



ELECTROCOAGULACIÓN CON RADIACIÓN UV PARA REMOVER DQO, COT Y SDT EN AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA TEXTIL EMPLEANDO ELECTRODOS DE GRAFITO

ELECTROCOAGULATION INTENSIFIED BY UV RADIATION TO REMOVE COD, COT AND TDS IN WASTEWATER OF THE TEXTILE INDUSTRY USING GRAPHITE ELECTRODES

María Alejandra Rodríguez Oviedo • Maríaa-rodriguez@unilibre.edu.co
Facultad de Ingeniería, Universidad Libre de Colombia. Bogotá, Colombia.

Ángela Daniela Sánchez Suárez • angelad.sanchezs@unilibrebog.edu.co
Facultad de Ingeniería, Universidad Libre de Colombia. Bogotá, Colombia.

Rafael Nikolay Agudelo Valencia • rafaeln.agudelov@unilibre.edu.co
Facultad de Ingeniería, Universidad Libre de Colombia. Bogotá, Colombia.

Citación: Rodríguez, M., Sánchez, A. y Agudelo, R. (2022). Electrocoagulación con radiación UV para remover DQO, COT y SDT en aguas residuales de la industria textil empleando electrodos de grafito. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 13(2), 201 - 219. DOI: <https://doi.org/10.22490/21456453.4723>

RESUMEN

Contextualización: La industria textil hace uso de grandes cantidades de agua y diversas sustancias químicas que hacen parte de las distintas etapas del procesamiento de las telas, incluidos los procesos de pintura y acabado. Como resultado del uso de estas sustancias químicas, las aguas residuales de la industria textil presentan altas concentraciones de demanda química de oxígeno (DQO), carbono orgánico total (COT), sólidos disueltos totales (SDT) y baja biodegradabilidad.

Vacío de conocimiento: En la actualidad, las distintas industrias de Colombia presentan fallas en la disposición final de las aguas residuales, ya que; se ha logrado identificar que algunas industrias no cumplen con la normatividad que establece los valores máximos permisibles de algunos

contaminantes en sus vertimientos. Específicamente, la industria textil consume grandes volúmenes de agua y aporta considerables cargas contaminantes a los cuerpos de agua, por lo que la búsqueda de alternativas que permitan mejorar el tratamiento de este tipo de efluentes representa un tema de interés particular. En este sentido, las técnicas actuales para el tratamiento de estas aguas requieren del uso de diferentes insumos químicos, de manera que evaluar la electrocoagulación con electrodos de grafito y radiación UV representa una alternativa que permite reducir el consumo de insumos y reducir la concentración de los contaminantes presentes en estos efluentes.

Propósito del estudio: La presente investigación tiene como objetivo evaluar

el proceso de electrocoagulación, como método de tratamiento de agua, empleando electrodos de grafito e intensificada por radiación UV, en busca de determinar el porcentaje de remoción de DQO, COT y SDT en las aguas residuales de la industria textil.

Metodología: Se realizó una investigación experimental con el fin de evaluar la técnica de electrocoagulación, intensificada por radiación proveniente de una lámpara UV sumergible. Para el desarrollo metodológico se midieron algunos parámetros físicos y químicos antes y después de cada ensayo. Se llevó a cabo un diseño experimental de tipo factorial, con dos factores en tres niveles (3²), es decir 9 ensayos; todos estos se realizaron por triplicado para un total de 27 experimentos. Los factores o variables seleccionados fueron el pH inicial del agua residual (6, 7 y 8) y la intensidad de corriente aplicada (0.5 A, 1 A y 1.5 A). Las variables de respuesta seleccionadas fueron el porcentaje de remoción de DQO, COT y SDT. Una vez realizados todos los ensayos, los resultados se analizaron por medio de análisis de varianza para determinar el efecto o influencia de

cada factor sobre cada una de las variables de respuesta.

Resultados y conclusiones: Los ensayos permitieron determinar que las condiciones experimentales más favorables para el proceso de electrocoagulación fueron el pH inicial 8 a una intensidad de corriente de 0.5 amperios. El proceso presenta alta eficiencia en cuanto al porcentaje de remoción de DQO, COT y SDT para cada uno de los ensayos, lo cual es coherente con el uso de electrodos inertes que poseen una mayor resistencia química que otros electrodos lo que facilita el proceso de oxidación y reducción. Además, el uso de radiación UV intensifica el proceso por dar lugar a la formación de ozono y radicales OH* en el agua, en especial cuando el pH es alcalino. Estos factores combinados permiten alcanzar valores más altos en la remoción de los distintos contaminantes presentes en el agua residual de la industria textil. 

Palabras clave: Aguas residuales textiles; Carbono Orgánico Total [COT]; Demanda Química de Oxígeno [DQO]; Electrocoagulación; Grafito; Radiación UV; Sólidos Disueltos Totales [SDT]

ABSTRACT

Contextualization: The textile industry makes use of large quantities of water and various chemicals that are part of the different stages of the cloth processing, including painting and finishing. As a result of the use of these chemicals, wastewater from the textile industry has high concentrations of chemical oxygen demand (COD), total organic carbon (TOC), total dissolved solids (TDS) and low biodegradability.

Knowledge gap: Currently, the different industries in Colombia have failures in the final disposal of wastewater, since it has been identified that some industries do not comply the regulations that establish the maximum permissible values of some pollutants in their discharges. Specifically, the textile industry consumes large volumes of water and contributes considerably to the pollutant loads in the water bodies, which is why searching for alternatives to improve the treatment of this type of effluent is a matter of particular interest. On the other hand,

current techniques for the treatment of these waters require the use of different chemical inputs, so the evaluation of electrocoagulation with graphite electrodes and UV radiation represents an alternative that allows reducing the consumption of inputs and reducing the concentration of pollutants present in these effluents.

Purpose: This research aims to evaluate the electrocoagulation process in water treatment, using graphite electrodes and intensified by UV radiation, to determine the percentage of removal of COD, TOC, and TDS in the wastewater of the textile industry.

Methodology: Experimental research was carried out to evaluate the technique of electrocoagulation, intensified by radiation from a submersible UV lamp. For methodological development, some physical and chemical parameters were measured before and after each test. A factorial-type experimental design was carried out, with



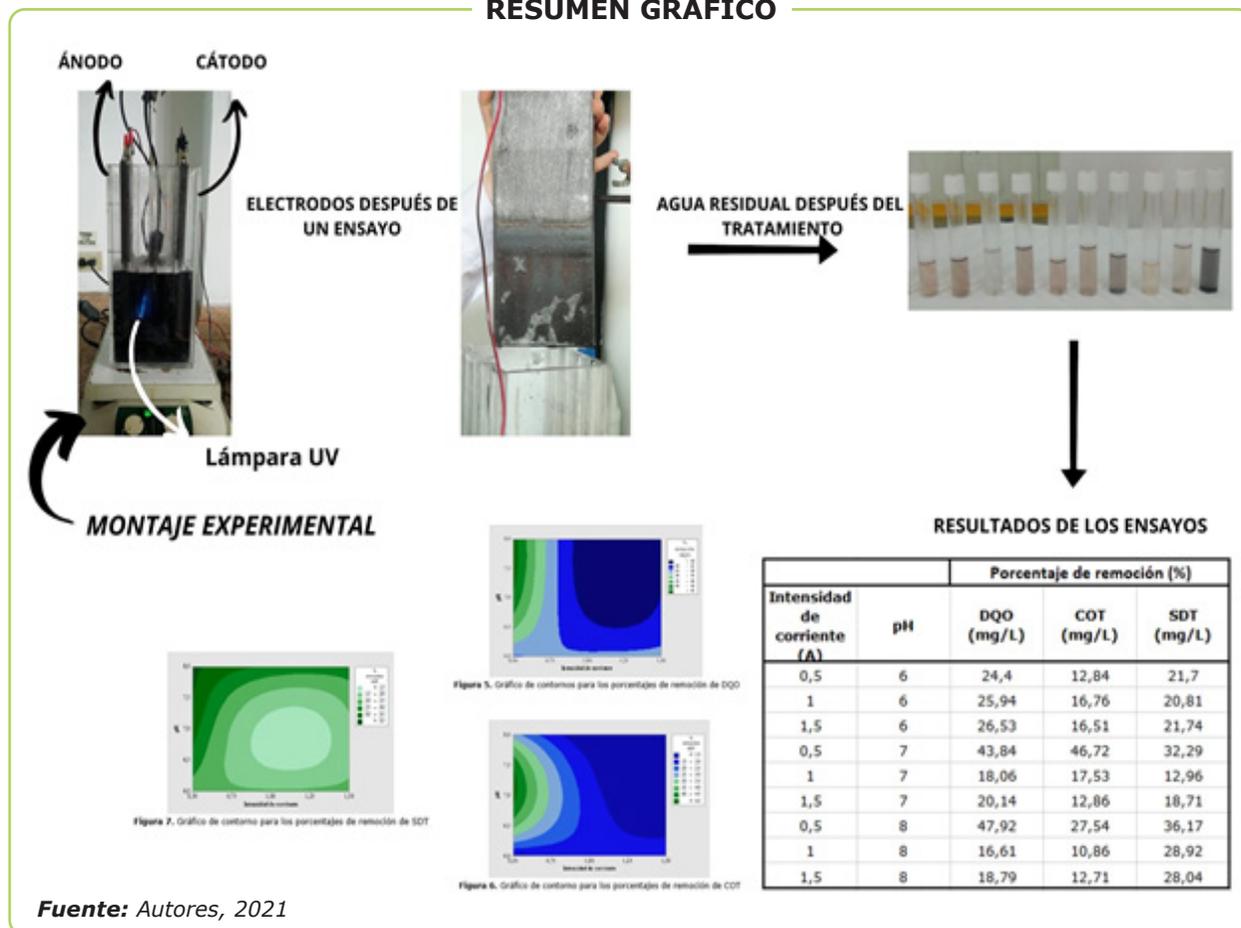
two factors in three levels 3²), specifically 9 trials; all of which were performed in triplicate for a total of 27 experiments. The factors or variables selected were the initial pH of the wastewater (6, 7 and 8) and the electric current intensity applied (0.5 A, 1 A, and 1.5 A). The response variables selected were the percentage of removal of COD, TOC, and TDS. After all the trials, the results were evaluated by analysis of variance to determine the effect or influence of each factor on each of the response variables.

Results and conclusions: The tests determined that the most favorable experimental conditions for the electrocoagulation process were pH 8 at a electric current intensity of 0.5 amperes. The

process has high efficiency in the percentage of removal of COD, TOC, and TDS for each of the tests, which is consistent with the use of inert electrodes that have greater chemical resistance than other electrodes, which facilitates the oxidation and reduction process in conjunction. Besides, the use of UV radiation intensifies the process by giving rise to the formation of ozone and OH* radicals in water, specially having an alkaline pH. These factors combined allow that higher values can be achieved in the removal of various contaminants present in the wastewater of the textile industry. 🌿

Keywords: COD removal; Electrocoagulation; Graphite; Textile wastewater; TOC removal; Total dissolved solids SDT; UV radiation

RESUMEN GRÁFICO



Electrocoagulación con radiación UV para remover DQO, COT y SDT en aguas residuales de la industria textil empleando electrodos de grafito.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad es de vital importancia tener la capacidad de ofrecer agua de buena calidad para la población, y para el desarrollo de las distintas actividades, a fin de lograr una mejor calidad de vida (Perozo; y Abreu., 2017). Esto ha llevado a buscar distintas técnicas de tratamiento que permitan conservar y recuperar los recursos hídricos, dado que hay acumulación de compuestos orgánicos contaminantes en los cuerpos de agua y se debe principalmente a las actividades antropogénicas (Gil-Pavas et al., 2020). Entre estas actividades están las actividades industriales como: el procesamiento de alimentos, la elaboración de papel y cosméticos, el curtido de pieles, las farmacéuticas, la elaboración de textiles; entre otras. Todas estas actividades descargan una considerable cantidad de agua contaminada con colorantes y compuestos tóxicos (Castañeda-Díaz et al., 2017). En especial tintes, que en muchos casos son químicamente estables y recalcitrantes y que en el medio pueden ser objeto de transformaciones bioquímicas que dan lugar a la formación de co-productos más peligrosos (Abdulrazzaq et al., 2021).

La industria textil hace uso de grandes cantidades de agua y, por tanto, es una de los mayores productores de aguas residuales industriales (Anjaneyulu et al., 2005) con una carga considerable de sustancias químicas que deben ser tratadas antes de su descarga en el ecosistema acuático (Zazou et al., 2019; Khandegar; & Saroha., 2013). El uso de tintes hace parte de las distintas etapas del procesamiento de textiles, incluidos los procesos de pintura y acabado. Además de tintes o colorantes, las aguas residuales de la industria textil contienen tensoactivos, suavizantes de tela, sales, pesticidas, disolventes y otros compuestos (García-Segura et al., 2017; Bener et al., 2019). Como resultado del uso de estas sustancias químicas, las aguas residuales de la industria textil presentan altas concentraciones de compuestos con demanda química de oxígeno (DQO), carbono orgánico total (COT) y baja biodegradabilidad (Ravndal et al., 2018), lo que puede ocasionar diversos impactos ambientales debido a la toxicidad de esos componentes (Zazou et al., 2019).

Los métodos de tratamiento para este tipo de agua residual pueden diferenciarse en tres categorías: tratamientos biológicos, químicos y físicos. La adsorción, oxidación avanzada, tratamiento biológico, filtración por membrana y tratamientos electroquímicos son algunos de los métodos de mayor uso para el tratamiento de las aguas residuales de la industria textil (Samsami et al., 2020). Especialmente las técnicas electroquímicas han demostrado su efectividad en la remoción de este tipo de contaminantes en el agua (Barrera-Díaz et al., 2012); entre estas técnicas se pueden mencionar la oxidación electroquímica, electro-reducción, electrodiálisis, electro-flotación y la electrocoagulación (Martínez-Huitle et al., 2015).

La electrocoagulación es una técnica electroquímica que se ha empleado con éxito para el tratamiento de aguas residuales de la industria textil, ya que es de gran interés debido, principalmente, a su versatilidad, seguridad, simplicidad de automatización y bajo costo de inversión (Al-Qodah et al., 2020) (Gil Pavas et al., 2018). Los procesos de electrocoagulación también son populares por el bajo uso de insumos químicos (Naje et al., 2017).

Este proceso integra las bases de la electroquímica y la coagulación/floculación para eliminar distintos contaminantes del agua residual. La técnica hace uso de electrodos (cátodos y ánodos), generalmente de hierro o aluminio (Hakizimana et al., 2017), lo cual ocasiona la dilución del metal "Mx+" en el agua, que se une con los iones OH- y forma hidróxidos metálicos, los cuales favorecen la precipitación de sólidos presentes en el agua (Gil-Pavas et al., 2019), en otras palabras, la acción de corriente externa sobre los electrodos causa la neutralización de las cargas de los sólidos suspendidos en el agua y la dilución del ánodo permite la formación de hidróxidos metálicos para precipitar los sólidos desestabilizados y favorecer la sedimentación de estos (Oncel et al., 2013). La liberación de los iones metálicos se da en el ánodo (Mouedhen et al., 2008), y en el cátodo ocurren reacciones que permiten la formación de burbujas de gas que contienen hidrógeno (Verma, 2017; Castañeda-Díaz, 2017). Distintos estudios han demostrado



que esta técnica tiene una alta eficiencia en la remoción de distintos contaminantes, principalmente en la reducción de la demanda química de oxígeno (DQO), turbidez y color de las aguas residuales industriales (Yuksel et al., 2013).

En este trabajo, en particular, se reemplazaron los electrodos metálicos por electrodos de grafito, que al ser insolubles se consideran impenetrables al uso, puesto que poseen una alta resistencia química (Sahu et al., 2014), y esta característica facilita el proceso de oxidación y reducción de diversos contaminantes existentes en el agua. Además, el proceso fue intensificado por el uso de radiación UV, con el objeto de facilitar la oxidación de contaminantes orgánicos e incrementar la efectividad del proceso electroquímico, y así alcanzar una reducción considerable de concentración de DQO, COT y SDT en aguas residuales de la industria textil. En términos de beneficios, el proceso analizado requiere un menor consumo de insumos químicos, el deterioro de los electrodos es bajo y puede lograrse un menor consumo de energía (Buscio et al., 2019).

El objetivo principal de estudio fue evaluar el proceso de electrocoagulación con electrodos de grafito, intensificado por radiación UV, como técnica para el tratamiento de aguas residuales de la industria textil. El parámetro para valorar el proceso fue la reducción de la concentración de DQO, COT y SDT; para ello se realizó el análisis del efecto que tienen la intensidad de corriente y el pH inicial del agua sobre la técnica de tratamiento empleada.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Manipulación de muestras

El agua residual empleada en los ensayos fue suministrada por una empresa textil, así como el valor de DQO promedio, a la salida del sistema de tratamiento con el que cuenta la empresa en la actualidad. La muestra para los ensayos se tomó en un día de operación normal a la entrada del sistema de tratamiento. También se recolectó una muestra a la salida, una vez cumplido el tiempo de retención total del agua residual

en la planta de tratamiento, con el fin de determinar el porcentaje de reducción de concentración de DQO, COT y SDT alcanzados en la planta el día de la toma de muestra. El sistema de tratamiento actual tiene capacidad de 30 m³/h, y consta de: filtro box o tamiz vibratorio para la remoción de sólidos; tanque de homogeneización y ajuste de pH; sistema de coagulación, floculación y sedimentación; reactor biológico aerobio; sedimentador secundario. Finalmente, se realiza la descarga del agua tratada al alcantarillado público.

Los electrodos utilizados fueron de grafito amorfo, con dimensiones de 0.28 m de alto, 0.1 m de ancho y 0.01 m de espesor, la densidad de estos es de 1 650 kg/m³ y su porosidad es del 5%. Cabe resaltar que, al finalizar cada ensayo, los electrodos se lavaron con agua destilada para no afectar el siguiente experimento. En cada ensayo emplearon dos electrodos de grafito ubicados en un recipiente de reacción que presenta hendiduras para la ubicación de los electrodos, pero permite tener 0.05 m desde el fondo hasta la parte inferior de los electrodos, a fin de facilitar el libre movimiento del agitador magnético con el cual se realizó la mezcla del agua residual. La altura de los electrodos sumergida en el agua fue de 0.14 m, de modo que el área de cada electrodo en contacto con el agua residual fue de 0.028 m². En cuanto a la lámpara UV, esta cuenta con dimensiones de 10.6 x 12.8 cm y una potencia de 9W.

2.2 Metodología Experimental

Los ensayos fueron realizados con base en un diseño experimental factorial del tipo 3² (dos variables o factores de proceso en tres niveles de cada variable), de manera que se realizaron 9 ensayos. Todos los ensayos se llevaron a cabo por triplicado para un total de 27 experimentos. Los factores o variables seleccionados fueron el pH inicial del agua residual (6, 7 y 8) y la intensidad de corriente aplicada (0.5 A, 1 A y 1.5 A). Las variables de respuesta seleccionadas fueron el porcentaje de reducción de concentración o porcentaje de remoción de DQO, COT y SDT.

Una vez realizados todos los ensayos, los resultados se analizaron por medio de

análisis de varianza para determinar el efecto o influencia de cada factor sobre cada una de las variables de respuesta (Khorram & Fallah, 2018). De acuerdo con los resultados experimentales y el análisis estadístico, se determinaron las condiciones (pH inicial del agua e intensidad corriente aplicada) en las cuales se alcanzaron los mejores resultados, en términos de porcentaje de remoción de cada variable de respuesta, y se realizaron 3 ensayos adicionales para determinar la tendencia cinética en cuanto a remoción de DQO, COT y SDT. Para este fin, a lo largo de cada ensayo adicional, se tomaron muestras de agua cada 15 minutos por un periodo de tiempo de 1.5 horas, para obtener un total de 7 muestras por ensayo de análisis de tendencia cinética.

A partir de estos datos fueron trazadas las gráficas de concentración de DQO y COT contra el tiempo, y se realizó el análisis de regresión que permitió identificar el modelo cinético al cual se ajustan los resultados experimentales. El volumen de agua en cada experimento fue de 1.5 l y el tiempo de reacción fue de 1.5 h (Verma, 2017). El pH del agua residual se ajustó agregando H_2SO_4 o NaOH, según el caso. Los análisis de pH, DQO, COT y SDT se llevaron a cabo por medio de los protocolos establecidos en los métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales (American Public Health Association [APHA] et al., 2017) enunciados en la tabla 1.

Tabla 1. Métodos de parámetros a evaluar.

Parámetro	Método
pH	M. E. 4500 – H+ B. Método Electrométrico
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	M. E. 5220 C. Reflujo Cerrado
Conductividad	M. E. 2510 B. Método Laboratorio
Sólidos disueltos totales (SDT)	M. E. 2540 F. Sólidos sedimentables
Carbono Orgánico Total (COT)	M. E. 5310 C. Método de oxidación persulfato-ultravioleta

Fuente de consulta: (APHA et al., 2017)

2.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Con los resultados promedio se realizó el análisis de varianza y a partir de este fueron establecidas las condiciones experimentales para las cuales se logran los mejores resultados de las variables de respuesta. El análisis estadístico y las gráficas de contorno de cada una de las variables de respuesta fueron elaborados en el software de análisis estadístico Minitab versión 19 con licencia de usuario final (EULA). Por otra parte, la cinética del proceso, que permite la reducción de concentración de DQO y COT en la electrocoagulación (intensificada con radiación UV), tiende a ser de pseudo primer

orden; con un coeficiente cinético de $0.007411 \text{ min}^{-1}$ y una correlación R^2 igual a 0.9942 para DQO, y en cuanto a COT, el coeficiente cinético presenta un valor de $0.003619 \text{ min}^{-1}$ y una correlación R^2 igual a 0.9934.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Caracterización del agua residual antes y después de la electrocoagulación

Las características iniciales del agua residual antes del tratamiento y los porcentajes de reducción de concentración, alcanzados en la planta de tratamiento de la empresa, se presentan en la tabla 2.



Tabla 2. Características iniciales del agua residual empleada para la realización de los ensayos y la eficiencia de remoción de los contaminantes del actual tratamiento de la empresa.

Parámetro	Unidades	Valor	Porcentaje de reducción de concentración en la planta de tratamiento de la empresa (%)
pH		8	
Turbiedad	UNT	253	50
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mgO ₂ /L	1196	32.78
Carbono Orgánico Total (COT)	mgCOT/L	436	17.2
Sólidos Disueltos Totales (SDT)	(mg SDT)/L	531	15.44

Fuente de consulta: autores

Las figuras 1, 2 y 3 muestran el promedio de porcentajes de remoción de DQO, COT y SDT en las tres repeticiones de ensayos realizados.

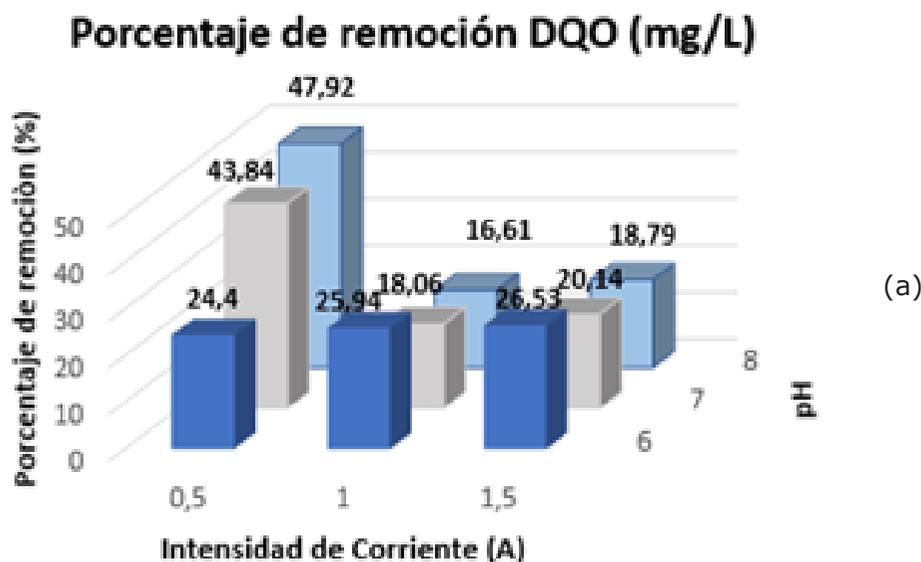
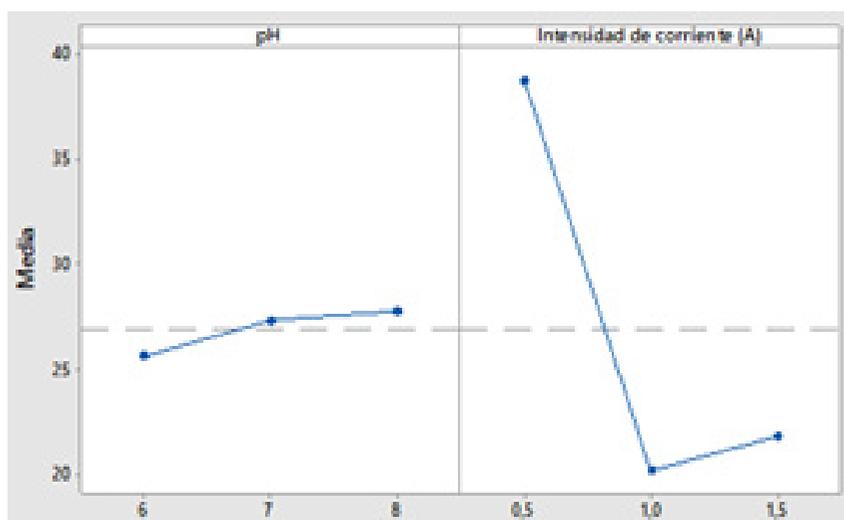


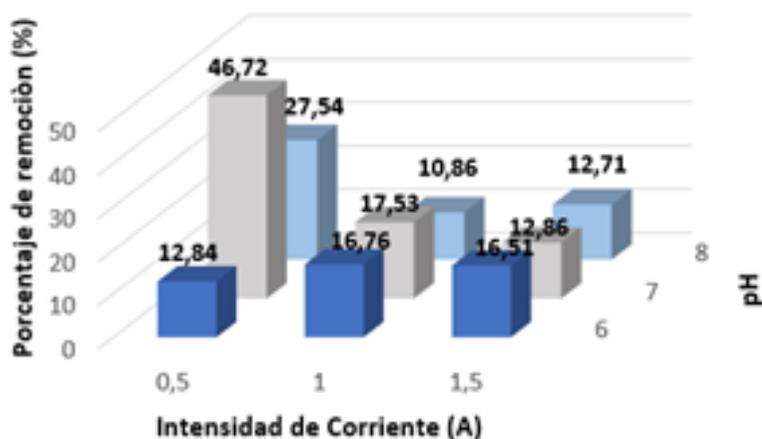
Figura 1. (a) Porcentajes de remoción promedio alcanzados en los ensayos realizados para DQO. Fuente de consulta: autores



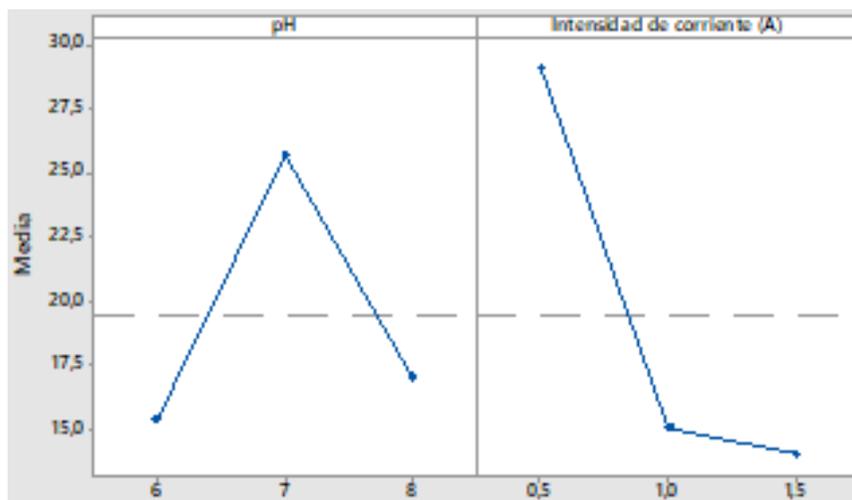
(b)

Figura 1. (b) gráfico de efectos principales. **Fuente de consulta:** autores

Porcentaje de remoción COT (mg/L)



(a)



(b)

Figura 2. (a) Porcentajes de remoción promedio alcanzados en los ensayos realizados para COT, (b) gráfico de efectos principales.

Fuente de consulta: autores

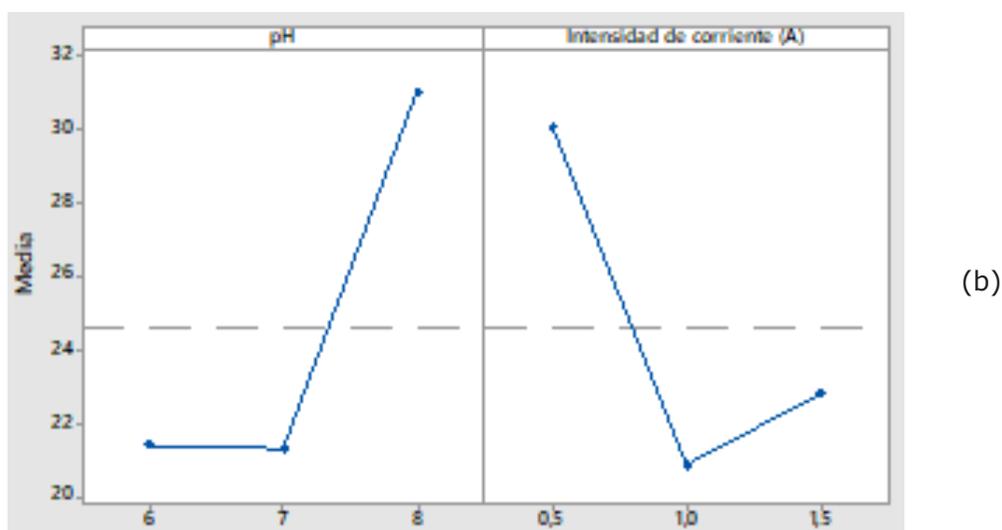
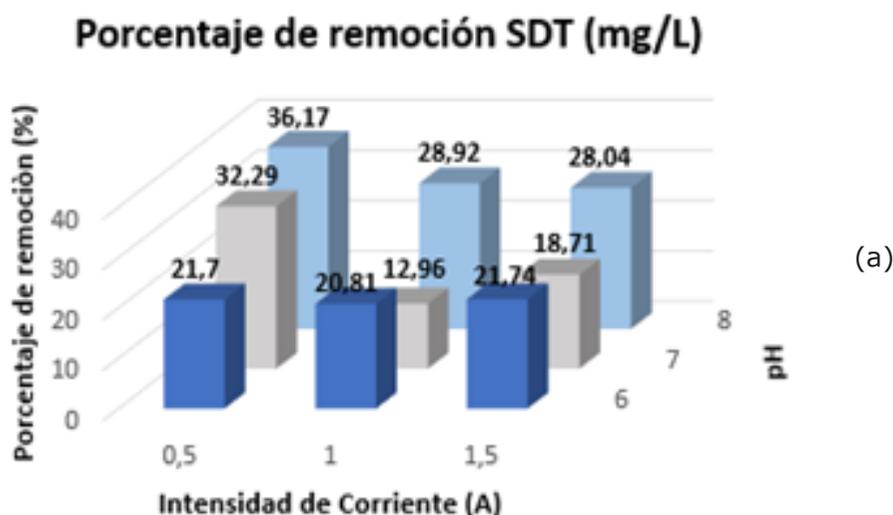


Figura 3. (a) Porcentajes de remoción promedio alcanzados en los ensayos realizados para SDT, (b) gráfico de efectos principales.

Fuente de consulta: autores

En las anteriores gráficas se observa que los mayores valores de remoción para DQO se alcanza a 0.5 amperios y pH 8; para COT, 0.5 amperios a pH 7; y para SDT, 0.5 amperios a pH 8. A partir de estas observaciones se establece que la combinación de factores o variables del proceso para los cuales se logran los mejores resultados son intensidad de corriente 0.5 A y pH entre 7 y 8. Se hace notorio que el cambio de las variables o factores de proceso da lugar a diferentes valores de las variables de respuesta, en otras palabras, los factores analizados influyen en el proceso de tratamiento. Para confirmar esta apreciación se realizó el análisis de varianza que se presenta en la tabla 3.

Las gráficas de efectos principales permiten determinar que el pH presenta

poco efecto sobre la remoción de DQO. Por otra parte, al aumentar la intensidad de corriente se aprecia que existe disminución del porcentaje de remoción de la variable analizada. Al igual que en el caso de la DQO, el efecto del pH no es tan notorio como en el caso de la intensidad de corriente, al aumentar esta variable la remoción de COT disminuye, efecto que puede ser causado por el aumento del número de burbujas en los electrodos, ya que, se reduce el contacto entre el líquido y los mismos. A pesar de que la gráfica de efectos principales denota que tanto el pH como la intensidad de corriente afectan la remoción de SDT, la diferencia porcentual de las remociones no supera el 10%, en otras palabras, el efecto del pH y la intensidad de corriente resultan poco significativos al ser analizados estadísticamente.

3.2 ANOVA-Análisis de varianza

Tabla 3. ANOVA para los resultados experimentales respecto al porcentaje de remoción para DQO realizado con un nivel de confianza del 95%, es decir ($\alpha=0.05$)

Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Valor p
Modelo	8	3094,79	386,848	2119,33	0,000
Lineal	4	1916,30	479,075	2624,59	0,000
pH	2	23,30	11,649	63,82	0,000
Intensidad de corriente	2	1893,00	946,502	5185,36	0,000
Interacciones de 2 términos	4	1178,49	294,622	1614,07	0,000
pH*Intensidad de corriente	4	1178,49	294,622	1614,07	0,000
Error	18	3,29	0,183		
Total	26	3098,07			
Desviación estándar	R ²	R ² (ajustado)	R ² (pred)		
	0,427239	99,89 %	99,85%	99,76 %	

Fuente de consulta: autores

Tabla 4. ANOVA para los resultados experimentales respecto al porcentaje de remoción para COT realizado con un nivel de confianza del 95 %, es decir $\alpha = 0.05$

Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Valor p
Modelo	8	3104,65	388,082	3221,29	0,000
Lineal	4	1818,97	454,744	3774,62	0,000
pH	2	553,78	276,890	2298,34	0,000
Intensidad de corriente	2	1265,19	632,597	5250,90	0,000
Interacciones de 2 términos	4	1285,68	321,419	2667,95	0,000
pH*Intensidad de corriente	4	1285,68	321,419	2667,95	0,000
Error	18	2,17	0,120		
Total	26	3106,82			
Desviación estándar	R ²	R ² (ajustado)	R ² (pred)		
	0,347094	99,93%	99,90 %	99,84 %	

Fuente de consulta: autores



Tabla 5. ANOVA para los resultados experimentales respecto al porcentaje de remoción para SDT realizado con un nivel de confianza del 95 %, es decir $\alpha=0.05$

Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Valor p
Modelo	8	1273,41	159,176	593,06	0,000
Lineal	4	980,58	245,145	913,36	0,000
pH	2	561,49	280,743	1045,99	0,000
Intensidad de corriente	2	419,09	209,547	780,73	0,000
Interacciones de 2 términos	4	292,83	73,207	272,75	0,000
pH* Intensidad de corriente	4	292,83	73,207	272,75	0,000
Error	18	4,83	0,268		
Total	26	1278,24			
Desviación estándar	R ²	R ² (ajustado)	R ² (pred)		
	0,518073	99,62 %	99,45 %	99,15 %	

Fuente de consulta: autores

Con base en el valor p se puede afirmar que todas las variables o factores de proceso analizados influyen sobre las variables de respuesta, esto incluye la interacción entre el pH y la intensidad de corriente aplicada.

Para visualizar con facilidad el efecto de los factores sobre las variables de respuesta, en las figuras 4, 5 y 6 se presentan las gráficas de contorno.

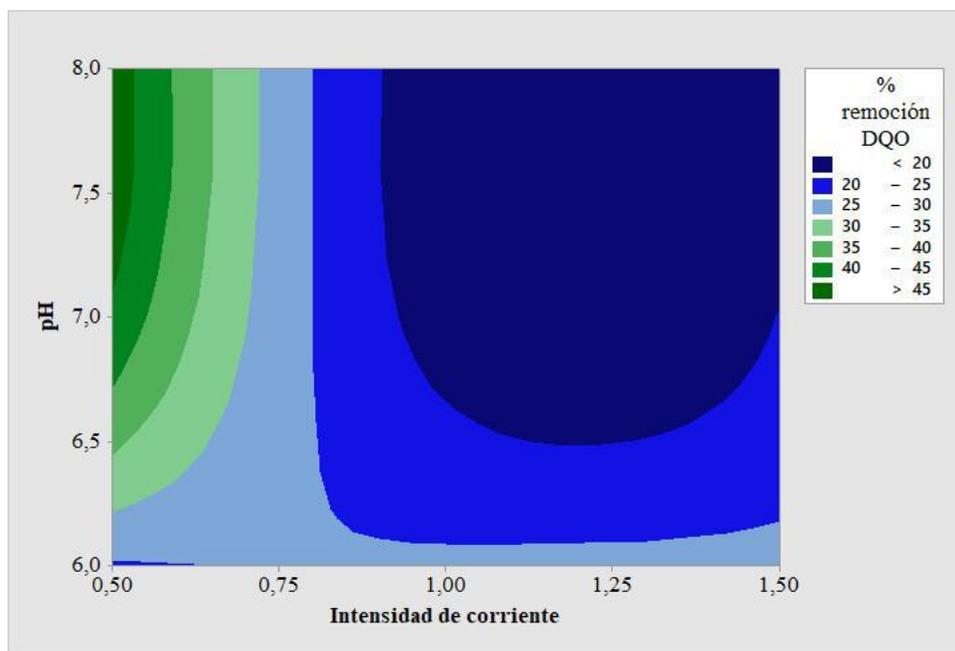


Figura 4. Gráfico de contornos para los porcentajes de remoción de DQO.

Fuente de consulta: autores

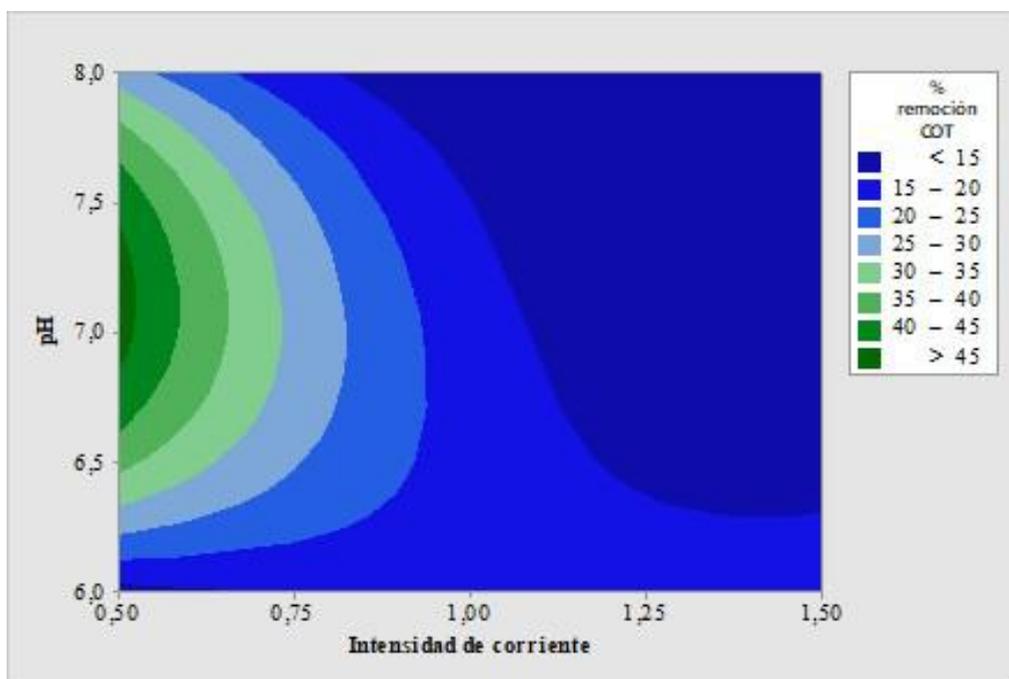


Figura 5. Gráfico de contorno para los porcentajes de remoción de COT.

Fuente de consulta: autores

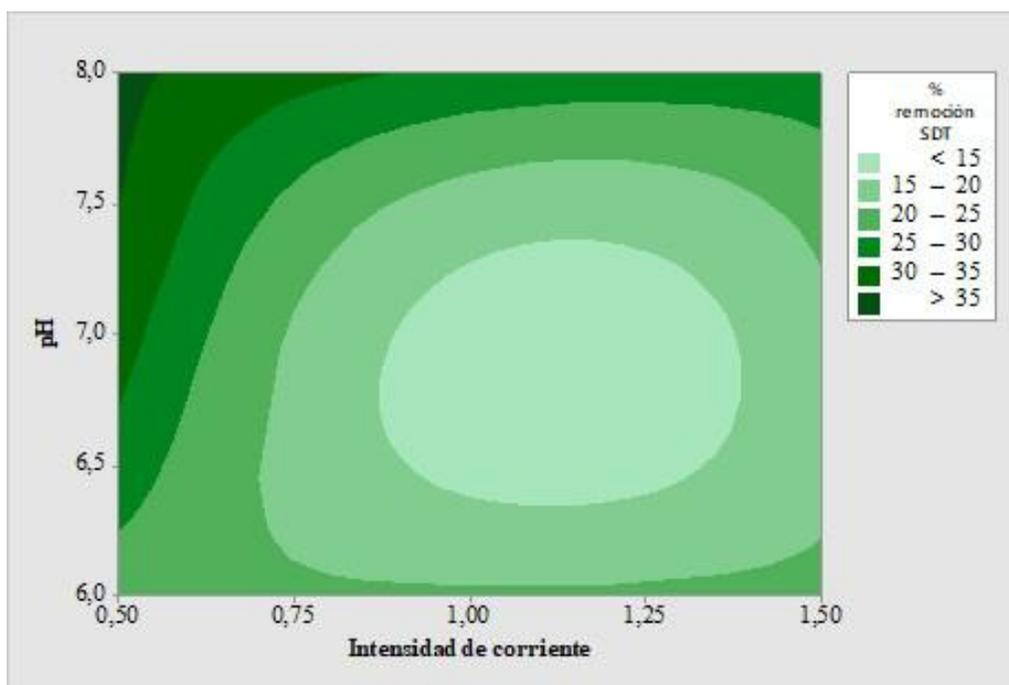


Figura 6. Gráfico de contorno para los porcentajes de remoción de SDT.

Fuente de consulta: autores



En las anteriores figuras se observa que los mayores porcentajes de remoción se logran a pH ligeramente alcalino (8), confirmando lo reportado en estudios previos (Sen et al., 2020). Con respecto a la intensidad de corriente, los mejores resultados se logran a 0.5 A; este hecho se puede presentar por causa de la formación de una capa de burbujas de gases (oxígeno e hidrógeno principalmente) en la superficie de los electrodos, cuando se incrementa la intensidad de corriente. En otras palabras, la presencia de gases en la superficie de los electrodos, dificulta el contacto con el agua residual y puede reducir la efectividad del proceso (Zazou, 2017; Kobya, 2015), es decir, se reduce la tasa de reacción y por lo tanto disminuye el porcentaje de las concentraciones de DQO, COT y SDT.

Por otra parte, el efecto del pH es semejante al observado en estudios previos (Abdulrazzaq et al., 2021; Wei, et al., 2012) en los cuales se señala que el aumento del pH inicial en el tratamiento de aguas residuales por electrocoagulación permite alcanzar mayores remociones de DQO y color frente a un pH ligeramente alcalino (Verma, 2017). Los estudios realizados con electrodos metálicos (Mendoza & López, 2017) indican que para eliminar de manera eficiente DQO y color de las aguas residuales de la industria textil se requiere que el pH del agua sea cercano a 7 y que para la remoción de turbiedad el pH debe ser 9 (Núñez et al., 2019). Lo anterior confirma que el pH en los procesos de electrocoagulación debe ser alcalino.

La inclusión de la lámpara UV (254 nm), además de aportar energía para romper los enlaces (Antonopoulou et al., 2014), favorece la formación de ozono (O_3) y radicales OH^* en el agua, los cuales, al ser agentes oxidantes fuertes, contribuyen a disminuir la concentración de los contaminantes existentes en el agua. Cabe resaltar que el proceso de electrocoagulación se realizó en el

agua cruda, es decir, sin clarificación previa; debido a esto, el efecto de la radiación UV se puede ver afectado; aunque este hecho fue sorteado por la agitación en el sistema para asegurar que el agua en contacto con la superficie de la lámpara fuese renovada continuamente.

El uso de los electrodos de grafito (al ser ánodos insolubles) favorece el proceso de electrocoagulación, puesto que poseen una mayor resistencia química (Sahu et al., 2014), lo que facilita el proceso de oxidación y reducción de diversos contaminantes existentes en el agua. Igualmente, reemplazar los electrodos metálicos por electrodos de grafito supone una mejora en el proceso de tratamiento para el agua residual, en vista de que estos son extremos conductores de corriente eléctrica, de manera que el consumo energético puede ser menor y por lo tanto el gasto operacional (Dobrosz-Gomez, I et al., 2020).

3.3 Proceso con radiación UV vs sin radiación UV

Una vez determinado que el mayor desempeño en términos de reducción de concentración de DQO y COT se alcanza a pH inicial 8 y 0.5 A de intensidad de corriente, correspondientes a una densidad de corriente aplicada de 8.93 A/m^2 , se realizaron ensayos adicionales para evaluar la tendencia cinética del proceso. Cabe señalar que los ensayos fueron llevados a cabo en presencia y ausencia de luz, a fin de analizar la influencia de la radiación UV sobre el proceso, es decir, si realmente el proceso se intensifica o presenta mejor rendimiento por la inclusión de radiación UV en el sistema de reacción. Las siguientes figuras (7 y 8) contienen las gráficas de porcentaje de remoción del proceso de electrocoagulación contra el tiempo, en condiciones de reacción sin y con radiación UV para DQO y COT.

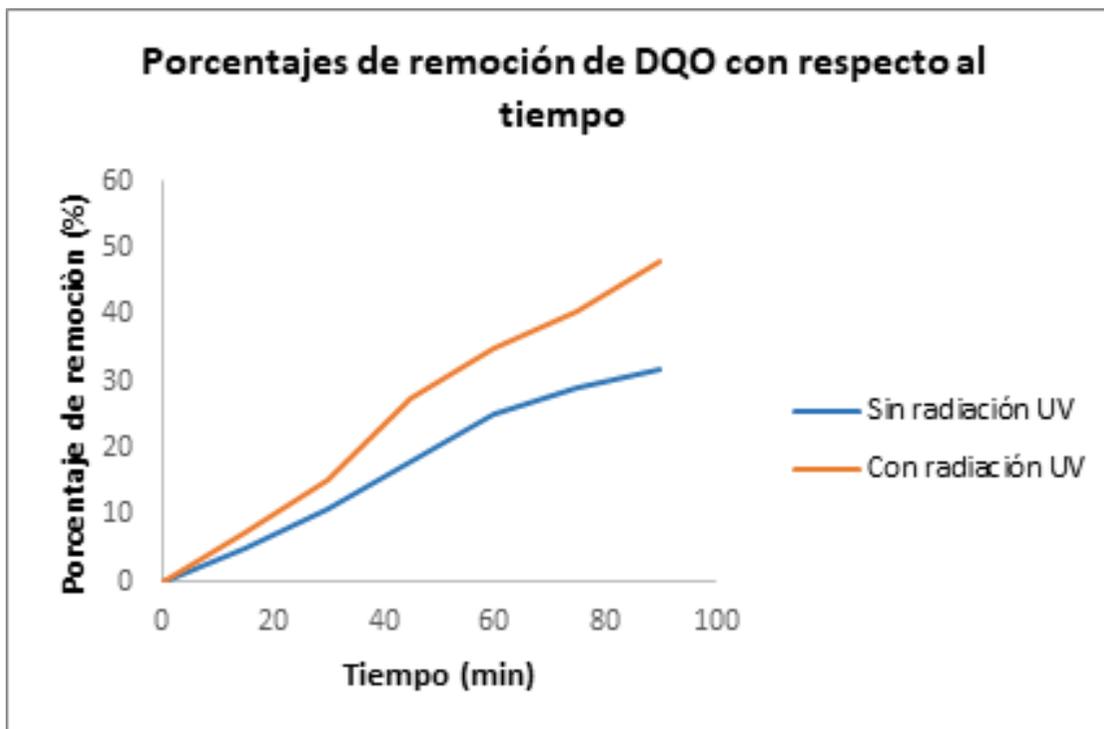


Figura 7. Porcentajes de remoción de DQO con respecto al tiempo sin y con radiación UV.
Fuente de consulta: autores

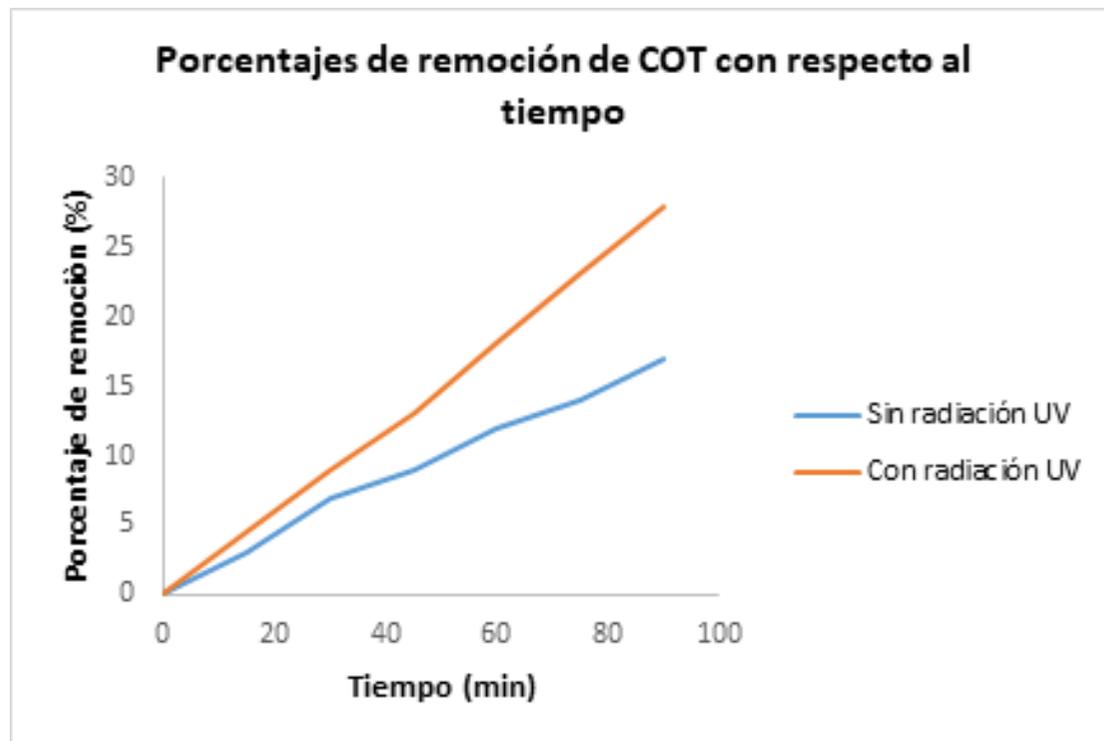


Figura 8. Porcentajes de remoción de COT con respecto al tiempo sin y con radiación UV.
Fuente de consulta: autores



Se aprecia que los porcentajes de remoción o reducción de concentración de DQO y COT son mayores cuando se hace uso de radiación UV para incrementar la efectividad del proceso. Las gráficas permiten observar que el proceso realizado no alcanza condiciones estables durante los 90 minutos de experimentación. Con base en los datos de las gráficas anteriores se realizó el análisis para determinar la tendencia cinética del proceso y se encontró que esta se ajusta al modelo de pseudo primer orden.

Los valores de los coeficientes cinéticos y coeficientes de correlación (R^2) para la reducción de concentración de DQO y COT en los ensayos de electrocoagulación sin radiación UV fueron de $0.004548 \text{ min}^{-1}$ ($R^2 = 0.9913$) y $0.002035 \text{ min}^{-1}$ ($R^2 = 0.9953$), respectivamente. Para los ensayos realizados por electrocoagulación con radiación UV, estos mismos valores fueron $0.007411 \text{ min}^{-1}$ ($R^2 = 0.9942$) y $0.003619 \text{ min}^{-1}$ ($R^2 = 0.9934$). El incremento en el valor del coeficiente cinético de pseudo primer orden confirma que la tasa o velocidad a la cual se reduce la concentración de las variables aumenta, de manera que el porcentaje de remoción en los ensayos realizados con electrocoagulación alcanza mayores valores con el mismo tiempo de reacción.

3.4 Proceso actual de la PTAR de la empresa textil vs proceso de electrocoagulación

La empresa textil cuenta con una planta de tratamiento de aguas residuales [PTAR] industriales que trata el agua proveniente del proceso de lavado y teñido, el proceso en la planta consta de un pretratamiento (filtro box o tamiz vibratorio) y tres tratamientos adicionales (primario, secundario y de lodos). Posteriormente al tratamiento se toman los parámetros correspondientes a la salida de la PTAR, para garantizar el cumplimiento de la normatividad legal vigente y se realiza el vertimiento de las aguas tratadas al alcantarillado público. Este sistema permite obtener los siguientes porcentajes de remoción: DQO (32,78 %), COT (17,2 %), SDT (15,44 %).

Teniendo en cuenta los porcentajes de remoción en el proceso de electrocoagulación (objetivo de estudio del presente trabajo), sería viable implementar este proceso en el sistema existente en la empresa, ya que, el porcentaje de remoción de DQO, COT y SDT incrementaría en 15,14 %, 10,34 % y 20,73 %, respectivamente. Adicionalmente, es importante tener en cuenta que el pH del agua residual no debe modificarse, lo que evitaría costos adicionales. Por otra parte, estudios similares al realizado plantean la oportunidad de reutilizar las aguas residuales tratadas en el proceso de teñido, lo que implica una disminución en el consumo de agua potable y vertimiento de aguas al alcantarillado (Núñez et al., 2019; Buscio et al., 2019).

CONCLUSIONES

La máxima remoción de DQO, COT y SDT fue de 47,92 %, 27,54 % y 36,17 %, respectivamente. Estos valores se lograron con un pH 8 que se considera alcalino, 0.5 A de intensidad de corriente, y una densidad de corriente aplicada de 8.93 A/m^2 . Las características del proceso coinciden con los resultados de estudios previos en el tema (Abdulrazzaq et al., 2021).

La presencia de radiación UV favorece el rompimiento de moléculas de materia

orgánica, por causa de la formación de O_3 y de radicales OH^* en el agua, en especial a pH alcalino, lo cual confirma que el proceso de electrocoagulación se intensifica por el uso de radiación UV.

Al comparar el proceso de la electrocoagulación con el proceso de tratamiento que se realiza actualmente en la empresa textil se obtuvieron los siguientes porcentajes de remoción durante la toma de muestras en la PTAR: DQO 32,78 %, COT 17,2 % y

SDT 15,44 %. También se observa que la electrocoagulación con electrodos de grafito, intensificada con radiación UV, permite lograr mayor reducción de la concentración de contaminantes (DQO 47,92%, COT 27,54% Y SDT 36,17%). De acuerdo con lo anterior, se puede determinar que el proceso analizado resulta favorable y posible de implementarse ya que, permite reducir o eliminar el uso de insumos químicos en el tratamiento.

Por otra parte, el pH del agua residual cruda generada en la empresa es un poco

superior a 8 y no se requeriría de un sistema de homogeneización para ajustar el pH del agua antes del tratamiento. Además, el uso de electrodos de grafito supone el beneficio de no tener que realizar el reemplazo periódico del ánodo, además de no introducir iones metálicos al agua, lo cual se debe comprobar por medio de estudios adicionales que permitan determinar con precisión el posible desgaste de los electrodos de grafito. Por otra parte, la alta conductividad eléctrica del grafito permite un menor gasto energético en el proceso. 

CONTRIBUCIÓN DE LA AUTORÍA

María Alejandra Rodríguez Oviedo, estudiante de la Facultad de Ingeniería ambiental en la Universidad Libre, Bogotá, Colombia: Formulación y desarrollo de todo el proceso investigativo y de elaboración del artículo científico, análisis de los resultados y conclusiones.

Ángela Daniela Sánchez Suárez, estudiante de la Facultad de Ingeniería ambiental en la Universidad Libre, Bogotá, Colombia: Formulación y desarrollo de todo el proceso investigativo y de elaboración del artículo científico, análisis de los resultados y conclusiones.

Rafael Nikolay Agudelo Valencia, docente de la Facultad de Ingeniería ambiental en la Universidad Libre, Bogotá, Colombia: Formulación y desarrollo de todo el proceso investigativo y de elaboración del artículo científico, análisis de los resultados y conclusiones.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo brindado por la Universidad Libre de Colombia, y a Edwar Humberto Villamil Farfán por la cooperación con los laboratorios de análisis de aguas.

LITERATURA CITADA

Abdulrazzaq, N. N., Al-Sabbagh, B. H. & Shanshool, H. A. (2021). Coupling of electrocoagulation and microflotation for the removal of textile dyes from aqueous solutions. *Journal of Water Process*

Engineering, 40, 101906. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101906>

Anjaneyulu, Y., Sreedhara Chary, N. & Samuel Suman Raj, D. (2005). Decolourization of industrial effluents - Available methods and emerging technologies - A review. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 4(4), 245-273. <https://doi.org/10.1007/s11157-005-1246-z>

Antonopoulou, M., Evgenidou, E., Lambropoulou, D. & Konstantinou, I. (2014). A review on advanced oxidation processes for the removal of taste and odor compounds from aqueous media. *Water Research*, 53, 215-234. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.01.028>

Barrera-Díaz, C. E., Lugo-Lugo, V. & Bilyeu, B. (2012). A review of chemical, electrochemical and biological methods for aqueous Cr(VI) reduction. *Journal of Hazardous Materials*, 223-224, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.04.054>

Bener, S., Bulca, Ö., Palas, B., Tekin, G., Atalay, S. & Ersöz, G. (2019). Electrocoagulation process for the treatment of real textile wastewater: Effect of operative conditions on the organic carbon removal and kinetic study. *Process Safety and Environmental Protection*, 129, 47-54. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.06.010>

Bilińska, L., Blus, K., Gmurek, M. & Ledakowicz, S. (2019). Coupling of electrocoagulation and ozone treatment



- for textile wastewater reuse. *Chemical Engineering Journal*, 358, 992–1001. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.10.093>
- Buscio, V., López-Grimau, V., Álvarez, M. D. & Gutiérrez-Bouzán, C. (2019) Reducing the environmental impact of textile industry by reusing residual salts and water: ECUVal system. *Chemical Engineering Journal*, 373(1), 161–170. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.04.146>
- Castañeda-Díaz, J., Pavón-Silva, T., Gutiérrez-Segura, E. & Colín-Cruz, A. (2017). Electrocoagulation-Adsorption to Remove Anionic and Cationic Dyes from Aqueous Solution by PV-Energy. *Journal of Chemistry*, 2017, 1-14. <https://doi.org/10.1155/2017/5184590>
- Dobrosz-Gomez, I., Gómez García, M. A., & Ibarra Taquez, H. N. (2020). Tratamiento de aguas residuales de la industria del café soluble vía Electrocoagulación - Oxidación Anódica. Selección de los electrodos. *Revista EIA*, 17(34), 1–17. <https://doi.org/10.24050/reia.v17i34.1328>
- García-Segura, S., Eiband, M. M. S. G., Vieira, J. & Martínez-Huitle, C. A. (2017). Electrocoagulation and advanced electrocoagulation processes: A general review about the fundamentals, emerging applications and its association with other technologies. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 801, 267–299. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2017.07.047>
- Gil- Pavas, E., Dobrosz-Gómez, I., Gómez-García, M.A. (2018) “Optimization of sequential chemical coagulation - electro-oxidation process for the treatment of an industrial textile wastewater”. *Journal of Water Process Engineering*, 22 73-79. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.01.005>
- Gil-Pavas, E., Correa-Sánchez, S. & Acosta, D. A. (2019). Using scrap zero valent iron to replace dissolved iron in the Fenton process for textile wastewater treatment: Optimization and assessment of toxicity and biodegradability. *Environmental Pollution*, 252, 1709–1718. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.06.104>
- Gil-Pavas, E., Dobrosz-Gómez, I. & Gómez-García, M. Á. (2020). Efficient treatment for textile wastewater through sequential electrocoagulation, electrochemical oxidation and adsorption processes: Optimization and toxicity assessment. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 878, 114578. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2020.114578>
- Gogate, P. R., Thanekar, P. D. & Oke, A. P. (2020). Strategies to improve biological oxidation of real wastewater using cavitation based pre-treatment approaches. *Ultrasonics Sonochemistry*, 64, 105016. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105016>
- Hakizimana, J. N., Gourich, B., Chafi, M., Stiriba, Y., Vial, C., Drogui, P. & Naja, J. (2017). Electrocoagulation process in water treatment: A review of electrocoagulation modeling approaches. *Desalination*, 404, 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.10.011>
- Khandegar, V. & Saroha, A. K. (2013). Electrocoagulation for the treatment of textile industry effluent - A review. *Journal of Environmental Management*, 128, 949–963. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.06.043>
- Khorram, A. G. & Fallah, N. (2018). Treatment of textile dyeing factory wastewater by electrocoagulation with low sludge settling time: Optimization of operating parameters by RSM. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(1), 635–642. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.12.054>
- Kobyas, M. & Demirbas, E. (2015). Evaluations of operating parameters on treatment of can manufacturing wastewater by electrocoagulation. *Journal of Water Process Engineering*, 8, 64–74. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2015.09.006>
- Martínez-Huitle, C. A., Rodrigo, M. A., Sirés, I. & Scialdone, O. (2015). Single and Coupled Electrochemical Processes and Reactors for the Abatement of Organic Water Pollutants: A Critical Review. *Chemical Reviews*, 115(24), 13362–13407. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00361>

Mouedhen, G., Feki, M., Wery, M. D. P. & Ayedi, H. F. (2008). Behavior of aluminum electrodes in electrocoagulation process. *Journal of Hazardous Materials*, 150(1), 124–135. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.04.090>

Naje, A. S., Chelliapan, S., Zakaria, Z., Ajeel, M. A. & Alaba, P. A. (2017). A review of electrocoagulation technology for the treatment of textile wastewater. *Reviews in Chemical Engineering*, 33(3), 263–292. <https://doi.org/10.1515/revce-2016-0019>

Núñez, J., Yeber, M., Cisternas, N., Thibaut, R., Medina, P. & Carrasco, C. (2019). Application of electrocoagulation for the efficient pollutants removal to reuse the treated wastewater in the dyeing process of the textile industry. *Journal of Hazardous Materials*, 371, 705–711. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.03.030>

Oncel, M. S., Muhcu, A., Demirbas, E. & Kobya, M. (2013). A comparative study of chemical precipitation and electrocoagulation for treatment of coal acid drainage wastewater. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 1(4), 989–995. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2013.08.008>

Perozo, J. R. y Abreu, J. R. (2017). Evaluación de la electrocoagulación en el tratamiento de agua potable. *Química Viva*, (1). <https://n9.cl/uwa0m>

Ravndal, K. T., Opsahl, E., Bagi, A. & Kommedal, R. (2018). Wastewater characterisation by combining size fractionation, chemical composition and biodegradability. *Water Research*, 131, 151–160. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.12.034>

American Public Health Association., American Water Works Association. & Water Environment Federation. (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, (23rd ed.). American Public Health Association.

Robles Mendoza, L. K. y López Bueno, A. F. (2017). Diseño de un prototipo para el tratamiento de aguas residuales domésticas, basado en electrocoagulación [Tesis de

pregrado, Universidad de la Salle]. Ciencia Unisalle. Facultad de ingeniería. https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_civil/315/

Sahu, O., Mazumdar, B. & Chaudhari, P. K. (2014). Treatment of wastewater by electrocoagulation: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(4), 2397–2413. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-2208-6>

Samsami, S., Mohamadi, M., Sarrafzadeh, M. H., Rene, E. R. & Firoozbahr, M. (2020). Recent advances in the treatment of dye-containing wastewater from textile industries: Overview and perspectives. *Process Safety and Environmental Protection*, 143, 138–163. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.05.034>

Sen, S., Prajapati, A., Kumar, R., Pal, D. & Mansuri, A. (2020, febrero 7). Treatment and Operating Cost Analysis of Textile Wastewater by Electrocoagulation [conference]. *Proceedings of the International Conference on Advances in Chemical Engineering 2020*, Dehradun, India. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3721564>

Verma, A. K. (2017). Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation employing Fe-Al composite electrode. *Journal of Water Process Engineering*, 20, 168–172. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2017.11.001>

Wei, M., Wang, K., Huang, C., Chiang, C., Chang, T., Lee, S. & Chang, S. (2012). Improvement of textile dye removal by electrocoagulation with low-cost steel wool cathode reactor. *Chemical Engineering Journal*, 192, 37–44. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.03.086>

Yuksel, E., Eyvaz, M. & Gurbulak, E. (2013). Electrochemical treatment of colour index reactive orange 84 and textile wastewater by using stainless steel and iron electrodes. *Environmental Progress and Sustainable Energy*, 32(1), 60–68. <https://doi.org/10.1002/ep.10601>

Zazou, H., Oturan, N., Zhang, H., Hamdani, M. & Oturan, M. A. (2017). Comparative study of electrochemical oxidation of herbicide 2,4,5-T: Kinetics, parametric optimization and mineralization pathway". *Sustainable*



Environmental Research, 27(1), 15-23. <https://doi.org/10.1016/j.serj.2016.11.008>
28, 214–221. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.02.006>

Zazou, H., Afanga, H., Akhouairi, S., Ouchtak, H., Addi, A. A., Akbour, R. A., Assabbane, A., Douch, J., Elmchaouri, A., Duplay, J., Jada, A. & Hamdani, M. (2019). Treatment of textile industry wastewater by electrocoagulation coupled with electrochemical advanced oxidation process. *Journal of Water Process Engineering*,

Al-Qodah, Z., Tawalbeh, M., Al-Shannag, M., Al-Anber, Z. & Bani-Melhem, K. (2020). Combined electrocoagulation processes as a novel approach for enhanced pollutants removal: A state-of-the-art review. *Science of the Total Environment*, 744, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140806>

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.



