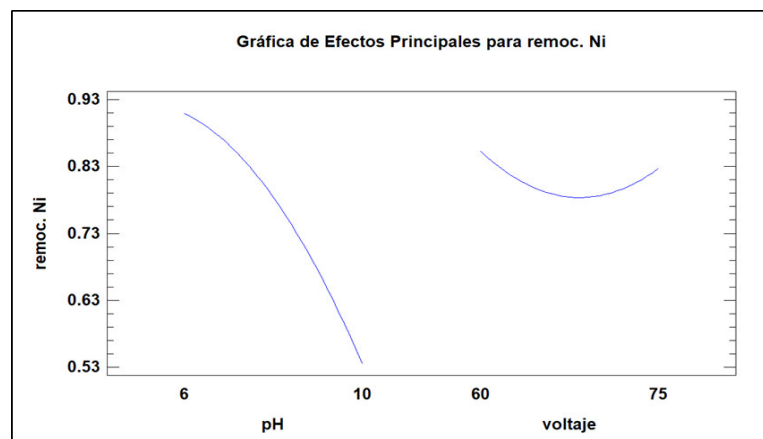
H_0 : El pH y el voltaje factores que no inciden en la remoción de níquel.

H_1 : El pH y el voltaje son factores que inciden en la remoción de níquel.

Efectos Principales para la Remoción del Níquel. En la figura 42 se puede observar la incidencia que tienen por separado los factores en la disminución de la concentración del níquel, mostrando los puntos máximos y mínimos en cada uno de los factores.

Figura 42

Efectos principales para la remoción del níquel



Superficie de Respuesta para la Remoción del Níquel. En la figura 43 se muestra la superficie de respuestas que permite observar la relación de los factores utilizados durante el proceso experimental para la reducción del níquel de acuerdo con el modelo ajustado de los datos.

Figura 43

Superficie de repuesta para la remoción del níquel

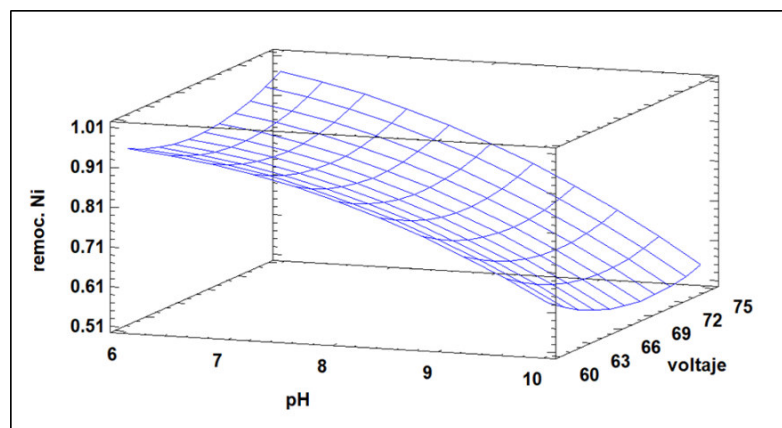
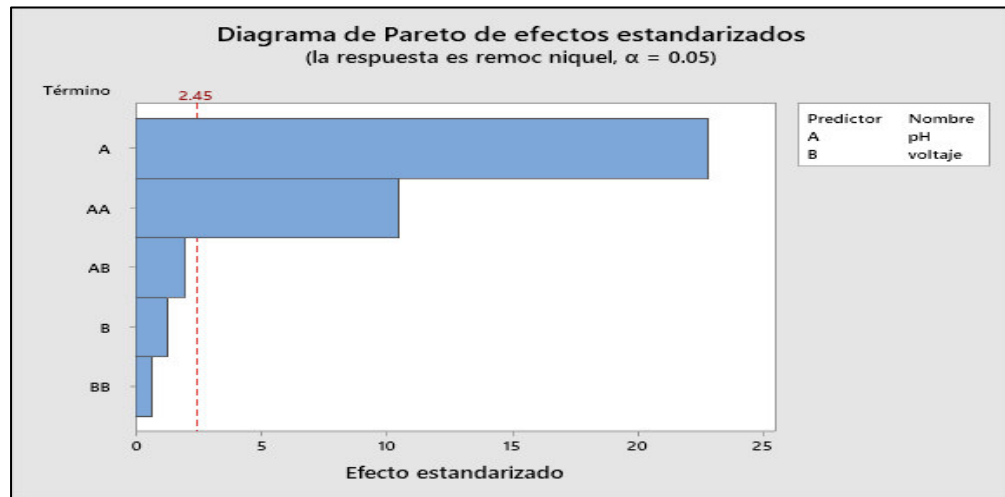


Diagrama de Pareto para la Remoción del Níquel. El diagrama de Pareto permite asignar un orden de prioridades de los factores significativos en el proceso de remoción del níquel. La línea vertical se emplea para estimar cuales efectos son estadísticamente significativos, cualquier barra que cruce la línea corresponde a un efecto estadísticamente significativo con el nivel de confianza del 95%. En la figura 44 los únicos valores que no sobrepasan la línea vertical son el factor voltaje y las interacciones AB y BB, los cuales se consideran como factores no significativos en el proceso de remoción del níquel. Sin embargo, el factor pH y la interacción AA afectan de forma significativa el porcentaje de remoción del níquel por sobrepasar sus valores la línea vertical.

Figura 44

Diagrama de Pareto estandarizado para la remoción del níquel



Análisis de Varianza (ANOVA) para la Remoción del Zinc

Se realizó un análisis de varianza para determinar qué factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre la remoción del zinc. La validación de los supuestos se encuentra en el Anexo B. En las tablas 25 y 26, se muestra el resumen del análisis de varianza. El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo así ajustado explica 93.6166% de la variabilidad en la remoción del zinc. El estadístico R-Cuadrada ajustada, que es más apropiada para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 88.2971%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 0.0272254. El error absoluto medio (MAE) de 0.016143 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa. Puesto que el valor-P es menor que 0.05, hay indicación de una posible correlación serial con un nivel de confianza del 95.0%.

R-cuadrada = 93.6166 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 88.2971 por ciento

Error estándar del estimado = 0.0272254

Error absoluto medio = 0.016143

Estadístico Durbin-Watson = 1.62028 (P=0.0253)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = 0.187105

Tabla 25

Análisis de varianza para el porcentaje de remoción del zinc

Análisis de Varianza de dos factores: % remoción zinc vs. Voltaje, pH					
Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado Medio	F calculado	F crítico
Regresión	5	0.07079	0.01416	17.66	0.0020
A: pH	1	0.06091	0.06091	75.98	0.0000
B: voltaje	1	0.00001	0.00001	0.01	0.9330
AA	1	0.00402	0.00402	5.01	0.0670
BB	1	0.00117	0.00117	1.46	0.2720
AB	1	0.00468	0.00468	5.84	0.0520
Error	6	0.00481	0.00080		
Total	11	0.07560			
R ² = 93.62%					

Tabla 26

Coefficientes de regresión para el porcentaje de remoción del zinc

Coeficientes codificados				
Parámetro	Estimación	Error Estándar	Estadístico T	Valor-P
Constante	0.9307	0.0175	53.31	0.0000
A: pH	-0.0873	0.01	-8.72	0.0000
B: voltaje	-0.001	0.011	-0.09	0.9330
AA	-0.0388	0.0173	-2.24	0.0670
BB	-0.0222	0.0184	-1.21	0.2720
AB	-0.0324	0.0134	-2.42	0.0520

Los resultados de ajustar un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre cobre y las variables independientes, está dado por la siguiente ecuación lineal ajustada:

$$\text{Zn} = 0.9307 - 0.0873 \cdot \text{pH} - 0.001 \cdot \text{Voltaje} - 0.0324 \cdot \text{pH} \cdot \text{Voltaje} - 0.0388 \cdot \text{pH} \cdot \text{pH} - 0.0222 \cdot \text{Voltaje} \cdot \text{Voltaje}$$

Para determinar si el modelo puede simplificarse, note que el valor-P más alto de las variables independientes es 0.9330, que corresponde a Voltaje. Puesto que el valor-P es mayor o igual que 0.05, ese término no es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95.0% o mayor.

En lo que se refiere a la significatividad de los factores y su interacción, a un nivel de confianza del 95%, en la tabla 25 se muestran valores de F críticos menores a 0.05 para el factor pH mostrando un efecto estadísticamente significativo para la reducción de la concentración del zinc, por lo cual se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna debido a que el pH incide en mayor magnitud que el voltaje y su interacción, en la remoción del zinc.

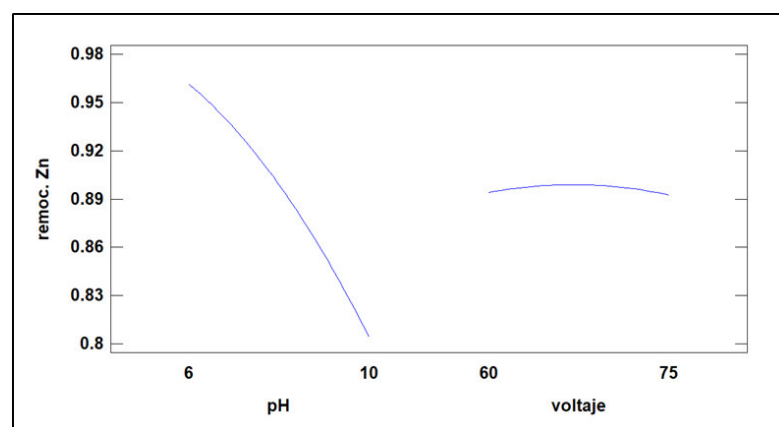
H_0 : El pH y el voltaje factores que no inciden en la remoción de zinc.

H_1 : El pH y el voltaje son factores que inciden en la remoción de zinc.

Efectos principales para la remoción del Zinc. En la figura 45 se puede observar la incidencia que tienen por separado los factores en la disminución de la concentración del zinc, mostrando los puntos máximos y mínimos en cada uno de los factores.

Figura 45

Efectos principales para la remoción del zinc



Superficie de respuesta para la remoción del zinc. En la figura 46 se muestra la superficie de respuestas que permite observar la relación de los factores utilizados durante el proceso experimental para la reducción del zinc de acuerdo con el modelo ajustado de los datos.

Figura 46

Superficie de respuesta para la remoción del zinc

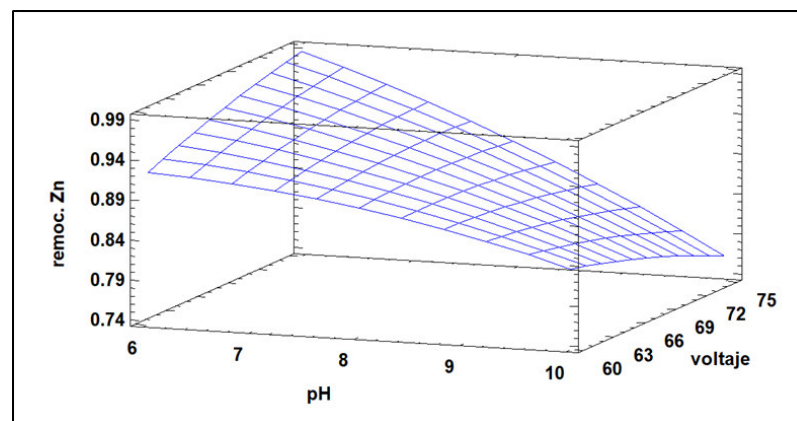
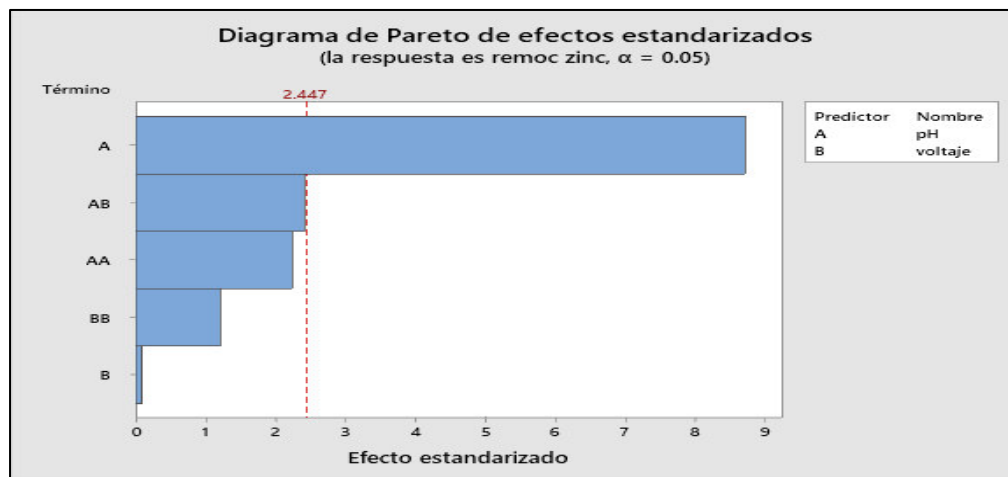


Diagrama de Pareto para la Remoción del Zinc. El diagrama de Pareto permite asignar un orden de prioridades de los factores significativos en el proceso de remoción del zinc. La línea vertical se emplea para estimar cuales efectos son estadísticamente significativos, cualquier barra que cruce la línea corresponde a un efecto estadísticamente significativo con el nivel de confianza del 95%. En la figura 47 se observa que los valores que sobrepasan la línea vertical son el factor pH afectando de forma significativa la remoción el zinc. Para este caso los factores que no son significativos son las interacciones AA, AB, BB y el voltaje.

Figura 47

Diagrama de Pareto estandarizado para la remoción del zinc



Discusión de Resultados

De acuerdo con los resultados finales en la aplicación de la electrocoagulación en efluentes galvánicos, se ha obtenido una máxima remoción de los metales pesados de 94.5% del Cr, 98.8% del Cu, 95.2% del Ni y 99.3% del Zn en un proceso continuo a pH 6 y 23°C, una turbidez de 996 FTU y una conductividad de 5.8 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Los resultados de Morales (2010), indica que obtuvo reducciones menores en aguas del mismo tipo de estudio llegando a 51.65% en Cr, Ni del 18% y Zn del 47.37% trabajando a pH 3.18, conductividad 21.83 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 48.5°C (p. 33).

Resultados similares también fueron observados por Bhagawan et al., (2014) donde menciona que a pH 8, electrodos de hierro y a una distancia de 1 cm, se obtuvieron altos porcentajes de remoción 98.9% para el Cu, 96.4% para el Ni y 98.9% para el zinc (p. 5).

En la tabla 10, se observan los resultados de remoción, en el rango de pH de 6 a 8, observándose que para este estudio los valores más altos de remoción se obtienen a un pH 6, para luego disminuir a pH 10. Valores similares también fueron observados por Dermentzis (2011) en la cual menciona que a pH entre 4 a 8, con electrodos de hierro, se obtienen altos porcentajes de remoción casi constantes para luego disminuir a pH 10 (p. 11).

También Riyad et al., (2008) menciona que a un pH 7 se alcanzan eficiencias de 99% para cobre, níquel y zinc y que no se verán afectadas si el rango de pH está entre 7 y 12. En contraste menciona que la eficiencia de remoción del cromo levemente disminuye a medida que el pH se incrementa por encima de 7 (p. 4).

Los resultados de la eficiencia de remoción de los metales cobre, níquel, cromo y zinc en los efluentes galvánicos, muestran que el pH tiene un efecto significativo durante el proceso de electrocoagulación. A pH 6 se obtienen los mayores porcentajes de remoción, 94.5% Cr, 98.8% Cu, 95.2% Ni y 99.3% Zn. El proceso de electrocoagulación es una técnica confiable, seguro y rentable, así lo afirma Dermentzis (2011) al obtener valores similares de remoción por encima de 97% para Cu, Ni, Zn y por encima del 80% para Cr, para un rango de trabajo de pH 4 a 10, indicando que los porcentajes de remoción permanecen casi constantes entre pH 4 a 9, disminuyendo a pH 10 (p. 11).

Vik et al., (1984) afirma que el pH tiene un efecto considerable en la eficiencia del proceso de electrocoagulación. Si el pH inicial es menor a pH 7 se observará un aumento atribuido a la formación de hidrógeno y la generación de iones OH^- en los cátodos. Por el contrario, en un medio alcalino ($\text{pH} > 8$) el pH final no cambiará marcadamente porque los iones OH^- generados en los cátodos son consumidos por los iones Fe^{+3} generados en el ánodo para formar los flóculos $\text{Fe}(\text{OH})_3$; además, estos iones OH^- pueden combinarse parcialmente con los iones Ni^{+2} , Cu^{+2} , Zn^{+2} y Cr^{+3} por esta razón, en medio alcalino el pH no se incrementó sino se registró una ligera disminución (p. 5).

CONCLUSIONES

Con el proceso de electrocoagulación se ha logrado desestabilizar los contaminantes presentes en los efluentes galvánicos generando una eficiencia de remoción de cromo (94.5%), cobre (98.8%), níquel (95.2%) y zinc (99.3%).

Conforme al análisis estadístico (ANOVA) se concluye que el pH en el proceso de electrocoagulación influye de manera significativa en el porcentaje de reducción de los metales cromo, cobre, níquel y zinc de los efluentes galvánicos, constituyéndose en un factor determinante en el proceso.

Al aplicar la técnica de electrocoagulación a la muestra de agua residual galvánica, se concluyó que el voltaje influye significativamente en la remoción del cromo, a diferencia en la remoción de los contaminantes de cobre, níquel y zinc donde el voltaje no influye significativamente, como se puede observar en la figura 38.

El diseño planteado del reactor de electrocoagulación para un proceso continuo, en el tratamiento de aguas residuales de tipo galvánico, resultó ser efectivo en la remoción de carga contaminante porque su aplicación permitió la remoción de los metales pesados Cr, Cu, Ni y Zn presentes.

RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar el estudio a diferentes distancias de separación entre los electrodos para un sistema de electrocoagulación de flujo continuo para poder analizar en qué medida influye en la remoción de metales pesados en los efluentes industriales de tipo galvánico.

Se recomienda hacer el estudio con diferente tipo de fuente de energía, como es el caso de paneles solares, para verificar la variación de los parámetros de operación.

Se recomienda estudiar la utilización de electrodos inertes a fin de comparar su consumo y eficiencia de remoción, con los ánodos solubles tradicionales (hierro / aluminio).

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

- Acosta G., Bourdón A., Coy C. Evaluación y regulación de parámetros en un equipo diseñado para la disminución de cromo (VI), provenientes de la industria de recubrimientos galvánicos. Granada, Bogotá – Colombia 2013. Universidad Militar Nueva. Disponible en:
https://www.researchgate.net/publication/291199519_Evaluacion_y_regulacion_de_parametros_en_un_equipo_diseñado_para_la_disminucion_de_CromoVI_provenientes_de_la_industria_de_recubrimientos_galvanicos
- Adhoum N., Monser L., Bellakhal N. y Belgaed J. "Treatment of electroplating wastewater containing Cu^{+2} , Zn^{+2} and $Cr(VI)$ by electrocoagulation" Journal of Hazardous Materials B112 (2004) 207-213. Disponible en:
- Agencia para Sustancias Tóxicas y Registro de Enfermedades (ATSDR), Cromo, CAS ID #: 7440-47-3, Septiembre 2008. Disponible en:
<http://www.ladep.es/ficheros/documentos/Cromo.%20TOXFAQs.pdf>
- Aguilar E., Evaluación de la eficiencia de una celda de electrocoagulación a escala laboratorio para el tratamiento de agua. Tesis para optar Grado Académico de Magister. UNMSM Lima – Perú 2015. Disponible en:
http://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/handle/cybertesis/4303/Aguilar_ae.pdf?sequence=3
- Arango A., Garcés L., "Diseño de una celda de electrocoagulación" Revista Universidad EAFIT, Vol. 43, No. 147, pp56-67. Disponible en:
<https://www.redalyc.org/pdf/215/21514706.pdf>
- Arango, A. "La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales" Revista Lasallista de Investigación, vol. 2, núm. 1, enero-junio, 2005, pp. 49-56. Disponible en:
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=69520109>
- Ardila E.J., Universidad de Los Andes, Bogotá D.C., "Evaluación preliminar del proceso de electrólisis como alternativa para la recuperación de metales pesados en la industria galvánica – estudio para níquel" Colombia 2005
- Bazrafshan E., Naseri S., Mesdaghinia A., "Performance Evaluation of Electrocoagulation Process for Removal of Chromium (VI) from Synthetic Chromium Solutions Using Iron and aluminum electrodes" Tehran University of Medical Sciences, Tehran-IRAN 2006. Disponible en:
<https://pdfs.semanticscholar.org/611e/471561cf4922a59924ab4f5b271262f47460.pdf>
- Cardona M., Minimización de Residuos: una política de gestión ambiental empresarial" Revista Producción+Limpia Julio-diciembre 2006 – Vol. I No. 2. Págs. 43-57. Disponible en:
http://www.lasallista.edu.co/fxcu/medial/pdf/revistalimpia/vol1n2/pl_v1n2_46-57_minimizaci%C3%B3n.pdf
- Centro Nacional de Producción más Limpia y Tecnologías Ambientales "Optimización de Procesos Galvánicos" Medellín – Colombia 2000. Disponible en:

www.cnpml.org

Centro Nacional de Producción Limpia (2001). Guía de Producción más limpia para el Sector de recubrimientos electrolíticos en Colombia. Medellín-Colombia.

Comisión Nacional del Medio Ambiente (2012). Guía para el Control y Prevención de la Contaminación Industrial Galvanoplastia. Santiago de Chile.

Corporación de Investigación Tecnológica de Chile Santiago de Chile "Producción limpia en el rubro de Galvanoplastia" - 2000. Disponible en:
www.intec.cl

Cueva P., Huarocastro A., (2015), Remoción de los contaminantes de agua residuales de la Planta Lechera "Mantaro" por el método de electrocoagulación mediante energía eólica, a nivel de laboratorio. Tesis de Grado. Huancayo-Perú. Universidad Nacional del Centro del Perú. Disponible en:
<http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/UNCP/3732>

Chávez A., (2009), Una alternativa limpia para el tratamiento de las aguas residuales galvánicas: Revisión bibliográfica. Revista Ingenierías Universidad de Medellín, volumen 8, No. 14, pp. 39-50 - ISSN 1692-3324 - enero-junio 2009/158 p. Medellín, Colombia. Disponible en:
<https://revistas.udem.edu.co/index.php/ingenierias/article/view/37>

Dermentzis K., A. Christoforidis, E. Valsamidou, (2011), Removal of hexavalent chromium from electroplating wastewater by electrocoagulation with iron electrodes, Global Nest Journal, Vol 13, No 4, pp 412-418. Greece Disponible en:
https://journal.gnest.org/sites/default/files/Journal%20Papers/412-418_770_Dermentzis_13-4.pdf

Dermentzis K., A. Christoforidis, E. Valsamidou. (2011), Removal of nickel, copper, zinc and chromium from synthetic and industrial wastewater by electrocoagulation. International Journal of Environmental Sciences. Vol 1, No 5, Greece. Disponible en:
<https://pdfs.semanticscholar.org/a234/09bb0052e6864143ff63cbda3296818952f1.pdf>

Desarrollado por U.S. EPA/SEDESOL Grupo de Trabajo Sobre la Prevención de la Contaminación, (1993), La minimización de residuos en la industria del acabado de metales.

Durante E., (2016), Tratamiento por electrocoagulación de aguas de cianuración generadas en el beneficio del oro en una zona minera del sur de Bolívar, Colombia. Colombia. Trabajo de Grado, Universidad de Córdoba. Disponible en:
<http://repositorio.unicordoba.edu.co/bitstream/handle/123456789/448/TRABAJO%20DE%20GRADO%202016%20-%20ELVIA%20VALERIA%20DURANTE%20YANEZ.pdf?sequence=1>

Franco J. / Cárcamo J. (2017), Evaluación de la eficiencia de un reactor de electrocoagulación a escala piloto para la remoción de algunos parámetros fisicoquímicos y microbiológicos presentes en las aguas residuales. Trabajo de Grado. Universidad Francisco de paula Santander Ocaña – Colombia. Disponible en:
<http://repositorio.ufpso.edu.co:8080/dspaceufpso/bitstream/123456789/1637/1/30542.pdf>

- Fundación Tekniker “Diagnóstico de los Planes de Producción Limpia en el sector de la Galvanoplastia en Argentina”. Disponible en:
www.ambiente.gov.ar/archivos/web/UPLCS/File/Informe%20final%20recubrimientos%20Patxi.pdf
- Guerrero A. (2017), Influencia del tiempo y voltaje en la disminución de la carga orgánica por electrocoagulación del agua residual de la Curtiembre Cuenca S.A.C. Tesis de Grado. Universidad Cesar Vallejo. Trujillo – Perú. Disponible en:
http://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/UCV/26426/guerrero_ca.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Jaramillo C., Jaramillo A., Taborda G., (2005), Construcción de un reactor electroquímico para electrocoagulación como método alternativo en la descontaminación de aguas residuales. Revista de la Universidad de Caldas, julio – diciembre 2005, págs. 145 – 158. Disponible en:
https://www.academia.edu/30996900/Construcci%C3%B3n_de_un_reactor_electroqu%C3%ADmico_para_electrocoagulaci%C3%B3n_como_m%C3%A9todo_alternativo_en_la_descontaminaci%C3%B3n_de_aguas_residuales
- Jimenez E.; Rangel E., (2011), Remoción de metales pesados en una muestra modelo mediante un proceso electroquímico. México. Universidad Veracruzana.
- Kitchen M.C. (2005), Evaluación técnica preliminar de la reducción de cromo hexavalente por medio de un proceso electrolítico. Bogotá D.C., Colombia, Universidad de Los Andes.
- Konstantinos Dermentzis, (2011), Removal of nickel, copper, zinc and chromium from synthetic and industrial wastewater by electrocoagulation. International Journal of Environmental Sciences Volume 1, No 5. Disponible en:
<https://pdfs.semanticscholar.org/a234/09bb0052e6864143ff63cbda3296818952f1.pdf>
- Lavorante M. J.; Álvarez H.; Chantrill C. y Fasoli C. (2011), Aplicaciones Ambientales de la Electrocoagulación a Escala de Planta Piloto. Ciencia, Vol. 6, Nº 21, agosto 2011, p. 41
- Martínez, S. A., Rodríguez, M.G., Aguilar, R. & Soto, G., (2011), Removal of chromium hexavalent from rinsing chromating waters electrochemical reduction in a laboratory pilot plant. *Water Science and Technology* 4. 2004 9 (1): 115-122. Disponible en:
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/14979546>
- Metcalf & Eddy, INC., Ingeniería de Aguas Residuales, tratamiento, vertido y reutilización, Vol. I, 3era edición español, editorial McGraw-Hill 1996.
- Mollah., Mohammad et al. (2004), Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation. En: *Journal of Hazardous Materials*. Vol. 114, No.1-3 (oct. 2004); p. 202.
- Mollah, M. Yousuf A., Schennach, Robert, Parga, Jose R., and Cocke, David L. (2001), Electrocoagulation -Science and Applications. *Journal of Hazardous Materials* B84 (2001) p. 29–41. Disponible en:
www.elsevier.nl/locate/jhazmat

- Morales N., Acosta G., (2010), Sistema de electrocoagulación como tratamiento de aguas residuales galvánicas. Bogotá. Universidad Militar Nueva Granada. Revista Ciencia e Ingeniería Neogranadina, Vol. 20-1, pp. 33-44. Junio 2010. Disponible en:
<http://www.scielo.org.co/pdf/cein/v20n1/v20n1a03.pdf>
- Morales N.; Acosta G., (2011), Empleo de la Electrocoagulación como método para remoción de cromo en aguas residuales de origen galvánico. Universidad Militar Nueva Granada, Revista Facultad de Ciencias Básicas, 2011-Vol. 7, No. 1, páginas 116-125,. Disponible en:
<https://revistas.unimilitar.edu.co/index.php/rfcb/article/view/2067/1594>
- Ochoa Gómez, J., (1996), Electrosíntesis y Electrodiálisis, Fundamentos, Aplicaciones tecnológicas y tendencias. Madrid
- Poma J., P. Quispe., (2016), Remoción de contaminantes de aguas residuales urbanas por el método de electrocoagulación. Universidad Nacional del Centro del Perú, Facultad de Ingeniería Química, Tesis de Ingeniero Químico.
<http://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/UNCP/3757/Poma%20Javier-Quispe%20Sanca.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Proyecto FDI-CORFO / INTEC “Guía para el control y prevención de la contaminación industrial galvanoplastia” - CHILE 2000. Disponible en:
<http://www.achs.cl/portal/trabajadores/Capacitacion/CentrodeFichas/Documents/control-y-prevencion-de-riesgos-en-galvanoplastia.pdf>
- Reddithota D., Yerramili A., (2007), Electrocoagulation: A cleaner method for treatment of Cr (VI) from electroplating industrial effluents, Indian Journal of Chemical Technology, Vol. 14, May 2007, pp 240-245. Indian. Disponible en:
<http://nopr.niscair.res.in/bitstream/123456789/1089/1/IJCT%2014%283%29%20%282007%29%20240-245.pdf>
- Restrepo A., Arango A., Garcés L., (2006), La Electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas. Colombia. Revista Producción+Limpia Julio-diciembre 2006-Vol. 1 No. 2. Disponible en:
http://www.lasallista.edu.co/fxcul/media/pdf/RevistaLimpia/vol1n2/pl_v1n2_58-77_electrocoagulacion.pdf
- Ribera Ferrando “Cuaderno de impactos ambientales y buenas prácticas en el puesto de trabajo en el sector de galvanotecnía” AIMME, diciembre 2006. Disponible en:
<https://es.scribd.com/doc/69525853/guiagalvano>
- Riccio Luis, (2015), Remoción de contaminantes de aguas residuales urbanas del colector agua de Las Vírgenes por electrocoagulación, a nivel de laboratorio, utilizando como fuente energética un panel fotovoltaico. Huancayo-Perú. Universidad Nacional del Centro del Perú - Tesis Doctorado. Disponible en:
<http://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/UNCP/4171/Riccio%20Yauri.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Riyad H., Jabar A., Suuad M., Thikra A. (2008) Removal of heavy metals from industrial water using electro-coagulation technique. Twelfth International Water Technology Conference IWTC12, Alexandria, Egypt.

- Rodríguez A., P. Letón, R. Rosal, S. Villar y J. Sanz (2006), Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales. Madrid: Dirección General de Universidades e Investigación. Disponible en:
www.madrimasd.org/informacionidi/biblioteca/publicacion/doc/vt/vt2_tratamientos_avanzados_de_aguas_residuales_industriales.pdf
- Sandoval Alvarado, L., (2006), Manual de tecnologías limpias en Pymes del sector residuos sólidos. Julio 2006 OEA – Concytec Perú
- Soto Eduardo, Miranda Rosa del C, Sosa César A., (2006), Optimización del proceso de remoción de metales pesados de agua residual de la industria galvánica por precipitación química. México 2006. Universidad Autónoma de Nuevo León. SCielo – Información Tecnológica vol. 17 N°2. Disponible en:
http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642006000200006&lng=es&nrm=iso
- Sun Kou M., (2004) Procesos para el tratamiento de las aguas residuales en plantas galvánicas y metalúrgicas. Lima - Perú. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Vik Eilen, Carlson Dale, Eikum Arild, Gjessing Egil., (1984), Electrocoagulation of potable water, USA 1984. University of Washintong, Seattle, WA 98195.
- Westres Zuñiga, S., (2013), Diseño de un sistema de tratamiento de aguas residuales procedentes de una planta productora de sulfatos mediante el proceso electroquímico de electrocoagulación. Lima-Perú. Universidad Nacional de Ingeniería.

8. ANEXOS

ANEXO A. Resultados de Remoción de Metales Pesados en Efluentes Tratados

Tabla 27

Resultados de la concentración de metales pesados de los efluentes galvánicos tratados

pH	Voltaje	Muestra	Cromo Total (Cr) mg/L	Cobre total (Cu) mg/L	Níquel total (Ni) mg/L	Zinc total (Zn) mg/L
pH6	60 V	M1	11.15	9.495	12.98	5.603
	65 V	M2	10.54	2.73	7.653	1.125
	70 V	M3	7.87	4.547	6.93	0.484
	75 V	M4	9.17	5.348	7.99	4.79
pH8	60 V	M5	26.95	31.87	20.731	9.48
	65 V	M6	14.86	20.81	11.15	3.82
	70 V	M7	21.37	19.34	9.198	3.417
	75 V	M8	11.95	11.871	13.73	6.048
pH10	60 V	M9	27.41	56.165	56.654	16.57
	65 V	M10	0.74	62.501	61.59	21.849
	70 V	M11	26.32	55.174	62.56	18.993
	75 V	M12	31.47	101.811	65.15	17.837
pH6	60 V	M13	10.16	6.81	2.73	6.048
	65 V	M14	9.95	3.11	5.15	2.038
	70 V	M15	6.68	6.48	8.094	0.739
	75 V	M16	3.63	4.258	9.032	1.16
pH8	60 V	M17	28.05	27.87	12.165	11.93
	65 V	M18	12.96	18.681	12.654	6.82
	70 V	M19	16.78	12.658	11.265	7.451
	75 V	M20	10.096	9.145	10.691	5.147
pH10	60 V	M21	76.52	49.707	44.541	8.33
	65 V	M22	80.74	52.599	53.21	12.479
	70 V	M23	35.854	50.974	55.64	17.847
	75 V	M24	28.56	94.258	63.11	23.78

Nota: Desde la muestra M1 a la M12 son las pruebas experimentales y de la muestra M13 a la M24 son las réplicas consecutivas.

Tabla 28

Resultados de los porcentajes de remoción del tratamiento de efluentes galvánicos mediante la electrocoagulación.

pH	Voltaje	Muestra	% remoc. Cr	% remoc. Cu	% remoc. Ni	% remoc. Zn
pH6	60 V	M1	89.8%	92.5%	90.7%	86.8%
	60 V	M13	91.5%	94.6%	98.7%	85.7%
	65 V	M2	92.0%	97.0%	96.2%	97.3%
	65 V	M14	92.0%	96.7%	97.5%	95.2%
	70 V	M3	96.6%	96.4%	95.3%	98.9%
	70 V	M15	96.6%	94.8%	95.1%	98.3%
	75 V	M4	92.9%	95.7%	94.6%	88.7%
	75 V	M16	94.7%	96.6%	94.6%	97.3%
pH8	60 V	M5	71.0%	89.4%	81.5%	84.7%
	60 V	M17	74.1%	90.7%	85.6%	88.1%
	65 V	M6	84.0%	93.1%	91.7%	92.8%
	65 V	M18	86.0%	93.8%	93.1%	95.4%
	70 V	M7	77.0%	93.6%	91.1%	94.6%
	70 V	M19	78.7%	92.8%	92.2%	94.6%
	75 V	M8	87.1%	96.1%	92.5%	95.3%
	75 V	M20	90.2%	97.0%	94.1%	96.3%
pH10	60 V	M9	26.2%	80.1%	35.8%	26.9%
	60 V	M21	38.1%	82.3%	56.6%	36.3%
	65 V	M10	11.9%	77.8%	43.1%	32.4%
	65 V	M22	55.5%	81.3%	69.1%	50.5%
	70 V	M11	28.6%	80.4%	39.8%	31.3%
	70 V	M23	28.8%	81.9%	45.7%	39.8%
	75 V	M12	63.1%	52.1%	50.4%	55.4%
	75 V	M24	6.4%	55.9%	70.1%	71.1%

Nota: Desde la muestra M1 a la M12 son las pruebas experimentales y de la muestra M13 a la M24 son las réplicas consecutivas.

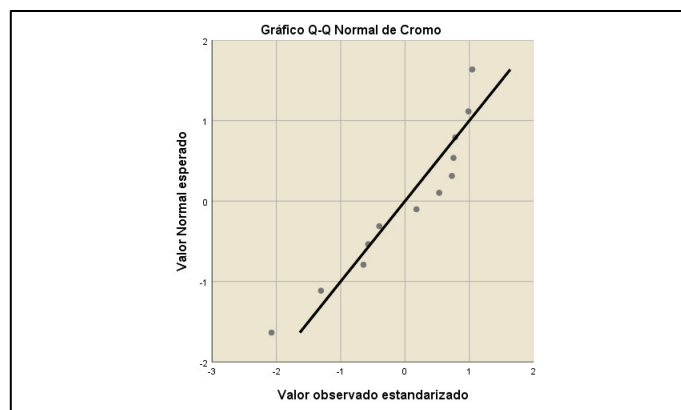
ANEXO B. Validación de los supuestos para el análisis de varianza (ANOVA)

B.1 Supuestos ANOVA - Cromo.

En la Figura 48, se presenta el gráfico para detectar la hipótesis de normalidad en el modelo de la remoción del cromo, se observa que los residuos son normales ya que los puntos se alinean a la diagonal del primer cuadrante.

Figura 48

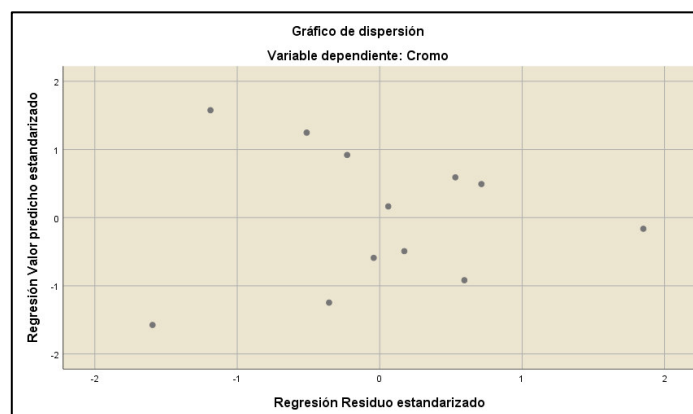
Gráfico de hipótesis de normalidad - remoción del cromo



En el gráfico 49, se presenta la dispersión de residuos versus valores predichos en la que se observa que los puntos forman una estructura aleatoria de puntos, por lo cual se cumple el supuesto de la homogeneidad de varianzas.

Figura 49

Gráfico de dispersión de residuos vs. Valores predichos – remoción cromo.

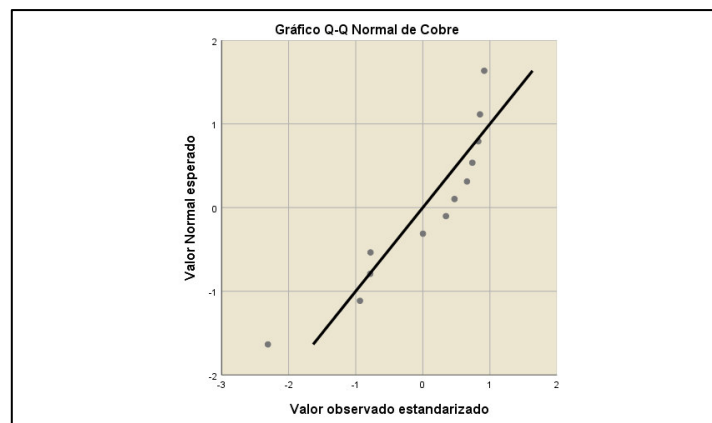


B.2 Supuestos ANOVA - Cobre.

En la Figura 50, se presenta el gráfico para detectar la hipótesis de normalidad en el modelo de la remoción del cobre, se observa que los residuos son normales ya que los puntos se alinean a la diagonal del primer cuadrante.

Figura 50

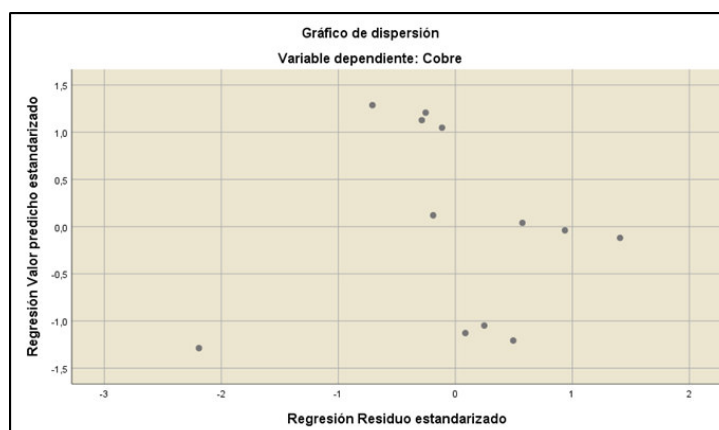
Gráfico de hipótesis de normalidad - remoción del cobre



En la figura 51, se presenta la dispersión de residuos versus valores predichos en la que se observa que los puntos forman una estructura aleatoria de puntos, por lo cual se cumple el supuesto de la homogeneidad de varianzas.

Figura 51

Gráfico de dispersión de residuos vs. Valores predichos – remoción cobre

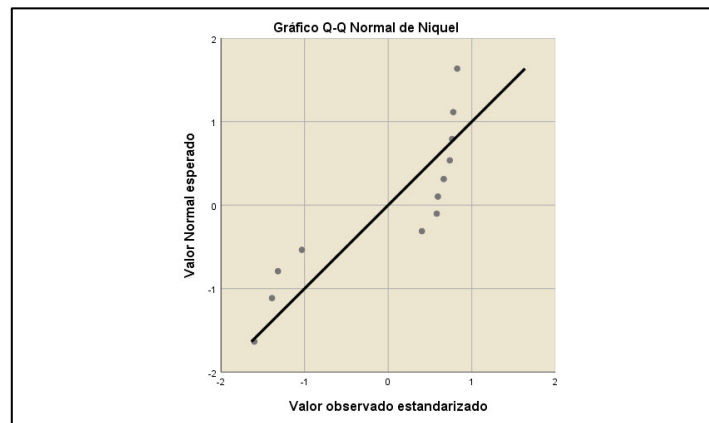


B.3 Supuestos ANOVA - Níquel.

En la Figura 52, se presenta el gráfico para detectar la hipótesis de normalidad en el modelo de la remoción del níquel, se observa que los residuos son normales ya que los puntos se alinean a la diagonal del primer cuadrante.

Figura 52

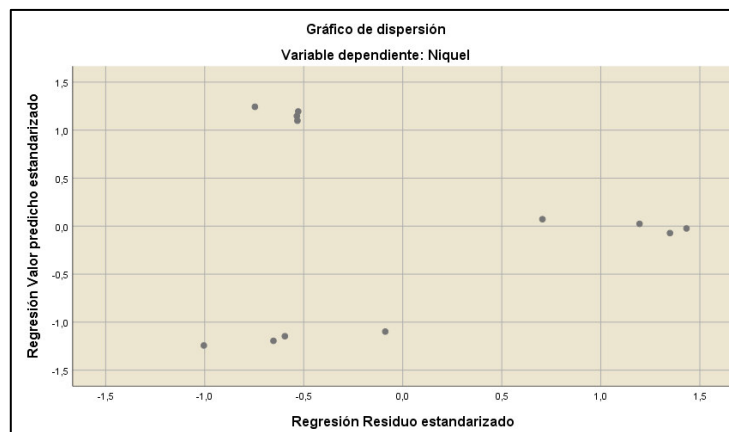
Gráfico de hipótesis de normalidad - remoción del níquel



En el gráfico 53, se presenta la dispersión de residuos versus valores predichos en la que se observa que los puntos forman una estructura aleatoria de puntos, por lo cual se cumple el supuesto de la homogeneidad de varianzas.

Figura 53

Gráfico de dispersión de residuos vs. Valores predichos – remoción níquel

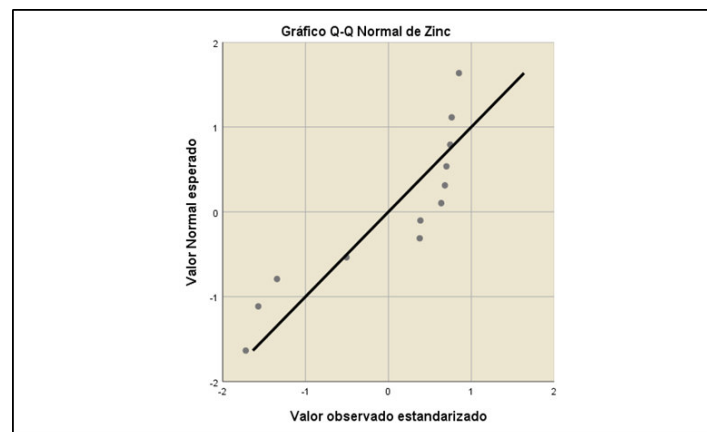


B.4 Supuestos ANOVA - Zinc.

En la Figura 54, se presenta el gráfico para detectar la hipótesis de normalidad en el modelo de la remoción del zinc, se observa que los residuos son normales ya que los puntos se alinean a la diagonal del primer cuadrante.

Figura 54

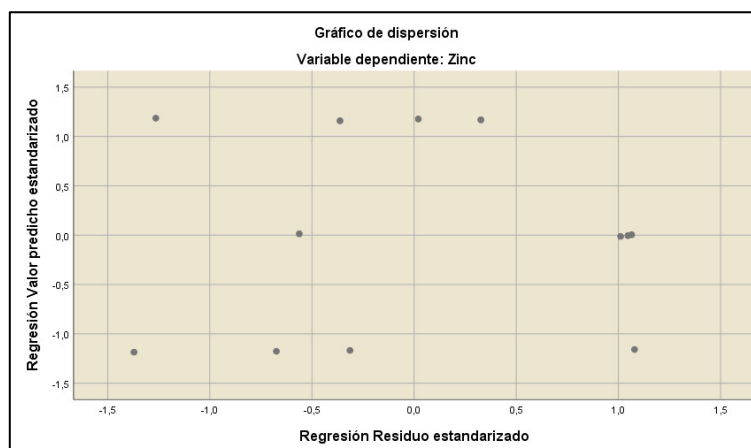
Gráfico de hipótesis de normalidad - remoción del zinc



En el gráfico 55, se presenta la dispersión de residuos versus valores predichos en la que se observa que los puntos forman una estructura aleatoria de puntos, por lo cual se cumple el supuesto de la homogeneidad de varianzas.

Figura 55

Gráfico de dispersión de residuos vs. Valores predichos – remoción zinc



ANEXO C. Coeficientes de correlación múltiple – variables dependientes

Regresión Múltiple - cromo

Variable dependiente: cromo

Variables independientes: pH y Voltaje

		<i>Error</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimación</i>	<i>Estándar</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
CONSTANTE	0.803071	0.174578	4.60007	0.0013
pH	-0.0637575	0.00818016	-7.79417	0.0000
voltaje	0.0077288	0.00238958	3.23438	0.0103

Regresión Múltiple - cobre

Variable dependiente: cobre

Variables independientes:

pH

Voltaje

		<i>Error</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimación</i>	<i>Estándar</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
CONSTANTE	1.49906	0.255193	5.87423	0.0002
pH	-0.0635663	0.0119575	-5.31602	0.0005
voltaje	-0.00173687	0.00349301	-0.497241	0.6309

Regresión Múltiple - níquel

Variable dependiente: níquel

Variables independientes:

pH

Voltaje

		<i>Error</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimación</i>	<i>Estándar</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
CONSTANTE	1.66875	0.324982	5.13491	0.0006
pH	-0.0950162	0.0152276	-6.23975	0.0002
voltaje	-0.00156313	0.00444826	-0.351404	0.7334

Regresión Múltiple - zinc

Variable dependiente: zinc

Variables independientes:

pH

Voltaje

		<i>Error</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimación</i>	<i>Estándar</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
CONSTANTE	1.25024	0.152354	8.20619	0.0000
pH	-0.04363	0.00713878	-6.11168	0.0002
voltaje	-0.0001288	0.00208537	-0.0617635	0.9521

ANEXO D.

Tabla 29

Ficha de observación, datos obtenidos con el tratamiento

FICHA DE OBSERVACIÓN							
Título de la Investigación: "Reducción de metales pesados (Cu, Ni, Zn y Cr) en efluentes galvánicos mediante la electrocoagulación"							
Investigador: Ernesto León Vilela							
Instrucción: Se analizarán las muestras en un plazo no mayor de 48 horas							
Muestra de agua residual: Efluentes industriales							
Procedencia: Planta Galvánica - Corp. Rey S.A.							
Fecha de muestra recolectada:							
Fecha de muestra en Laboratorio:				Condiciones: Muestra refrigerada con preservante			
Procedimiento:							
Análisis de metales pesados (cobre, níquel, cromo y zinc).							
Muestra	voltaje (V)	pH	tiempo (min)	Datos obtenidos con el tratamiento			
				Conduct. (mS/m)	Turbidez (FTU)	Amperaje (amp)	Temp. (°C)
M1	60	6	20				
M2	65	6	20				
M3	70	6	20				
M4	75	6	20				
M5	60	8	20				
M6	65	8	20				
M7	70	8	20				
M8	75	8	20				
M9	60	10	20				
M10	65	10	20				
M11	70	10	20				
M12	75	10	20				

ANEXO E.

Matriz de Consistencia

Título: Reducción de Metales Pesados (Cu, Ni, Zn y Cr) en Efluentes Galvánicos Mediante la Electrocoagulación

Problema	Objetivo	Hipótesis	Variables	Indicadores
<p>¿En qué medida la electrocoagulación reducirá el contenido de metales pesados en los efluentes galvánicos?</p> <p>¿Cómo influyen los factores de operación del proceso de electrocoagulación: el voltaje y el pH en la reducción de la concentración de los metales pesados en los efluentes galvánicos?</p> <p>¿Cuál es la eficiencia de remoción de los metales pesados, con el proceso de electrocoagulación, en el tratamiento de los efluentes galvánicos?</p>	<p>Reducir el contenido de metales pesados en los efluentes galvánicos, mediante la electrocoagulación.</p> <p>Determinar los valores de los parámetros de electrocoagulación que influyen en la mayor reducción de la concentración de los metales pesados: voltaje y pH.</p> <p>Determinar el porcentaje de remoción de los metales pesados en los efluentes galvánicos tratados</p>	<p>La aplicación del proceso de electrocoagulación reducirá la concentración de metales pesados en los efluentes galvánicos.</p> <p>El voltaje y el pH influirán en la reducción de la concentración de metales pesados con el proceso de electrocoagulación.</p> <p>Es posible reducir los metales pesados de los efluentes galvánicos mediante el proceso de electrocoagulación</p>	<p>Variable independiente pH, voltaje.</p> <p>Variables dependientes Concentración de metales pesados</p>	<p>Mediciones con pH-metro, voltímetro.</p> <p>Caracterización del agua residual (análisis químicos)</p> <p>Porcentaje de remoción</p> <p>Cumplimiento Normativa Ambiental</p>

ANEXO F. Fotografías

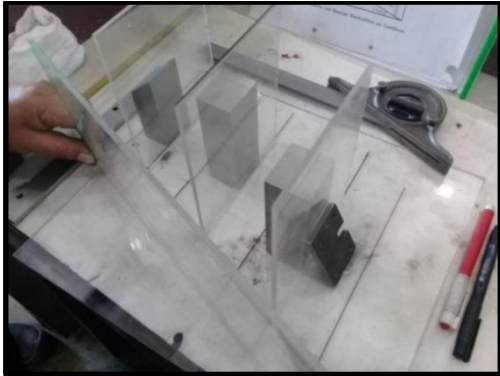


Figura 56. Presentación de celda de Electrocoagulación



Figura 59. Electrodo de hierro para la celda de EC.



Figura 57. Pegado de láminas laterales de acrílico de celda de EC.

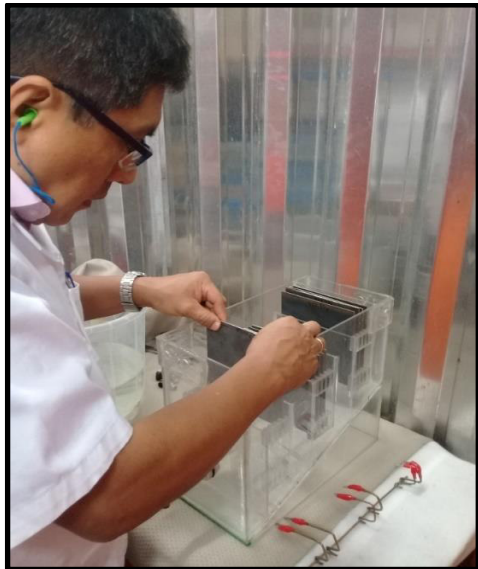


Figura 60. Completando electrodos en celda de EC.



Figura 58. Pegado de láminas de acrílico en celda de EC.



Figura 61. Celda de electrocoagulación en construcción.



Figura 62. Celda de electrocoagulación con el rectificador de corriente DC.

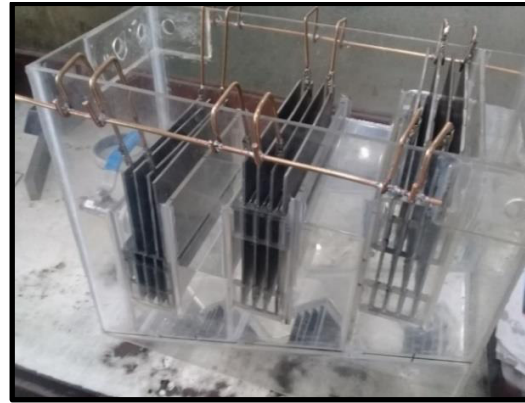


Figura 65. Celda de EC con disposición monopolar en paralelo de electrodos.

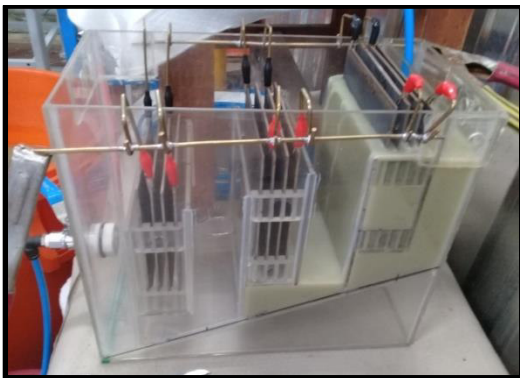


Figura 63. Celda de EC en operación inicial – ingreso de efluente.



Figura 66. Control de amperaje en el proceso de electrocoagulación.



Figura 64. Sistema de EC completo para tratamiento de agua residual.



Figura 67. Equipo de electrocoagulación completo.



Figura 68. Tratamiento de fluentes a pH6 y 60V

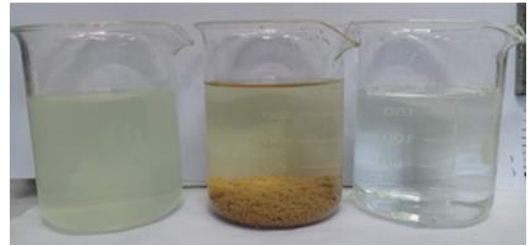


Figura 70. Tratamiento de fluentes a pH6 y 70V

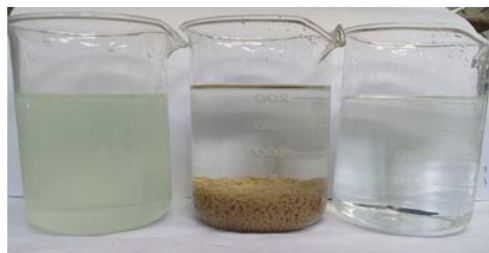


Figura 69. Tratamiento de fluentes a pH6 y 65V



Figura 71. Tratamiento de fluentes a pH6 y 75V