

# Evaluación de la electrocoagulación con electrodos de grafito como alternativa para el tratamiento de aguas residuales en curtiembres 1

Marca Montoya, Yesid M; Agudelo-Valencia, Rafael Nikolay; Garcés Polo, Siby Inés; Peña Giraldo, Mauricio V

**Yesid M Marca Montoya** marcam@unilibre.edu.co

Universidad Libre, Colombia

**Rafael Nikolay Agudelo-Valencia**

rafaeln.agudelov@unilibre.edu.co

Universidad Libre, Colombia

**Siby Inés Garcés Polo** siby.garcés@unilibre.edu.co

Universidad Libre, Colombia

**Mauricio V Peña Giraldo**

mauriciov.penag@unilibrebog.edu.co

Universidad Libre, Colombia

## INVENTUM

Corporación Universitaria Minuto de Dios, Colombia

ISSN: 1909-2520

ISSN-e: 2590-8219

Periodicidad: Semestral

vol. 16, núm. 31, 2021

inventum@uniminuto.edu

Recepción: 20 Mayo 2021

Aprobación: 15 Junio 2021

Publicación: 15 Julio 2021

URL: <http://portal.amelica.org/amei/journal/671/6713631007/>

Corporación Universitaria Minuto De Dios - UNIMINUTO



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional.

**Resumen:** En este trabajo se evaluó la electrocoagulación con electrodos de grafito como técnica avanzada para el tratamiento de agua residuales del proceso de depilado en curtiembres. Se analizó el efecto del tiempo de reacción y el número de electrodos de grafito, es decir, la intensidad de corriente aplicada sobre el porcentaje de disminución o reducción de concentración de las variables mencionadas previamente. Se planteó un diseño experimental de tipo factorial  $2^3$ . Las variables de respuesta para determinar la efectividad del proceso fueron el porcentaje de remoción de turbiedad, el carbono orgánico total y la demanda química de oxígeno. Las condiciones de mayor eliminación de sulfuros y turbiedad se lograron con 4 electrodos, 24 A y 60 minutos de tiempo de reacción. Para esas condiciones la densidad de corriente aplicada fue de  $107,14 \text{ A/m}^2$ . Los mayores porcentajes de eliminación fueron 41,46 %, 75,02 % y 35,73 % para sulfuros, turbiedad y carbono orgánico total, respectivamente.

**Palabras clave:** curtiembre, depilado, electrocoagulación, grafito, electrodos, sulfuros, turbiedad, carbono orgánico total.

**Abstract:** In this work, electrocoagulation with graphite electrodes was evaluated as an advanced technique for the treatment of residual water from the depilation process in tanneries. The effect of reaction time, the number of graphite electrodes (and the intensity of the applied current on the percentage decrease or reduction in the concentration of the previously mentioned variables were analyzed. An experimental design of the factorial type  $2^3$  was proposed. The response to determining the effectiveness of the process was the percentage of turbidity removal, Total organic carbon, and chemical oxygen demand. The conditions with the highest removal of sulfides and turbidity were achieved with 4 electrodes, 24 A and 60 minutes of reaction time, under these conditions, the applied current density was  $107.14 \text{ A/m}^2$ . The highest removal percentages were 41.46 %, 75.02 %, and 35.73 % for sulfides, turbidity, and total organic carbon, respectively.

**Keywords:** tannery, hair removal, electrocoagulation, graphite, electrodes, sulfides, turbidity, total organic carbon.

**Resumo:** Neste trabalho, a eletrocoagulação com eletrodos de grafite foi avaliada como uma técnica avançada para o tratamento de águas residuais do processo de depilação em curtumes. Foi analisado o efeito do tempo de reação, do número de eletrodos de grafite (e da intensidade da corrente aplicada sobre o percentual de redução ou redução da concentração das variáveis citadas anteriormente). Propôsse um desenho experimental de tipo

fatorial 2<sup>3</sup>. A resposta a determinar a eficácia do processo foi a porcentagem de remoção de turbidez, Demanda Química de Carbono Orgânico Total e Oxigênio Químico. As condições com maior remoção de sulfetos e turbidez foram obtidas com 4 eletrodos, 24 A e tempo de reação de 60 minutos, para sob essas condições, a densidade de corrente aplicada foi de 107,14 A / m<sup>2</sup> e os maiores percentuais de remoção foram 41,46%, 75,02% e 35,73% para sulfetos, turbidez e Carbono Orgânico Total, respectivamente.

**Palavras-chave:** Curtume, depilação, eletrocoagulação, grafite, eletrodos, sulfetos, turbidez, carbono orgânico total.

## **Evaluación de la electrocoagulación con electrodos de grafito como alternativa para el tratamiento de aguas residuales en curtiembres<sup>1</sup>**

### **Resumen**

En este trabajo se evaluó la electrocoagulación con electrodos de grafito como técnica avanzada para el tratamiento de agua residuales del proceso de depilado en curtiembres. Se analizó el efecto del tiempo de reacción y el número de electrodos de grafito, es decir, la intensidad de corriente aplicada sobre el porcentaje de disminución o reducción de concentración de las variables mencionadas previamente. Se planteó un diseño experimental de tipo factorial 2<sup>3</sup>. Las variables de respuesta para determinar la efectividad del proceso fueron el porcentaje de remoción de turbiedad, el carbono orgánico total y la demanda química de oxígeno. Las condiciones de mayor eliminación de sulfuros y turbiedad se lograron con 4 electrodos, 24 A y 60 minutos de tiempo de reacción. Para esas condiciones la densidad de corriente aplicada fue de 107,14 A/m<sup>2</sup>. Los mayores porcentajes de eliminación fueron 41,46 %, 75,02 % y 35,73 % para sulfuros, turbiedad y carbono orgánico total, respectivamente.

Palabras clave: curtiembre, depilado, electrocoagulación, grafito, electrodos, sulfuros, turbiedad, carbono orgánico total.

### **I. INTRODUCCIÓN**

La producción de cuero curtido, curtiembres o tenerías, representa una de las principales actividades industriales en la parte alta de la cuenca del río Bogotá, especialmente en los municipios de Chocontá y Villapinzón, Cundinamarca, Colombia. La producción de cuero se asocia a la industria de cárnicos, por el aprovechamiento de las pieles de los animales sacrificados, y también está asociada a la confección de diferentes productos de uso cotidiano e industrial. El curtido de pieles crudas es la transformación de estas en un material resistente a la biodegradación, a través de diferentes operaciones químicas y mecánicas, con el objeto de remover carne residual, grasas y pelo de la piel para mejorar el aspecto y propiedades funcionales del producto final [1].

Las aguas residuales generadas en el curtido de pieles generalmente contienen altas concentraciones de compuestos orgánicos e inorgánicos, compuestos nitrogenados y iones, tales como cromo trivalente, sulfuros y cloruros. El tratamiento de estas aguas se realiza a través de la combinación de métodos mecánicos, químicos y biológicos [2]. Por causa de las estrictas regulaciones de

calidad del agua, es necesario llevar a cabo investigaciones que permitan mejorar las tecnologías de tratamiento de aguas, y así desarrollar procesos económicos y eficaces que lidien con los compuestos tóxicos y biológicamente refractarios [3].

En la actualidad, el tratamiento de aguas residuales del proceso de pelambre o depilado, que consiste en retirar el pelo de la piel, se hace por oxidación catalítica con aire, utilizando  $Mn^{2+}$  como catalizador. Una vez oxidados los sulfuros, el agua se clarifica por medio de coagulantes como el sulfato de aluminio y el policloruro de aluminio; luego, el agua clarificada es trasvasada a un reactor biológico para disminuir la carga orgánica. Cuando se ha cumplido el tiempo de retención en el reactor biológico, el agua se lleva a tanques para oxidación química con ozono, y finalmente se filtra para obtener un efluente final claro.

Existen diferentes procesos para el tratamiento de aguas residuales de curtiembres: coagulación química [4], oxidación/coagulación/sedimentación y filtración [5], reactores biológicos [6], procesos con membranas y procesos de oxidación avanzada [7], entre otros. La coagulación química permite remover contaminantes sólidos tanto orgánicos como inorgánicos, pero necesita de la adición de compuestos químicos que ocasionan contaminación secundaria [8]; además, el consumo de alcalinidad ejercido por el coagulante disminuye el pH del agua y, por lo tanto, puede ocasionar la volatilización de ácido sulfhídrico. La electrocoagulación (EC) es una tecnología útil para remover una amplia variedad de contaminantes en distintos tipos de aguas residuales [9], desde partículas orgánicas e inorgánicas y metales hasta compuestos orgánicos persistentes. Los sistemas convencionales de electrocoagulación emplean la corriente eléctrica para disolver, en el agua residual, el hierro, el aluminio [10] u otros metales empleados como ánodos de sacrificio. La electrodisolución de estos materiales aumenta la concentración de los iones metálicos en solución o sus especies complejas con iones OH, estas especies actúan como coagulantes o agentes de desestabilización que ayudan en la separación de los contaminantes presentes en el agua residual [11].

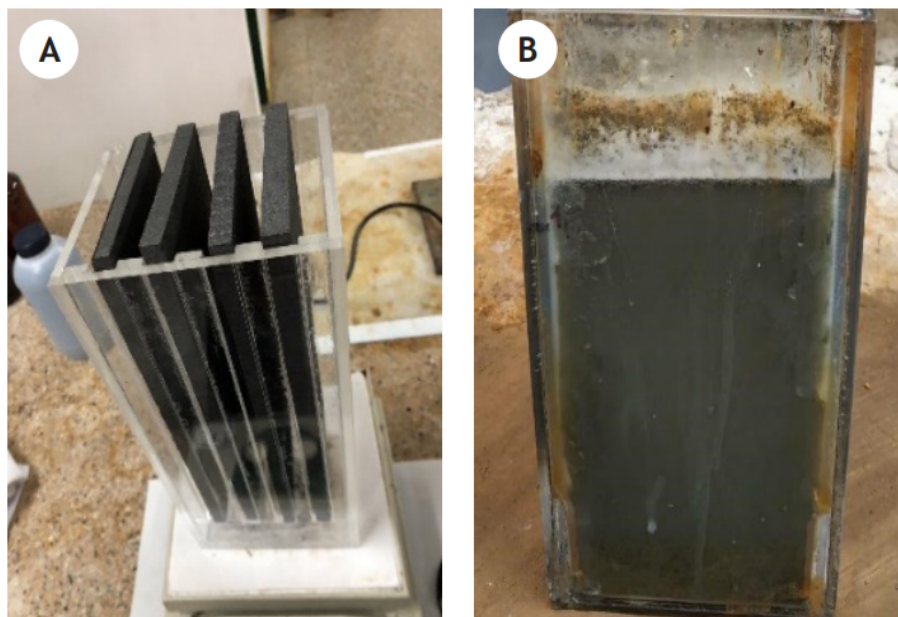
En el caso específico del tratamiento de aguas residuales de curtiembres, la electrocoagulación se ha probado de manera acoplada con oxidación avanzada por foto Fenton, logrando remover el 99 % de la demanda química de oxígeno (DQO), el 93 % de la turbiedad y el 70 % de los sólidos suspendidos totales [12]. También se ha probado la combinación electrocoagulación, electroflotación y reactor anaerobio de lecho fluidizado para la remoción del 90 % de DQO [13]. Sin embargo, en la mayoría de los casos se usan electrodos de aluminio y de hierro.

En el presente trabajo se hace uso de electrodos de grafito, debido a que, comparado con otros materiales, el grafito presenta alta inercia química y baja corriente residual con bajo consumo de energía [14], [15]. En este sentido, el objetivo de esta investigación es diseñar, construir y evaluar el desempeño de un sistema de electrocoagulación con electrodos de grafito a escala de laboratorio para la disminución de concentración de turbiedad, carbono orgánico total (COT) y sulfuros. En el tratamiento de aguas residuales de pelambre o depilado en curtiembres, estas aguas presentan alta carga de sólidos, materia orgánica y sulfuro, que se emplea como agente para depilado de la piel. Se utilizan electrodos de grafito para evitar o reducir la frecuencia de reemplazo de los ánodos en los sistemas de electrocoagulación y la posible contaminación del agua con exceso de

metales como aluminio y hierro, que son los que con mayor frecuencia conforman los electrodos de los sistemas de electrocoagulación.

## II. METODOLOGÍA

Con el fin de explorar la alternativa de tratamiento propuesta, se realizó un diseño experimental factorial con tres factores en dos niveles, es decir, un diseño del tipo  $2^3$  [16], y hicieron tres réplicas de los ensayos, para un total de 24 experimentos. Los parámetros de variación o factores de proceso fueron el número de placas de grafito (2 y 4), la intensidad de corriente (12 A y 24 A) y el tiempo de reacción (30 min y 60 min). Las variables de respuesta fueron los porcentajes de reducción de concentración de sulfuros, COT y turbiedad. El agua para la realización de cada ensayo fue tomada de una curtiembre ubicada en el municipio de Villapinzón, que por confidencialidad no se revela su nombre. El volumen de agua para cada ensayo fue de  $0,002 \text{ m}^3$ . Cada uno de los electrodos de grafito de tipo amorfo utilizados contó con 0,28 m de alto, 0,1 m de ancho y 0,01 m de espesor y porosidad del 5 %. La fuente de corriente directa permitió variar la intensidad de corriente entre 12 A y 24 A. La agitación del agua durante cada ensayo fue realizada por medio de una plancha de agitación magnética, a una velocidad de 500 rpm. Las variables de calidad del agua analizadas fueron carbono orgánico total (COT), turbiedad, pH y sulfuros al inicio y final de cada ensayo. Los análisis se realizaron conforme a los protocolos establecidos por los métodos estándar para análisis de agua potable y residual, edición 22 [17]. En la figura 1 se muestran el montaje experimental implementado para el proceso de electrocoagulación y el agua residual del proceso de pelambre antes de ser tratada.



**Figura 1.**

Montaje experimental del proceso de electrocoagulación. a) reactor vacío con 4 placas de grafito.

b) Montaje experimental con el agua residual del proceso de depilado antes de ser tratada.

Elaboración propia.

Así mismo, se determinó el porcentaje de remoción de las variables de respuesta a partir de (1).

$$R(\%) = (C_i - C_f) / C_i \times 100 \quad (1)$$

Donde, R es el porcentaje de remoción (Sulfuro, COT y turbiedad),  $C_i$  y  $C_f$  son las concentraciones iniciales y finales respectivamente. Los resultados de los ensayos se analizaron mediante análisis de varianza (ANOVA) [16], con el fin de establecer el efecto de cada factor sobre las variables de respuesta y las posibles interacciones entre ellas.

### III. RESULTADOS

Las características iniciales del agua residual se presentan en la tabla 1.

Variable	Unidades	Valor
Carbono orgánico total (COT)	mg/L	839,45
Turbiedad	NTU	2115
Sulfuros	mg/L	2857,14
pH	-	12,74
Conductividad eléctrica	S/m	35

**Tabla 1.**  
Condiciones iniciales del agua residual  
Elaboración propia.

Cómo se observa en la tabla 1, las condiciones iniciales del agua residual señalan una turbiedad elevada, así como una alta concentración de COT y de sulfuros. Esta última se debe al uso de  $\text{Na}_2\text{S}$  como fuente de iones  $\text{S}^{2-}$  para lograr el depilado de las pieles. La adición de  $\text{Na}_2\text{S}$  se realiza a pH alcalino, con el objeto de reducir la volatilización del sulfuro en forma de  $\text{H}_2\text{S}$ , razón por la cual el pH del agua presenta un valor elevado. Los resultados de los ensayos realizados se presentan en la tabla 2. En esta se aprecia que la máxima remoción promedio de sulfuros (41,46 %) y turbiedad (75,0 %) t lugar cuando se emplearon 4 placas, 24 A de corriente y 60 minutos de tiempo de reacción, en cuanto a COT la máxima remoción fue del 35,87 %, pero para un tiempo de reacción de 60 minutos, 2 placas o electrodos de grafito y 12 A.

Tiempo (min)	Número de placas o electrodos de grafito	Corriente (A)	Remoción de sulfuros (%)	Remoción de COT (%)	Remoción de turbiedad (%)
30	2	24	23,33	0,11	64,44
30	4	12	30,00	35,38	55,32
60	2	12	24,75	35,87	52,72
60	4	12	36,37	34,60	74,94
30	2	12	23,77	35,40	48,94
30	4	24	34,55	34,45	71,16
60	2	24	26,32	24,61	64,54
60	4	24	41,54	33,12	76,03

**Tabla 2.**  
Resultados de los ensayos  
Elaboración propia

Tiempo (min)	Número de placas o electrodos de grafito	Corriente (A)	Remoción de sulfuros (%)	Remoción de COT (%)	Remoción de turbiedad (%)
30	2	24	17,68	0,46	64,92
30	4	12	27,18	34,67	53,48
60	2	12	24,57	35,74	53,29
60	4	12	33,36	32,64	72,96
30	2	12	23,70	35,30	47,52
30	4	24	33,15	33,83	69,74
60	2	24	23,68	21,89	65,82
60	4	24	41,67	35,72	74,94
30	2	24	20,20	0,08	65,01
30	4	12	28,24	34,90	56,97
60	2	12	25,45	35,58	54,14
60	4	12	31,75	31,68	70,45
30	2	12	23,52	35,24	44,21
30	4	24	30,70	33,08	72,58
60	2	24	23,92	23,49	61,13
60	4	24	41,18	35,61	74,09

**Tabla 2**  
Resultados de los ensayos  
Elaboración propia.

Para determinar si las variables o factores experimentales escogidos influyen sobre las variables de respuesta se realizó el ANOVA, que arrojó los resultados que se muestran en la. tabla 3.

Sulfuros					
	GL	SC	MC	Valor F	Valor P
Número de placas (A)	1	691,00267	691,00267	253,9829	3,07E-11
Intensidad de corriente (B)	1	26,56305	26,56305	9,76344	0,00653
Tiempo de reacción (C)	1	142,79398	142,79398	52,48493	1,96E-06
A * B	1	90,1792	90,1792	33,146	2,94E-05
A * C	1	27,20016	27,20016	9,9761	0,00604
B * C	1	14,8177	14,8177	5,4635	0,03298
A * B * C	1	0,4059	0,4059	0,01492	0,90431
Modelo	7	992,9735	141,79962	52,11945	7,84E-10
Error	16	43,53066	2,72067	0	0
Total	23	1036,12801	0	0	0

**Tabla 3.**  
ANOVA para las variables de respuesta seleccionadas  
Elaboración propia.



	COT				
	GL	SC	MC	Valor F	Valor P
Número de placas (A)	1	660,41598	660,41598	763,61823	6,22E-15
Intensidad de corriente (B)	1	823,28155	823,28155	951,93456	1,11E-15
Tiempo de reacción (C)	1	190,72341	190,72341	220,52748	8,88E-11
A * B	1	869,25712	869,25712	1005,09467	6,66E-16
A * C	1	225,18442	225,18442	260,37366	2,54E-11
B * C	1	248,33019	248,33019	287,13639	1,21E-11
A * B * C	1	144,9506	144,9506	167,60182	6,80E-10
Modelo	7	3162,14329	451,73476	522,32669	0
Error	16	13,83762	0,86485	0	0
Total	23	3175,9809	0	0	0

**Tabla 3.**  
ANOVA para las variables de respuesta seleccionadas  
Elaboración propia.

	Turbiedad				
	GL	SC	MC	Valor F	Valor P
Número de placas (A)	1	770,45234	770,45234	263,06774	2,35E-11
Intensidad de corriente (B)	1	810,61017	810,61017	276,77947	1,60E-11
Tiempo de reacción (C)	1	271,73385	271,73385	92,78239	4,61E-08
A * B	1	39,11272	39,11272	13,35488	0,00214
A * C	1	94,26793	94,26793	32,8739	3,46E-05
B * C	1	167,25442	167,25442	57,10833	1,15E-06
A * B * C	1	14,45974	14,45974	4,93722	0,04106
Modelo	7	2167,89117	309,69874	105,74535	3,40E-12
Error	16	46,85956	2,92872	0	0
Total	23	2214,75073	0	0	0

**Tabla 3.**  
ANOVA para las variables de respuesta seleccionadas  
Elaboración propia.

En cuanto a la remoción de sulfuros, se observa que todos los factores o variables de proceso tienen efecto sobre esta variable. Además, las combinaciones o efectos entre variables también la afectan. De la misma manera que para los sulfuros, todas las variables o factores de proceso y sus interacciones, tienen efecto sobre la variable de respuesta del COT. Cabe resaltar que para el COT la máxima remoción alcanza un valor del 35,73 %, y aunque no se observan variaciones numéricas significativas su porcentaje de remoción, estadísticamente si existen diferencias. El motivo de la relativamente baja remoción puede ser la presencia de materia orgánica de gran tamaño o compleja, para la cual se requiere aumentar el tiempo de reacción, a fin de observar cambios significativos en la remoción.

En otras palabras, es probable que, para el rango de tiempos de reacción empleados, las distintas reacciones que tienen lugar en los electrodos ocasionen la ruptura de las moléculas de materia orgánica, transformando estas en moléculas más pequeñas; pero, a causa del corto tiempo de reacción, no se alcanza la total mineralización de la materia orgánica y, por lo tanto, la remoción de COT es baja. Respecto a la remoción de turbiedad, el ANOVA permite determinar que todas las variables o factores de proceso analizados influyen sobre esta variable de respuesta. La remoción de turbiedad fue la variable que alcanzó el mayor valor, hecho que se debe a la corriente aplicada, que permite desestabilizar y aglomerar los sólidos presentes en el agua, a pesar de la ausencia de un electrodo metálico que aporte iones al agua para formar especies hidrolizadas y finalmente hidróxidos metálicos que permiten la precipitación de los sólidos.

Para observar las variables más relevantes o de mayor influencia sobre el proceso se elaboraron los diagramas de Pareto de los efectos acumulados. Estos se presentan en la figura 2.

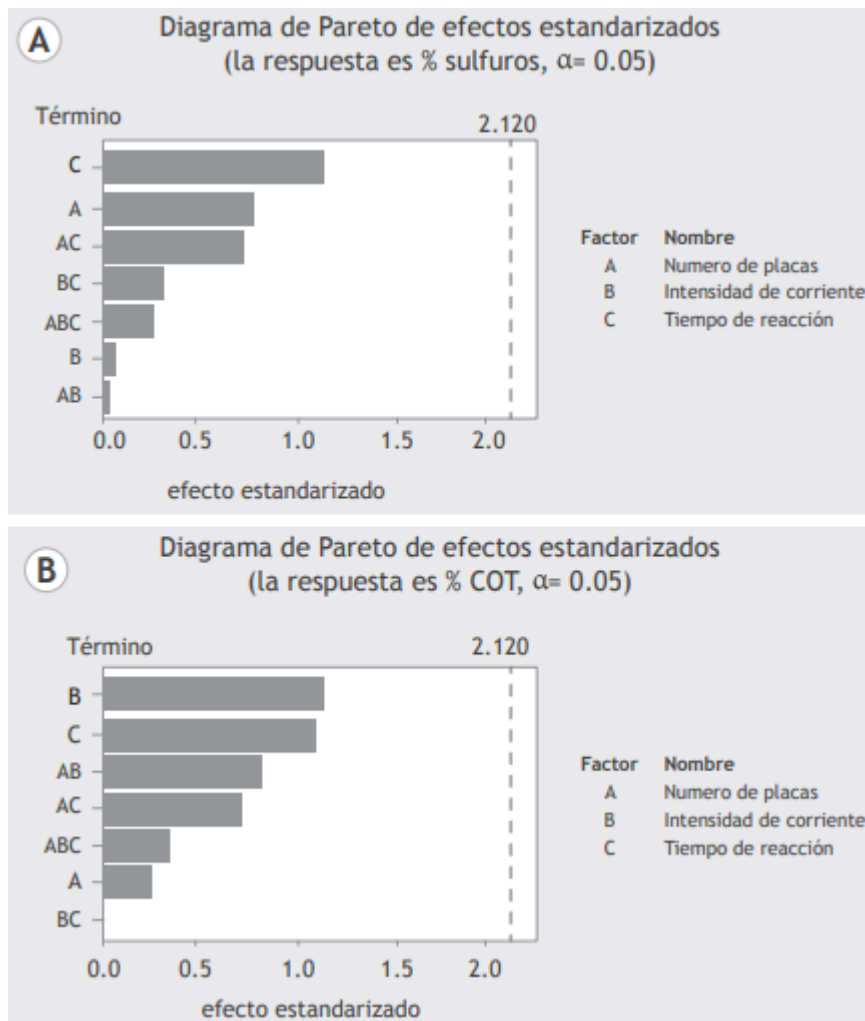


Figura 2.

Diagramas de Pareto para las variables de respuesta analizadas: a) sulfuros, b) COT, C) turbiedad  
 Elaboración propia.



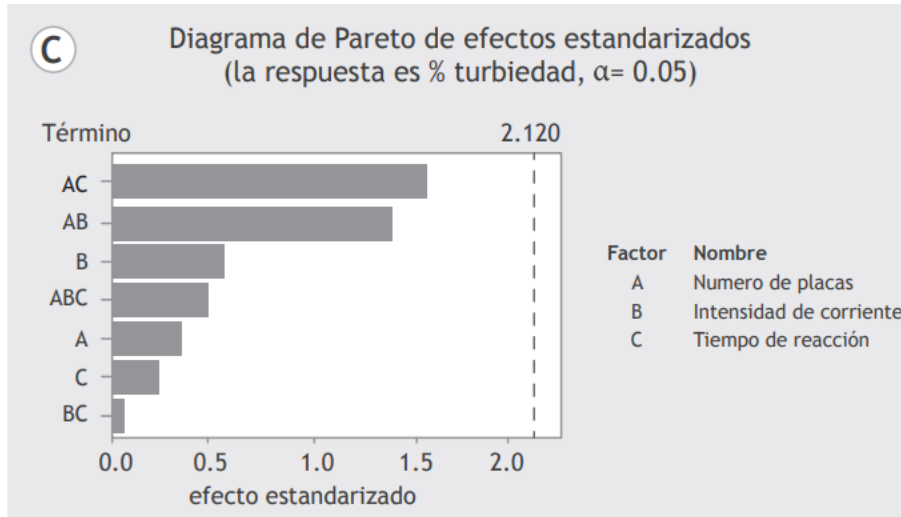
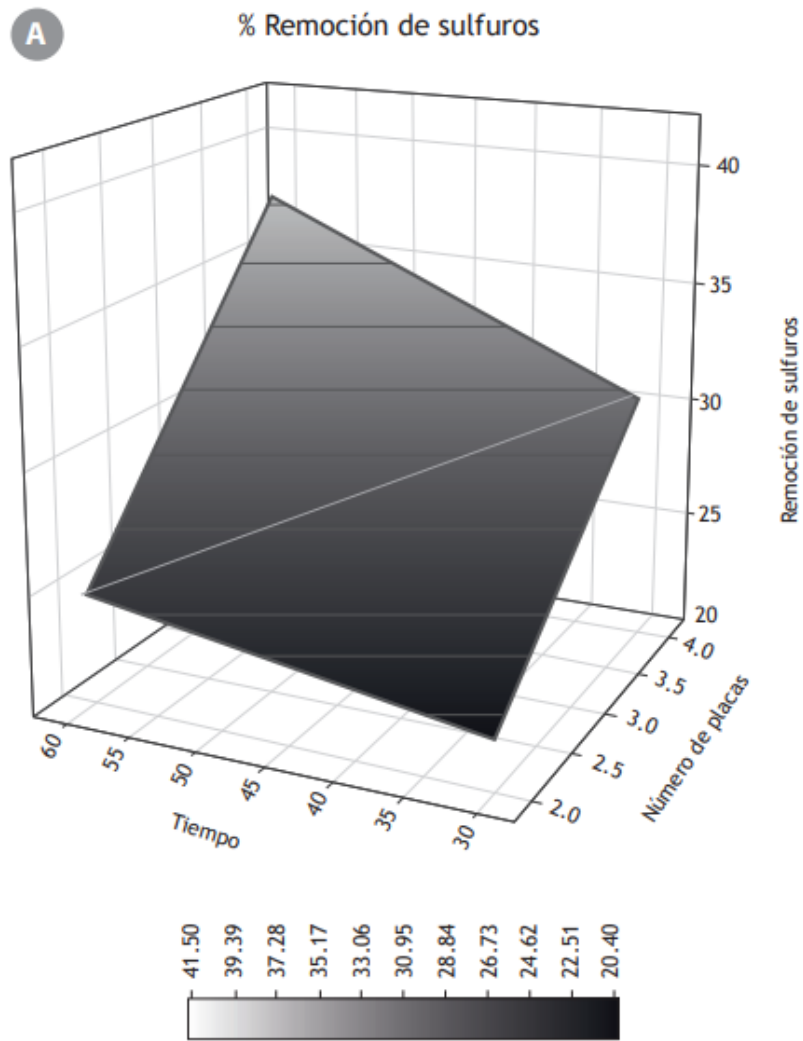


Figura 2

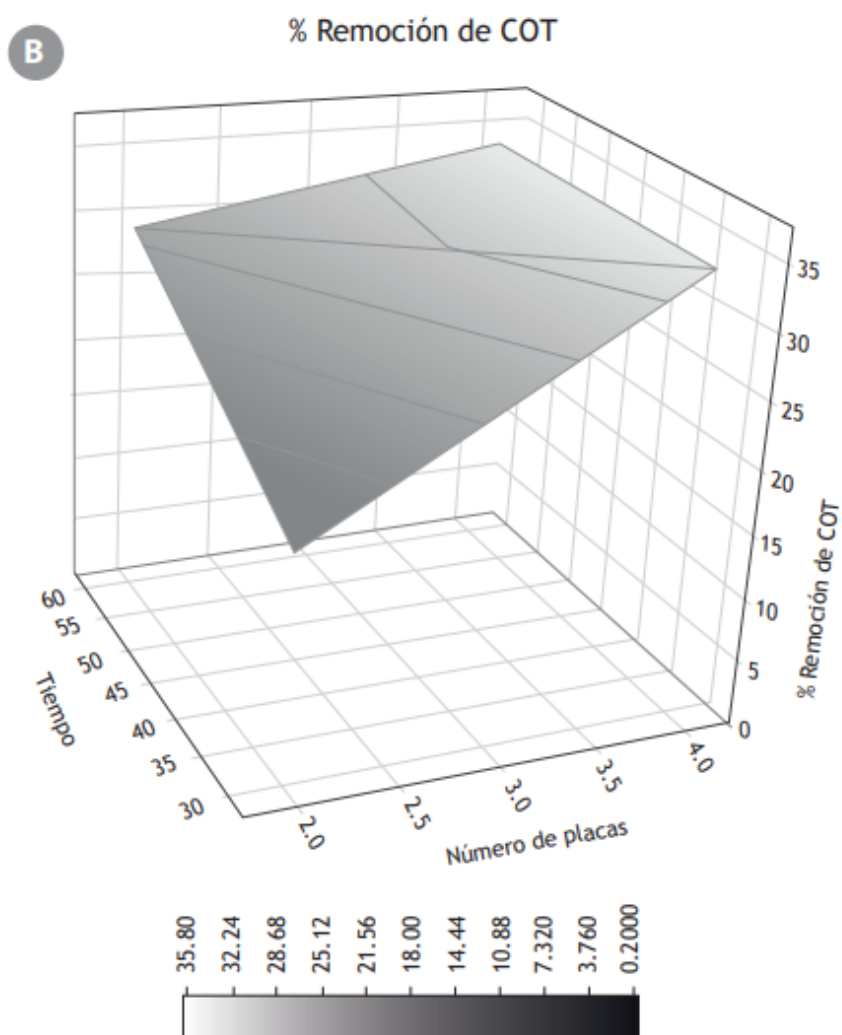
Diagramas de Pareto para las variables de respuesta analizadas: a) sulfuros, b) COT, C) turbiedad  
Elaboración propia.

La figura 2#a permite determinar el tiempo de reacción y el número de placas o electrodos de grafito son las variables de mayor relevancia para la remoción de sulfuros. En la figura 2#b se puede apreciar que la intensidad de corriente y el tiempo de reacción son las dos variables de mayor influencia sobre la remoción de COT. Con respecto a la remoción de turbiedad, la figura 2#c muestra que la interacción entre las variables número de placas y tiempo de reacción y número de placas e intensidad de corriente ejercen el mayor efecto sobre esta variable de respuesta.

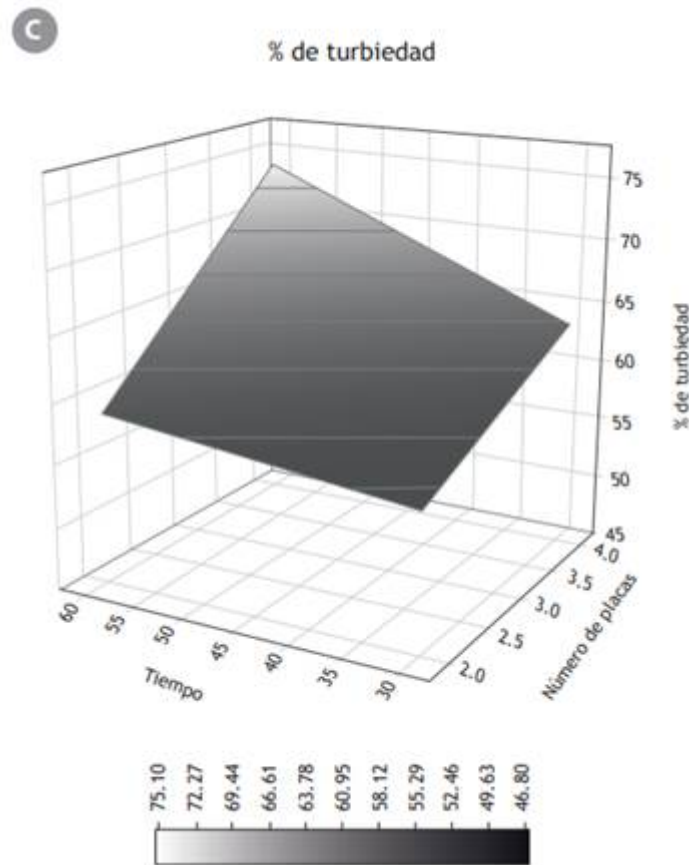
En otras palabras, para mayor número de placas o electrodos, mayor intensidad de corriente y mayor tiempo de reacción se puede esperar mayor remoción de turbiedad en las aguas residuales del proceso de depilado en curtiembres, por el uso de electrodos de grafito. En los diagramas de Pareto: A corresponde al número de placas; B, la intensidad de corriente; C, al tiempo de reacción, y las combinaciones de letras corresponden a la interacción de variables. Para el caso de la turbiedad, el ANOVA señala que todas las variables tienen efecto sobre el proceso, y el diagrama de Pareto permite establecer que la interacción de las variables es la verdadera razón por la cual la remoción de turbiedad varía. Con el objeto de presentar los resultados de manera gráfica, en la figura 3 aparecen las superficies de respuesta para número de placas y tiempo de reacción frente al porcentaje de remoción.



**Figura 3**  
Superficies de respuesta para las variables analizadas  
Elaboración propia.



**Figura 3**  
Superficies de respuesta para las variables analizadas  
Elaboración propia.



**Figura 3.**  
Superficies de respuesta para las variables analizadas  
Elaboración propia

En la figura 3-a, se observa que la remoción de sulfuros se incrementa al aumentar el número de placas y el tiempo de reacción. El aumento del número de placas indica mayor área de contacto para la reacción y, por lo tanto, mayor eficiencia para una misma intensidad de corriente aplicada. La misma tendencia se observa en los gráficos b y c. De la figura 3, se puede inferir que el área de contacto es una variable de gran importancia en el proceso de remoción de COT, en especial cuando hay bajos tiempos de reacción, situación en la cual se observa un mayor incremento en la remoción de este parámetro de calidad del agua. A partir de los valores de los factores para los cuales se obtuvieron los mayores porcentajes de remoción, se determinó el costo del tratamiento. La tabla 3 contiene los resultados de este análisis. El costo fue calculado por cada  $m^3$  de agua residual tratada, así como para cada kg de sulfuro y de COT removido. La densidad de corriente aplicada en el ensayo de mayor efectividad fue de  $107,14 A/m^2$ , valor que se encuentra en el rango aplicado en otras investigaciones en las cuales se empleó la electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales [18], [19], [20].

Variable	Unidades	Valor
Volumen de mezcla reactiva	L	2
Sulfuros iniciales	mg/L	2857,14
COT inicial	mg/L	839,45
Turbiedad inicial	UNT	2115
Sulfuros finales	mg/L	1666,6
COT final	mg/L	539,56
Turbiedad final	mg/L	530
Porcentaje de remoción sulfuros	%	41,67
Masa de Sulfuros removida	mg	2381,08
Porcentaje de remoción COT	%	35,72
Masa de COT removido	mg	599,78
Ancho de cada electrodo	m	0,1
Altura de cada electrodo sumergido	m	0,28
Número de electrodos	Und	4
Área total sumergida	m <sup>2</sup>	0,224
Intensidad de corriente aplicada	A	24
Densidad de corriente aplicada	A/m <sup>2</sup>	107,14
Voltaje aplicado	V	12
Potencia aplicada	W	288
Tiempo de reacción	horas	1
Potencia consumida en el proceso	kWh	0,288
Valor del kWh	\$/kWh	400
Costo del tratamiento	\$	115,2
Costo unitario del proceso	\$/m <sup>3</sup>	57 600
Costo por remoción de sulfuros	\$/kg Sulfuro removido	48 381,41
Costo por remoción de COT	\$/kg COT removido	192070,43

**Tabla 4**

Análisis de costos fijos de tratamiento del agua por electrocoagulación con electrodos de grafito

Elaboración propia.

En la tabla 4 se observa que el costo de tratamiento por cada 1 m<sup>3</sup> de agua asciende a 57 600 COP, y la remoción de cada kg de sulfuro y COT presentes en el agua residual alcanza valores de 48 381,41 COP y 192 070,43 COP, respectivamente. El costo del proceso evaluado resulta mayor en comparación con las técnicas tradicionales para el tratamiento de aguas residuales de depilado en curtiembres el cual oscila entre 11 600 y 31 000 COP [21], pero se debe considerar la reducción de insumos químicos que dan lugar a iones residuales en el agua y, por lo tanto, a contaminación. Además, el uso de electrodos grafito incrementa el costo de inversión pero reduce el costo de operación o costo fijo, puesto que el grafito, en teoría, es inerte y no se presenta desgaste de los ánodos en el proceso electroquímico o, si lo hay, es bajo.

#### IV. CONCLUSIONES

Los resultados permitieron determinar que por medio de electrocoagulación con electrodos de grafito se logró alcanzar el 41,46 % de remoción de sulfuros y 75,05 % de remoción de turbiedad, valores que resultan significativos si se tiene

en cuenta que el tiempo de reacción fue de una hora. La reducción de turbiedad hace que se reduzca la dosis de agente coagulante en tratamientos posteriores para la remoción de sólidos en el agua, con lo cual se reduce la concentración de iones residuales en el agua residual tratada. La remoción de COT no alcanzó valores significativos, posiblemente por el tamaño de las moléculas de materia orgánica presentes en el agua residual del proceso de pelambre, de modo que no se logró un mayor grado de mineralización y, por lo tanto, hubo una baja reducción del COT.

Se requiere mayor tiempo de reacción para verificar el efecto de esta variable sobre la materia orgánica en el agua. La técnica evaluada presenta como ventaja principal el uso de electrodos inertes, los cuales no se desgastan, o se desgastan muy poco, y no dan lugar a la formación iones metálicos disueltos en el agua que afecten la calidad del efluente del proceso. La eliminación de turbiedad, sulfuros y COT representa una disminución de la carga contaminante aportada al cuerpo de agua receptor, hecho que permite al cuerpo de agua autodepurarse y mantener la potencialidad de uso del recurso aguas abajo de los puntos de descarga. Por otra parte, la facilidad de operación de los sistemas de electrocoagulación permite a los empresarios realizar el tratamiento del agua de una manera sencilla que aporta a la mitigación de los impactos ambientales por la descarga de aguas residuales del sector curtidos al cuerpo de agua receptor, en este caso, el río Bogotá.

## REFERENCIAS

- [1] S. Elabbas, N. Ouazzani, L. Mandi *et al.*, "Treatment of highly concentrated tannery wastewater using electrocoagulation: Influence of the quality of aluminium used for the electrode," *J. Hazard. Mater.*, vol. 319, pp. 69-77, 2016, doi: 10.1016/j.jhazmat.2015.12.067.
- [2] A. H. Vazifehkhoran, S. G. Shin, and J. M. Triolo, "Use of tannery wastewater as an alternative substrate and a pre-treatment medium for biogas production," *Bioresour. Technol.*, vol. 258, feb., pp. 64-69, 2018, doi: 10.1016/j.biortech.2018.02.116.
- [3] S. Korpe, B. Bethi, S. H. Sonawane, and K. V. Jayakumar, "Tannery wastewater treatment by cavitation combined with advanced oxidation process (AOP)," *Ultrason. Sonochem.*, vol. 59, n.o jun. 2018, p. 104723, 2019, doi: 10.1016/j.ultsonch.2019.104723.
- [4] S. Haydar and J. A. Aziz, "Coagulation-flocculation studies of tannery wastewater using combination of alum with cationic and anionic polymers," *J. Hazard. Mater.*, vol. 168, n.o 2-3, pp. 1035-1040, 2009, doi: 10.1016/j.jhazmat.2009.02.140.
- [5] M. A. Hashem, M. S. Nur-A-Tomal, and S. A. Bushra, "Oxidation-coagulation-filtration processes for the reduction of sulfide from the hair burning liming wastewater in tannery," *J. Clean. Prod.*, vol. 127, pp. 339-342, 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.03.159.
- [6] S. Goswami and D. Mazumder, "Comparative study between activated sludge process (ASP) and moving bed bioreactor (MBBR) for treating composite chrome tannery wastewater," *Mater. Today Proc.*, vol. 3, n.o 10, pp. 3337-3342, 2016, doi: 10.1016/j.matpr.2016.10.015.
- [7] G. Lofrano, S. Meriç, G. E. Zengin, and D. Orhon, "Chemical and biological treatment technologies for leather tannery chemicals and wastewaters: A



- review,” *Sci. Total Environ.*, vol. 461-462, pp. 265- 281, 2013, doi: 10.1016/j.scitotenv.2013.05.004.
- J. Wei Feng, Y. Bing Sun, Z. Zheng, J. Biao Zhang, S. Li y Y. Chun Tian, “Treatment of tannery wastewater by electrocoagulation,” *J. Environ. Sci.*, vol. 19, n.o 12, pp. 1409-1415, 2007, doi: 10.1016/S1001-0742(07)60230-7.
- [9] D. T. Moussa, M. H. El-Naas, M. Nasser, and M. J. Al-Marri, “A comprehensive review of electro- coagulation for water treatment: Potentials and challenges,” *J. Environ. Manage.*, vol. 186, pp. 24-41, 2017, doi: 10.1016/j.jenvman.2016.10.032.
- [10] E. Ü. Deveci, C. Akarsu, Ç. Gönen, and Y. Özay, “Enhancing treatability of tannery wastewater by integrated process of electrocoagulation and fungal via using RSM in an economic perspective,” *Process Biochem.*, vol. 84, pp. 124-133, sep. 2019, doi: 10.1016/j.procbio.2019.06.016.
- [11] S. Garcia-Segura, M. M. S. G. Eiband, J. V. de Melo, and C. A. Martínez-Huitle, “Electrocoagulation and advanced electrocoagulation processes: A general review about the fundamentals, emerging applica- tions and its association with other technologies,” *J. Electroanal. Chem.*, vol. 801, nov. 2016, pp. 267- 299, 2017, doi: 10.1016/j.jelechem.2017.07.047.
- [12] V. Khandegar and A. K. Saroha, “Electrocoagulation for the treatment of textile industry effluent — A review,” *J. Environ. Manage.*, vol. 128, pp. 949- 963, 2013, doi: 10.1016/j.jenvman.2013.06.043.
- [13] D. Sbizzaro Filho, G. B. Bota, R. B. Borri, and F. J. C. Teran, “Electrocoagulation/ flotation followed by fluidized bed anaerobic reactor applied to tannery effluent treatment,” *Desalin. Water Treat.*, vol. 37, n.o 1-3, pp. 359-363, 2012, doi: 10.1080
- [14] C. Comninellis, “Electrocatalysis in the electroche- mical conversion/combustion of organic pollutants for waste water treatment,” *Electrochim. Acta*, vol. 39, n.o 11-12, pp. 1857-1862, ago. 1994, doi: 10.1016/0013-4686(94)85175-1.
- [15] B. Marselli, J. Garcia-Gomez, P.-A. Michaud y M. A. Rodrigo, and C. Comninellis, “Electrogeneration of Hydroxyl Radicals on Boron-Doped Diamond Electrodes,” *J. Electrochem. Soc.*, vol. 150, n.o 3, p. D79, feb. 2003, doi: 10.1149/1.1553790.
- [16] R. de la Vara Salazar y H. Gutiérrez Pulido, *Análisis y diseño de experimentos*. México, McGraw-Hill, 2008.
- [17] E. A. Clesceri LS, Rice EW, Baird RB, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 22.a ed. Washington: American Public Health Association, 2012.
- [18] R. Ramesh Babu, N. Bhadrinarayana, y K. Sheriff a Begum, “Treatment of tannery wastewater by electrocoagulation,” *J. Univ. Chem. Technol. Metall.*, vol. 42, n.o 2, pp. 201-206, abr. 2007.
- [19] C. Sivodia and A. Sinha, “Assessment of graphite electrode on the removal of anticancer drug cytarabine via indirect electrochemical oxidation process: Kinetics & pathway study,” *Chemosphere*, vol. 243, p. 125456, 2020, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.125456.
- [20] C. Ricordel and H. Djelal, “Treatment of landfill leachate with high proportion of refractory materials by electrocoagulation: System perfor- mances and sludge settling characteristics,” *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 2, n.o 3, pp. 1551-1557, 2014, doi: 10.1016/j.jece.2014.06.014.
- [21] C. Di Iaconi, G. Del Moro, M. De Sanctis, and S. Rossetti, “A chemically enhanced biological process for lowering operative costs and solid residues of industrial

recalcitrant wastewater treatment,” *Water Res.*, vol. 44, n.o 12, pp. 3635-3644, 2010, doi: 10.1016/j.watres.2010.04.017.