

# TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL GRIS POR ELECTROCOAGULACIÓN CON FINES ACADÉMICOS

## WASTE WATER TREATMENT BY ELECTROCOAGULATION FOR ACADEMIC PURPOSES

MSc. Hutch Mike Miranda Montaña<sup>1 \* §</sup>  
<https://orcid.org/0000-0003-1357-302X>

DOI: <https://doi.org/10.70722/ekhd3290cs65y>

Recibido: Septiembre 8, 2024; Aceptado: Octubre 2, 2024

### RESUMEN

Uno de los desafíos que enfrenta hoy la humanidad es proporcionar agua limpia a la población. Por ello, la necesidad de desarrollar técnicas innovadoras, eficaces y económicas para el tratamiento de agua residual. La electrocoagulación, una tecnología conocida desde principios del siglo XX, ha evolucionado, y es aplicada en la actualidad para el tratamiento de agua residual de la industria en diversas áreas. Desde esta perspectiva, la electrocoagulación se convierte en un proceso electroquímico que, por tener resultados exitosos en su aplicación, es una base técnica importante para el proceso de formación del ingeniero ambiental, por lo cual se desarrolla las técnicas de como diseñar y como llevar a cabo la construcción de sistemas varios a escala laboratorio para poder incidir en el criterio de ingenio del estudiante.

**Palabras claves:** Electrocoagulación. Agua residual. Proceso electroquímico. Formación. Escala laboratorio. Incidir.

### ABSTRACT

One of the challenges facing humanity today is providing clean water to the population. Therefore, the need to develop innovative, efficient and economical techniques for wastewater treatment. Electrocoagulation, a technology known since the beginning of the 20th century, has evolved, and is currently applied for the treatment of industrial wastewater in most areas. From this perspective, electrocoagulation becomes an electrochemical process that, due to its successful application results, is an important technical basis for the environmental engineer training process, for which the techniques of how to design and do the construction of different systems on a laboratory scale in order to influence the student's ingenuity criteria.

**Keywords:** Electrocoagulation. Wastewater. Electrochemical process. Training. Laboratory scale. Influence.

**Citación:** Miranda Montaña Hutch M., **TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL GRIS POR ELECTROCOAGULACIÓN CON FINES ACADÉMICOS.** Revista Científica EMINENTE 2024, 8-2: 23-33.

- <sup>1</sup> Ingeniero Químico –Investigador Instituto de Investigación y Desarrollo de procesos Químicos (IIDEPROQ), Universidad Mayor de San Andrés (UMSA) - Docente Universidad Pública de El Alto (UPEA).
- \* Corresponde al Autor (correo electrónico: mhalex3one@gmail.com).
- <sup>§</sup> Dirección de contacto Investigador: Av. Alisos N° 80 esquina Calle 1; Zona Villa Salome - Telf.: (+591) 78785057 - La Paz – Bolivia.

## INTRODUCCIÓN

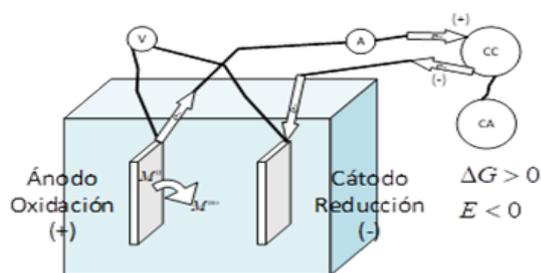
La puesta en marcha de una estrategia de educación ambiental que, además, fortalezca competencias ingenieriles en los educandos requiere un abordaje teórico y metodológico desde la Investigación - Acción para que el estudiante tenga la oportunidad de modificar variables, analizar efectos, y comparar saberes previos y saberes nuevos para la construcción de aprendizajes significativos.

La valoración de lo ambiental y lo científico de manera integral implica, de acuerdo con el modelo educativo presente, que los jóvenes en formación a través de acciones como la observación, la formulación de preguntas, el análisis y contraste de información y la construcción de conclusiones, desarrollen conocimientos, habilidades y actitudes que aporten al desarrollo de pensamiento científico y a la comprensión del mundo para aportar con valiosas soluciones ingenieriles.

Es importante referir una investigación orientada a diseñar e implementar Estrategias didácticas para la enseñanza de: Tratamiento y potabilización de agua y Bioestadística materias importantes en la educación de un ingeniero ambiental.

Tradicionalmente los contaminantes presentes en las aguas residuales han sido eliminados por coagulación química, mediante la adición de agentes químicos que propician la neutralización de las cargas de partículas que se encuentran suspendidas o en forma coloidal, dando como resultado la disminución de las repulsiones entre partículas, para ser aglomeradas y su posterior precipitación. [1] [2]

Figura 1. Sistema electroquímico.



Fuente. Elaboración propia.

La electrocoagulación en su forma más sencilla es un reactor de tipo celda electrolítica como se presenta en la Figura 1, el cuál es el sistema por construir para tratamiento de agua gris [3].

## OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un sistema de tratamiento de agua residual gris mediante el proceso de electrocoagulación, con el fin de la determinación de viabilidad para aplicaciones académicas y de investigación.

## METODOLOGÍA

El diseño metodológico de la investigación posee dos componentes principales: el primero relacionado con el diseño y ejecución de actividades formativas en laboratorio, para el fortalecimiento de competencias científicas de los estudiantes de las materias de Tratamiento y potabilización de agua y Bioestadística; el segundo relacionado con el método de electrocoagulación y la caracterización del agua resultante; con el propósito de evaluar la remoción de contaminantes, especialmente el color. Todo con su respectivo análisis estadístico posterior.

### A. Materiales

Son todos aquellos empleados para las diferentes etapas de la investigación además de los necesarios para el análisis a efectuar.

Tabla 1. Implemento de laboratorio

Ítem	Cantidad	Observación
Vaso de precipitados de vidrio de 250 ml forma baja	3	
Varilla de vidrio de 250 mm de longitud y 5 mm de diámetro	3	
SopORTE Universal metálico	1	
Piseta de plástico de 500 ml	1	
Cuba de plástico de 2L forma baja	1	
Pinza de sujeción al vástago de metal	3	
Termómetro de Hg de -10 a 150 °C	1	
Papel pH, 0 a 14	Varias	
Balanza analítica sensibilidad 0,01 g	1	
Pinzas tipo caimán de metal con aislamiento	6	
Conductores de primera especie de aluminio cobreado	2 m	
Multímetro con sonda de temperatura	1	
Electrodos de hierro de 50mm*50mm*2mm	3	

Electrodos de aluminio de 50mm*50mm*2mm	3	
Fuente de poder de 220 V	1	
Reactor de electrocoagulación escala laboratorio de 1000 ml	1	Construcción propia

Fuente. Elaboración propia.

## B. Procedimiento

De manera general se presenta todo el procedimiento realizado en la investigación según la Figura 2.

Figura 2. Diagrama de flujo del procedimiento



Fuente. Elaboración propia.

### 1) Modelado matemático

En la investigación se hace un estudio básico de los procesos que tienen lugar en el electrodo, y se proporciona un tratamiento matemático simplificado pero suficiente para ser utilizado como instrumento en el cálculo de parámetros.

En lo que sigue se expone una descripción matemática de los procesos que tienen lugar en el electrodo, aunque de un modo esquemático y simplificado.

La corriente de electrolisis viene expresada según la ecuación:

$$i = nFSu$$

donde n es el número de equivalentes de electrones que intervienen en la reacción, F la constante de Faraday, S la superficie del electrodo y u la velocidad de transporte de los iones reaccionantes hacia el electrodo.

En el caso de que el experimento se realice de modo que no intervengan la migración y la convección la reacción estará contralada exclusivamente por la difusión, que a la vez es función del gradiente

de concentración entre el seno de la disolución y la superficie del electrodo.

Para reacciones irreversibles como es el caso de nuestro estudio se podrá aplicar una reacción del tipo que puede suponerse de primer orden y empleando la ecuación de Butler-Volmer [7]:

$$i = nFSK \left[ C_{Ox}^o e^{-0,5 \frac{nF}{RT} (E - E_{Ox}^o)} - C_{Rd}^o e^{0,5 \frac{nF}{RT} (E - E_{Rd}^o)} \right]$$

donde K es la constante cinética, tanto para la aportación anódica como para la catódica, CA y CB son las concentraciones de las especies oxidada y reducida respectivamente, se tendrá que, despejando la superficie total de los electrodos S esta servirá para el diseño del reactor [6] [7]

$$S = \frac{i}{nFK \left[ C_{Ox}^o e^{-0,5 \frac{nF}{RT} (E - E_{Ox}^o)} - C_{Rd}^o e^{0,5 \frac{nF}{RT} (E - E_{Rd}^o)} \right]}$$

A esta ecuación en el denominador podemos aproximar a cero la concentración del reducido, quedando la ecuación:

$$S = \frac{i}{nFK \left[ C_{Ox}^o e^{-0,5 \frac{nF}{RT} (E - E_{Ox}^o)} \right]} = 2Nxy$$

Donde N es el número de electrodos a emplear, x e y son las dimensiones de un electrodo y 2 representa las dos caras del electrodo.

Realizando los cálculos en MathCAD con los siguientes datos [4] [5]:

$$i = 2,5A \quad C_{Ox}^o = 20 \frac{mol}{m^3} \quad n = 3 \frac{Eq}{mol} \quad R = 8,314 \frac{J}{K * mol} \quad F = 96500 \frac{C}{Eq}$$

$$T = 298K \quad E = 1,5V \quad E_{Ox}^o = 1,67V \quad N = 2 \quad K = 7,285 * 10^{-10} \frac{m}{s}$$

Se obtiene:

$$S = 0,029m^2$$

De donde fijando una dimensión, x = 0,08m y despreciando el espesor, z = 0,001m de la lámina del electrodo, se obtiene que la altura será: y = 0,09m

Considerando una separación óptima de  $d = 10\text{mm}$  entre electrodos y que debe existir una holgura en el espacio de sujeción de estos de  $e = 3\text{mm}$ , por si se quiere variar el espesor de los mismos; además de para poder insertar más de un par de ellos, se calcula la longitud del electro reactor según:

$$L = Ne + (N+1) d$$

Si  $N = 10$  electrodos

$$L = 0,140\text{m}$$

Manteniendo fijo el ancho del electrodo  $x = 0,08\text{m}$  e igualándolo al reactor, entonces  $W = 0,08\text{m}$ .

Para la altura se aplicará la siguiente formula, donde  $b = 5\text{mm}$  es el espacio debajo el electrodo para flujo del electrolito (Agua residual):

$$H = b + y + \frac{2}{5}y$$

Obteniéndose:

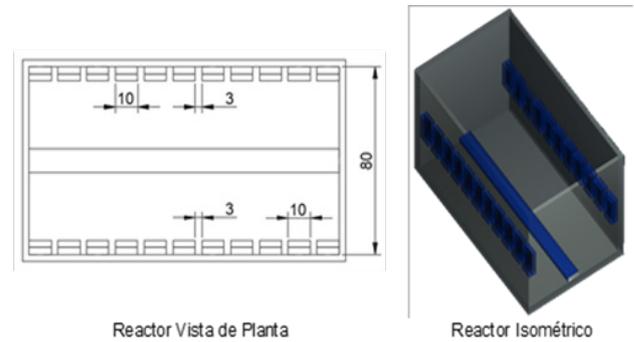
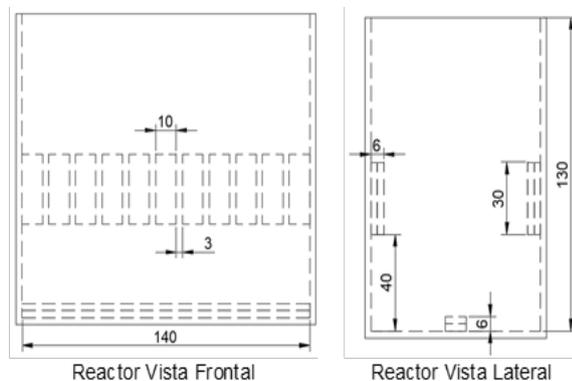
$$H = 0,131\text{m}$$

Como siempre, todas las dimensiones son internas al reactor y los demás detalles se los bosquejara mediante AutoCAD.

### 1) Bosquejo del sistema

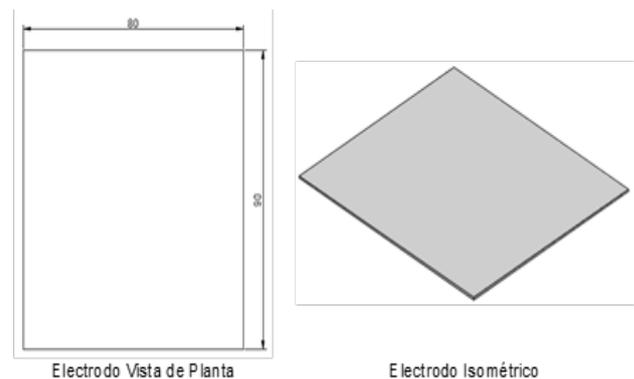
Considerando la separación entre placas de  $10\text{mm}$  y en material transparente se obtiene el siguiente bosquejo generalizado (Figura 3 y Figura 4):

Figura 3. Vistas del reactor.



Fuente. Elaboración propia.

Figura 4. Vistas del electrodo.



Fuente. Elaboración propia.

Como se puede ver en el bosquejo, las dimensiones son fáciles de poder determinar y llevarlas a la práctica encontrando diferentes disposiciones para el montaje del sistema.

### 2) Montaje del sistema

El sistema que para la investigación se construyo es el mostrado en la Figura 5.

Ya construido el reactor y los electrodos, estos llegaron a tener las siguientes dimensiones interiores:

Electrodos fabricados en Aluminio de  $0,1\text{mm}$  de espesor extractado de material reciclado.

$$x = 80\text{ mm} \quad y = 120\text{ mm}$$

Reactor fabricado en Vidrio de  $5\text{mm}$  de espesor y unido con silicona.

$$W = 80\text{ mm} \quad H = 130\text{ mm} \quad L = 140\text{ mm}$$

Donde los separadores laterales ubicados a 10mm sobre el fondo en las paredes, separan a los electrodos una distancia de 10mm entre sí, y el separador del fondo eleva a los mismos 5mm de la base.

Figura 5. Reactor y electrodo



Reactor Vista Frontal



Reactor Vista de Planta



Electrodo Vista de Planta

Fuente. Elaboración propia.

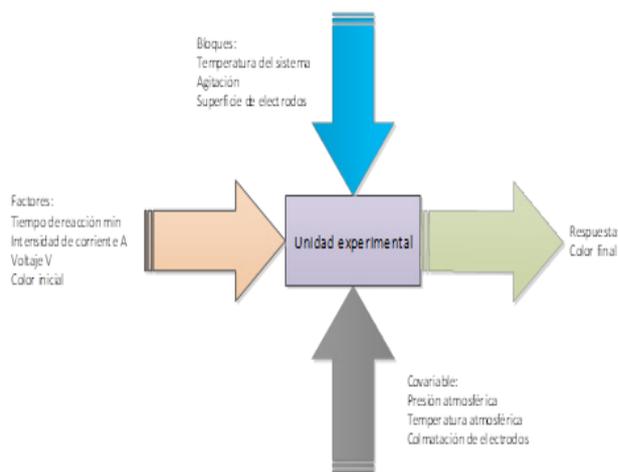


Reactor Vista Lateral

### 3) Pre – experimentación

Realizando pre-experimentos en el sistema montado se obtuvo los datos que se muestran en la Figura 6.

Figura 6. Diagrama de pre-experimentación.



Fuente. Elaboración propia.

4) Diseño experimental

Aplicado MINITAB 18 se realizó el diseño experimental factorial completo asimétrico, obteniendo:

Diseño factorial de múltiples niveles

Resumen del diseño

Factores:	4	Réplicas	3
Corridas base:	24	Total de corridas	72
Bloques base:	1	Total de bloques:	3

Número de niveles: 2; 2; 3; 2

Al ser demasiadas corridas 72, se decidió fraccionar el diseño empleando la optimización del mismo, mediante MINITAB, quedando 9 corridas como se muestra en la Figura 7.

Figura 7. Factores del diseño fraccionado.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8-T
	OrdenEst	OrdenCorrida	TipoPt	Bloques	tiempo t	corriente i	Voltaje V	Color co
1	72	72	1	3	20	1000	25	alto
2	6	6	1	1	10	500	25	alto
3	47	47	1	2	20	1000	25	bajo
4	7	7	1	1	10	1000	10	bajo
5	15	15	1	1	20	500	15	bajo
6	34	34	1	2	10	1000	15	alto
7	38	38	1	2	20	500	10	alto
8	49	49	1	3	10	500	10	bajo
9	70	70	1	3	20	1000	15	alto

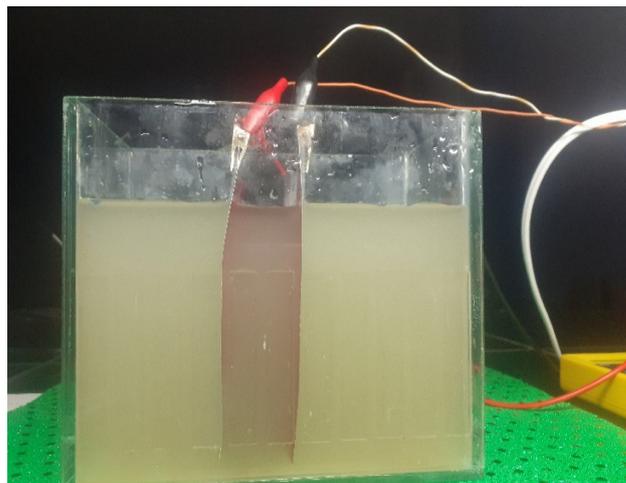
Fuente. Elaboración propia.

5) Minería de datos

Los datos fueron obtenidos cuasi experimentalmente y se empleó el sistema mostrado a continuación, tomando como base el diseño experimental.

En la Figura 8 se muestra solamente el inicio y el final de los procedimientos, pudiendo observarse la mejora en la calidad de la muestra de agua tratada.

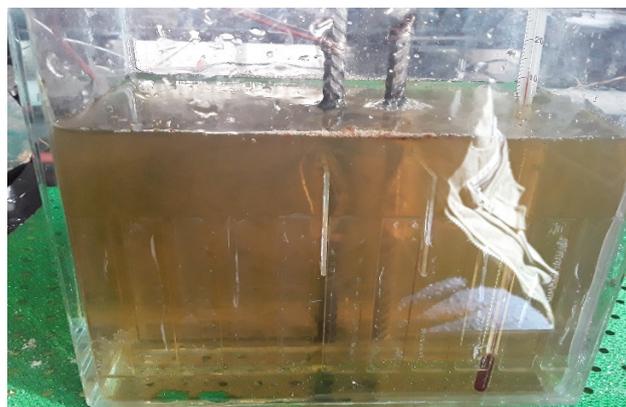
Figura 8. Fase inicial y final del proceso



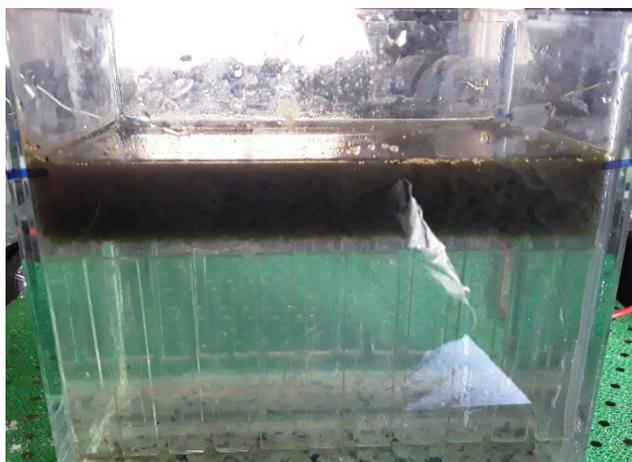
Agua residual sintética al inicio del tratamiento  
 Tratamiento mediante electrodos de aluminio



Agua tratada y flóculos flotantes



Tratamiento mediante electrodos de hierro



Agua tratada y floculos flotantes

Fuente. Elaboración propia.

Los datos obtenidos, Figura 9, expresados como color final del agua tratada “Y”, se midieron mediante una escala arbitraria que va del 1 al 10 donde 1 es agua muy colorida (agua tratada opaca) y 10 es agua incolora (agua tratada semejante a la potable en apariencia). Teniendo los datos siguientes:

Figura 9. Factores y respuesta de la experimentación.

#	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8-T	C9
	OrdenEst	OrdenCorrida	TipoPt	Bloques	tiempo t	corriente i	Voltaje V	Color co	Y
1	72	72	1	3	20	1000	25	alto	8
2	6	6	1	1	10	500	25	alto	4
3	47	47	1	2	20	1000	25	bajo	9
4	7	7	1	1	10	1000	10	bajo	6
5	15	15	1	1	20	500	15	bajo	6
6	34	34	1	2	10	1000	15	alto	4
7	38	38	1	2	20	500	10	alto	5
8	49	49	1	3	10	500	10	bajo	5
9	70	70	1	3	20	1000	15	alto	7

Fuente. Elaboración propia.

### Análisis del diseño experimental

Empleando el análisis del diseño factorial obtenemos los siguientes resultados.

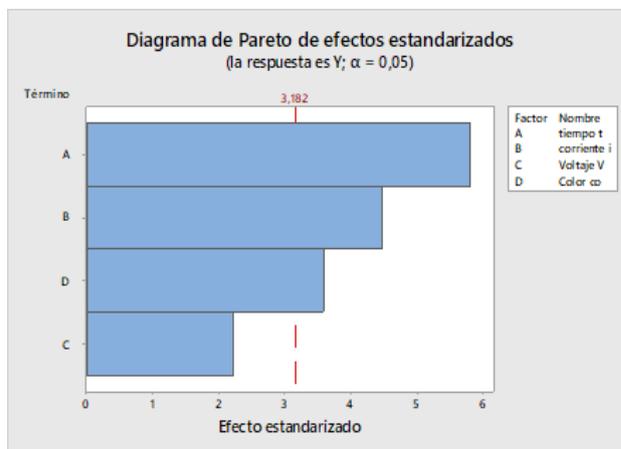
### Regresión factorial general:

Y vs. tiempo t en minutos; corriente i en miliamperios; voltaje V en voltios; color co en unidad cualitativa Bajo o Alto (agua residual muy opaca) al inicio del proceso.

Efecto	Factor	Niveles	Valores
A:	Tiempo t	2	10;20
B:	Corriente i	2	500;1000
C:	Voltaje V	3	10; 15; 25
D:	Color c	2	Bajo; alto

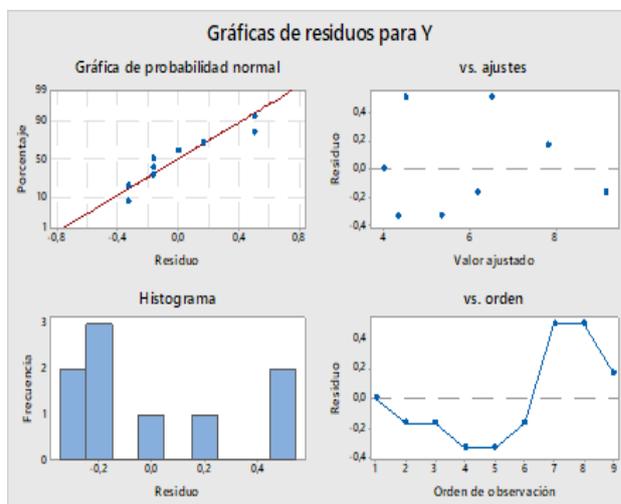
### Graficas del diseño

Figura 10. Diagrama de Pareto.



Fuente. Elaboración propia.

Figura 11. Diagramas de análisis de normalidad.



Fuente. Elaboración propia.

Del diagrama de Pareto Figura 10, se observa que el estadístico crítico es rebasado por los efectos A, B y D lo que indica que son los que más relevancia tiene sobre el proceso; mientras que el C es un efecto no significativo para el mismo por lo menos no para las condiciones del diseño fraccionario.

Las otras cuatro graficas Figura 11, denotan el grado de normalidad que presentan los datos obtenidos, es decir se puede apreciar que la distribución a la cual tienden estos datos es a la normal estándar. Por ejemplo, en la gráfica superior cuanto más cerca están los puntos de la recta más normalidad presentaran los datos.

**Análisis de Varianza**

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	5	23,167	4,6333	16,68	0,021
Lineal	5	23,167	4,6333	16,68	0,021
tiempo t	1	9,3889	9,3889	33,80	0,010
corriente i	1	5,556	5,5556	20,00	0,021
Voltaje V	2	2,708	1,3542	4,87	0,114
Color co	1	3,556	3,5556	12,80	0,037
Error	3	0,833	0,2778		
Total	8	24,000			

Mediante el ANOVA se puede confirmar lo que el diagrama de Pareto ya nos adelantaba, que los efectos A (tiempo), B (intensidad de corriente) y D(color) son significativos para el proceso puesto que su probabilidad o valor-p son menores que la significancia o valor-alfa, que por conveniencia del nivel de confianza del 95% se tendrá que es 5% o al tanto por uno 0,05; lo que se da al contrario para el voltaje.

**Resumen del modelo**

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0,527046	96,53%	90,74%	64,12%

Según el modelo ejecutado, se tiene que este tiene una buena correlación respecto a los datos entre si como con la respuesta e incluso sirve para realizar predicciones, además la desviación típica es bastante baja lo que denota que no existe demasiada dispersión.

**Comparaciones para Y**

Información utilizando el método de Tukey con un nivel de confianza de 95%

Comparaciones por parejas de Tukey: tiempo t

tiempo t	N	Media	Agrupación
20	5	6,94444	A
10	4	4,77778	B

Comparaciones por parejas de Tukey: corriente i

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

corriente i	N	Media	Agrupación
1000	5	6,69444	A
500	4	5,02778	B

Comparaciones por parejas de Tukey: Voltaje V

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Voltaje V	N	Media	Agrupación
25	3	6,58333	A
10	3	5,75000	A
15	3	5,25000	A

Comparaciones por parejas de Tukey: Color co

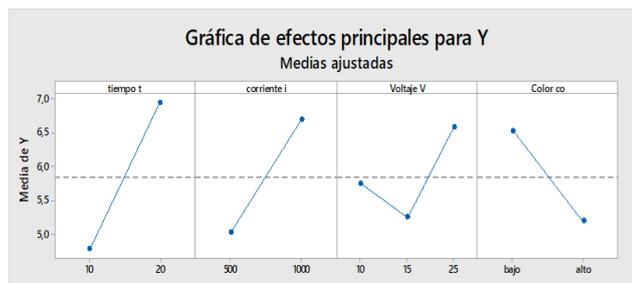
Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Color co	N	Media	Agrupación
bajo	4	6,52778	A
alto	5	5,19444	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

## Gráficas factoriales para Y

Figura 12. Diagrama Respuesta versus factores.



Fuente. Elaboración propia.

Las gráficas mostradas nos denotan según la respuesta cuales de los efectos y en qué nivel el proceso se torna el mejor y más óptimo; de ahí podemos extraer:

$$t = 20min \quad i = 1000mA \quad v = 25V \quad co = Bajo$$

Por tanto, combinando estos factores se obtendrá un resultado en color muy aceptable del agua tratada, en un rango de Y de entre 6,5 y 7 unidades arbitrarias de color.

## RESULTADOS

Según se avanzó con la investigación se identificaron las variables más influyentes: tiempo, intensidad de corriente y grado de color del agua.

Tiempo en su nivel alto “20 minutos”  
Corriente en su nivel alto “1000 miliamperios”  
Color en su nivel bajo

Con lo cual se obtienen un agua tratada en escala de color, completamente translúcida como se aprecia en la Figura 8.

## CONCLUSIONES

- El sistema de electrocoagulación que permitirá el estudio del comportamiento de las aguas residuales está conformado por una fuente de voltaje que entrega una corriente eléctrica al medio acuoso, una celda con capacidad para contener 1 litro de agua residual que contempla tres zonas: reacciones electroquímicas, sedimentación y flotación, además de electrodos: de hierro y de

aluminio dispuestos en forma alternada y conexión en paralelo y separados por 10mm.

- Las variables que mayor incidencia tienen en la remoción de color y otros contaminantes bajo el proceso de electrocoagulación son el tiempo, la intensidad de corriente aplicada y el grado de color del agua residual (la cantidad de contaminantes presentes). Se hace necesario complementar el proceso de electrocoagulación con otros procesos físicos como el de filtración, para la separación de los flocs, precipitados formados y minerales liberados por los electrodos.
- Práctica pedagógica encaminada al tratamiento de agua, con el docente como ser social que promueve la indagación y reflexión crítica de los problemas que afecten a la formación del estudiante.

## DISCUSIÓN

La electrocoagulación se presenta como un método efectivo para la remoción de contaminantes en aguas residuales, destacando la importancia de variables como el tiempo de tratamiento y la intensidad de corriente. Los resultados del análisis de varianza indican que tanto el tiempo como la corriente aplicada tienen un impacto significativo en la reducción del color y otros contaminantes, lo que sugiere que optimizar estas condiciones puede mejorar la eficiencia del proceso. Además, la necesidad de complementar la electrocoagulación con métodos físicos, como la filtración, es crucial para asegurar la separación efectiva de los flocs y precipitados generados, lo que resalta la importancia de un enfoque integral en el tratamiento de aguas.

## CONFLICTO DE INTERÉS

El autor declara que no tiene conflictos de interés con la presente investigación.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Universidad Mayor de San Andrés por el apoyo académico y logístico brindado durante la realización de este proyecto. Agradecemos también a los colegas y estudiantes que colaboraron en la construcción y experimentación del sistema de

tratamiento de agua residual, así como a los docentes que proporcionaron orientación y conocimientos valiosos. Finalmente, un agradecimiento especial a las instituciones que facilitaron los recursos necesarios para llevar a cabo esta investigación.

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] E. Ojeda y R. Hing, «CONDICIONES OPERACIONALES MÁS EFICIENTES EN EL TRATAMIENTO DE LA VINAZA MEDIANTE EL MÉTODO DE ELECTROCOAGULACIÓN,» vol. XXIX, n° 2, 2009.
- [2] M. Piña, M. Domínguez, C. Gonzales, F. Prieto y A. Guevara, «Revisión de variables de diseño y condiciones de operación en la electrocoagulación,» Revista mexicana de ingeniería química, vol. 10, n° 2, 2011.
- [3] X. Chen y L. Yue Po, «Novel electrode system for electroflotation of wastewater,» 2002.
- [4] Anter laboratorios, Medición de las propiedades de los materiales, Mundo y cultura, 1988.
- [5] A. Arango Ruiz, «Tratamiento de aguas residuales mediante electrocoagulación:

desarrollo y potencial de aplicación,» Journal of Engineering and Technology, vol. 3, n° 1, 2014.

- [6] r. Mayta y J. Mayta, «REMOCIÓN DE CROMO Y DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO DE AGUAS RESIDUALES DE CURTIEMBRE POR ELECTROCOAGULACIÓN,» Rev Soc Quím Perú, vol. 3, n° 83, pp. 331 - 340, 2017.
- [7] V. Almagro Huertas, «Cinética electroquímica,» Universidad de Murcia, pp. 317 - 340.



### Hutch Mike Miranda Montaña.

Master en Ingeniería Industrial - Ingeniero Químico egresado de la Universidad Mayor de San Andrés. Con especialización en Ingeniería Ambiental, Alimentos y Mecánica. Docente de Operaciones Unitarias, Bioestadística, Producción Petrolera I, Calculo II, Análisis y Tratamiento de agua Universidad Pública de El Alto, Química General. Investigador de la Escuela Militar de Ingeniería – UALP. Investigador del Instituto de Investigación y Desarrollo de Procesos Químicos (IIDEPROQ) de la Universidad Mayor de San Andrés (UMSA).