

# Evaluación de la eficiencia de un sistema de electrocoagulación en los vertimientos de curtiembres en el sector de Villapinzón (Cundinamarca)

**Evaluation of the Efficiency of an Electrocoagulation System of Tannery Industry Effluents in Villapinzón (Cundinamarca)**

---

**Diana Lucía Cristancho Montenegro**

Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas, Departamento de Ingeniería Ambiental,  
Universidad Central, Colombia  
<https://orcid.org/0000-0001-7417-2583>  
dcristanchom@ucentral.edu.co

**Lina María Pinto Hernández**

Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas, Departamento de Ingeniería Ambiental,  
Universidad Central, Colombia  
<https://orcid.org/0000-0001-8199-3670>  
lpintoh@ucentral.edu.co

**Jefersson Stiven Tique Hilarión**

Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas, Departamento de Ingeniería Ambiental,  
Universidad Central, Colombia  
<https://orcid.org/0000-0002-3596-570>  
jtiqueh@ucentral.edu.co

---

**Fecha de recepción: 7 de noviembre de 2019**  
**Fecha de aceptación: 23 de diciembre de 2019**

---

**Sugerencia de citación:** Cristancho-Montenegro, D. L., Pinto-Hernández, L. M. y Tique-Hilarión, J. S. (2019). Evaluación de la eficiencia de un sistema de electrocoagulación en los vertimientos de curtiembres en el sector de Villapinzón (Cundinamarca). *Mutis*, 9(2), 34-48.  
doi: 10.21789/22561498.1590

---

## RESUMEN

Este artículo presenta el análisis del vertimiento de curtiembres en Villapinzón (Cundinamarca, Colombia) y propone un sistema de electrocoagulación para la minimización de contaminantes (principalmente metales pesados) vertidos directamente a los cuerpos de agua. Las descargas directas al río Bogotá (tramo Villapinzón-Chocontá) sin previo tratamiento generan afectaciones en la calidad de los cuerpos de agua, además de afectar la salud de la población. Por ende, para este estudio se diagnosticó el estado actual de los vertimientos en el río Bogotá. Adicionalmente, se llevó a cabo una búsqueda de información acerca del proceso de electrocoagulación, la cual sirvió de base para el diseño e implementación a escala laboratorio con las muestras del vertimiento de una curtiembre del sector a analizar. Después de la implementación del sistema se obtienen los siguientes porcentajes de remoción: Cr (52,8 %), DQO (36 %), nitritos (99,6 %), nitratos (99,4 %), sulfatos (92,9 %) y fosfatos (99,1 %). Estos parámetros fueron evaluados de acuerdo con la normativa vigente (Resolución 0631 de 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible) y el acuerdo 08 del 2004 de la CAR, donde 6 de 10 parámetros se ajustaron a la normativa. De esta manera, se concluye que el sistema de electrocoagulación es una alternativa viable como tratamiento no convencional para el tratamiento de aguas residuales industriales de curtiembre que contribuye a la disminución de los impactos generados a la cuenca alta del río Bogotá.

**Palabras clave:** agua residual industrial, río Bogotá, remoción de contaminantes, metales pesados, eficiencia, viabilidad.

## ABSTRACT

This article presents the analysis of the shedding of tanneries in Villapinzón (Cundinamarca, Colombia) and proposes an electrocoagulation system for the minimization of pollutants (mainly heavy metals) discharged directly to bodies of water. Direct discharges to the Bogotá River (Villapinzón-Chocontá section) without prior treatment generate effects on the quality of water bodies, in addition to affecting the health of the population. Therefore, for this study, the current state of the discharges in the Bogotá River was diagnosed. Additionally, an information search was conducted on the electrocoagulation process. This search served as the basis for the design and implementation of the laboratory-scale electrocoagulator model with the samples of the shedding of a tannery in the studied sector. After the implementation of the system, the following removal percentages are obtained: Cr (52.8%), COD (36%), nitrites (99.6%), nitrates (99.4%), sulfates (92.9%) and phosphates (99.1%). These parameters were evaluated in accordance with current regulations (Resolution 0631 of 2015 of the Ministry of Environment and Sustainable Development) and agreement 08 of 2004 by the CAR, where 6 out of 10 parameters were adjusted to the regulations. Thus, it is concluded that the electrocoagulation system is a viable alternative as an unconventional treatment for the treatment of tannery industrial wastewater that contributes to the reduction of the impacts generated to the upper Bogotá River basin.

**Keywords:** Industrial wastewater, Bogotá River, contaminants removal, heavy metals, efficiency, viability.

## INTRODUCCIÓN

El río Bogotá ha sido catalogado en la última década como uno de los ríos más contaminados del mundo. Sus aguas, las cuales reportan la presencia de metales pesados y otros elementos tóxicos, son utilizadas para el consumo humano y actividades agropecuarias. Durante más de treinta años, la cuenca del río Bogotá no recibió atención alguna por parte del Estado ni de la población. A partir de la sentencia del río Bogotá se proyecta la recuperación de la cuenca a través de una gestión integral que busca el mejoramiento de la calidad de los ecosistemas y sus habitantes, teniendo en cuenta sus altos niveles de contaminación, ocasionados por los vertimientos de aguas residuales domésticas e industriales y las malas prácticas por parte de la comunidad e industrias aledañas.

A pocos kilómetros del nacimiento del río Bogotá se encuentra el municipio de Villapinzón, el cual basa su economía en la industria de las curtiembres. Esta industria genera vertimientos directos con alta carga contaminante al cauce del río, por lo que la calidad del mismo se ve altamente deteriorada. El problema radica en que al crearse las industrias no se contempla el tratamiento de las aguas residuales industriales (ARI) provenientes de las curtiembres, en las que los mayores contaminantes reportados son los metales pesados (Cr, es el más abundante).

Teniendo en cuenta que el índice de calidad del río pasa de tipo 1 (muy bueno) en su nacimiento a tipo 3 (regular) en el tramo Villapinzón-Chocontá (Agudelo, 2018), se plantea un sistema de electrocoagulación para el tratamiento de vertimientos en la industria de las curtiembres. La electrocoagulación es un método electroquímico no convencional empleado para el tratamiento de aguas residuales con amplio rango de contaminantes (en especial de metales pesados). A través de este método se desestabilizan los contaminantes en un medio acuoso haciendo pasar una corriente eléctrica a través del mismo, lo que permite alcanzar altos niveles de remoción.

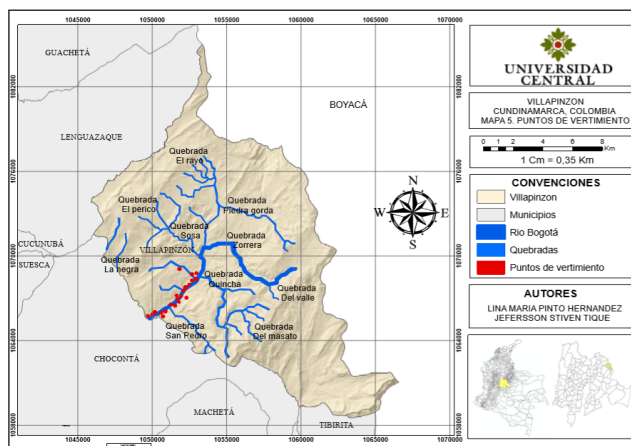
Por lo anterior, esta investigación busca analizar el vertimiento de curtiembres en Villapinzón (Cundinamarca) y proponer un sistema de electrocoagulación para minimizar los contaminantes –principalmente metales pesados– vertidos directamente a los cuerpos de agua de esta zona.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Vertimientos

Teniendo en la cuenta la sentencia de la Corporación Autónoma Regional (CAR) sobre el río Bogotá, la línea base de carga contaminante para el tramo 2 (Villapinzón-Chocontá) en la actividad del curtido para el parámetro DBO es de 49,97 t/año y para el SST es de 115,33 t/año (CAR, 2014). Para 2017, se presentó una carga contaminante de SST de 113,12 t/año y de DBO de 161,51 t/año (ORARBO, 2017). En 2018, los procesos para permisos de vertimientos en este tramo solicitados ante la autoridad ambiental sumaron un total de 220 (CAR, 2018). De otro lado, se evidencia que existen 120 curtiembres registradas, de las cuales 35 tienen permiso de vertimientos al cauce del río Bogotá y sus afluentes (CAR, 2019). En la figura 1 se puede apreciar la ubicación de los vertimientos ocasionados por curtiembres, observando que los vertimientos se encuentran en cauce del río Bogotá y en menor dimensión en la quebrada Quincha. En su mayoría, los vertimientos se observan en la salida de Villapinzón sentido sur-oeste, donde mayormente se encuentra ubicada la industria de las curtiembres.

Figura 1: Mapa de vertimientos por curtiembres en Villapinzón



Fuente: autores con información de CAR (2014).

### Electrocoagulación

La electrocoagulación es una tecnología emergente que se presenta como alternativa para el tratamiento de aguas residuales y que cuenta con un alto

potencial para la remoción de diversos contaminantes de aguas residuales provenientes de diferentes fuentes (Restrepo & Arango, 2006). Este es un proceso electroquímico bastante utilizado en el tratamiento de aguas residuales con alto porcentaje de metales pesados, por medio del cual se desestabilizan contaminantes suspendidos o disueltos en un medio acuoso haciendo pasar una corriente eléctrica a través del mismo. En el proceso se emplean una gran variedad de ánodos y cátodos geométricos (generalmente de hierro o aluminio) por los cuales fluye la corriente necesaria para que estos comienzan a reaccionar con el medio de manera análoga a un proceso de corrosión (Ojeda-Armaignac & Hing-Cortón, 2010).

En general, se evidencia el uso de acrílico para la construcción de la celda, el cual es un material aislante que permite visualizar las reacciones generadas por la electrocoagulación. Además, se empleó un reactor de tipo Batch donde se lleva a cabo el proceso químico, en el cual la mezcla se homogeneiza constantemente por medio de un agitador magnético, los electrodos se disponen de forma paralela conectados en serie a una fuente de voltaje (Camacho & López, 2015) y, a su vez, estos electrodos son divididos en ánodos y cátodos por los cuales circula corriente eléctrica para llevar a cabo la reacción química (el arreglo de los electrodos es de forma monopolar [polaridad intercalada]). Por último, una fuente de alimentación de corriente directa suministra la energía eléctrica que promueve la electrocoagulación (Beltrán, 2015).

Considerando que el sistema de electrocoagulación requiere una fuente de poder, se consultó que la disposición de los electrodos tiene mayor efectividad con una conexión monopolar en paralelo, donde la corriente eléctrica se reparte entre todos los electrodos (Aguilar-Ascón, 2015). Al realizar la revisión de estudios previos sobre el tema, se encontraron valores de entre 8 y 63 V y de 3 a 25 A, denotando el uso de una fuente de poder directa.

Para la selección de los electrodos se consultó que en los procesos de electrocoagulación se han usado gran variedad de materiales para los electrodos, dentro de los que se encuentran hierro, cobre, aluminio, acero inoxidable, zinc y grafito, siendo el hierro y el aluminio los materiales más utilizados, según la información disponible respecto a su uso (Mendoza & Bueno, 2017).

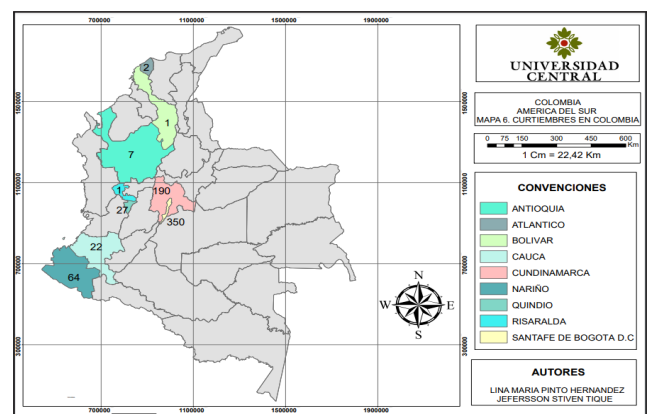
El diseño del reactor tipo Batch permite definir la zona de reacción donde se da la desestabilización de las partículas y el proceso de coagulación, así como visualizar la zona de sedimentación. Los lodos que se forman se depositan en la parte superior de la celda cuando su densidad es baja y se precipitaron cuando la densidad alcanza niveles altos. El uso de este reactor a nivel laboratorio es conveniente debido a que permite estudiar el proceso y los parámetros *in situ* (Ruíz & Giraldo, 2007).

## Curtiembres

El curtido es el proceso de transformación de pieles de animales en cuero, como resultado de la estabilización de las fibras de colágeno de la piel con agentes curtientes, mediante la formación de complejos tipo quelatos. Allí se llevan a cabo 4 procesos como lo son ribera, curtido, acabado en húmedo, acabado en seco, produciendo vertimientos en cada uno de ellos con alta carga contaminante, todo esto con el fin de evitar su descomposición y facilitar su uso para la fabricación de productos de calzado, marroquinería, tabarbería, tapizados, entre otros (Alcaldía de Bogotá, 2015, p. 9).

En Colombia, la industria de las curtiembres hace parte de un mercado no muy amplio en todas las regiones, es decir, se presenta en determinados departamentos y municipios del país. La figura 2 presenta la distribución de la industria de las curtiembres en Colombia.

Figura 2. Número de curtiembres en Colombia por departamento



Fuente: autores con base en Martínez y Romero (2018).

Con respecto a la industria de las curtiembres en Colombia, el departamento de Cundinamarca y la ciudad Bogotá concentran 80 % del total de las curtiembres existentes en el país, lo cual equivale a una producción promedio de 103.000 cueros que, a su vez, representa el 38 % de la producción total nacional. Los municipios de Villapinzón y Chocontá (Cundinamarca) y el barrio San Benito, en Bogotá, son las zonas que más concentran el desarrollo de esta actividad industrial.

El municipio de Villapinzón se caracteriza por ser una de las principales fuentes de la industria de curtiembres en Colombia, donde esta actividad se ha llevado a cabo desde la época colonial y se ha caracterizado por ser un trabajo cultural tradicional transmitido de generación en generación, proveyendo a este municipio con cerca de 700 empleos directos y 4.000 empleos entre directos e indirectos (Ledezma, López, Ramírez, & Triana, 2017). Sin embargo, esta industria genera una gran problemática en la actualidad al ser la principal fuente de contaminación del río Bogotá, uno de los más contaminados a nivel mundial. Esta situación se debe a que tanto el municipio como las curtiembres vierten en el río Bogotá sus residuos sin la realización de un tratamiento efectivo, generando vertimientos con amplio rango de contaminantes tóxicos (especialmente metales pesados) con grandes consecuencias para las fuentes hídricas, teniendo en cuenta que su remoción es bastante compleja y requiere de grandes inversiones. El río Bogotá en Villapinzón se encuentra localizado a 40 km de Bogotá y a 6 km de su nacimiento, es decir, a pocos kilómetros de su nacimiento el río ya se ve afectado de forma importante por la industria de las curtiembres y su gran cantidad de vertimientos (Escobar, Ubaque, & Bohórquez, 2012).

### Muestreo (caso de estudio)

Para la toma de muestras de la curtiembre se realizó una colaboración con una de las curtiembres registradas ante la CAR que opera en la zona de estudio del municipio de Villapinzón, la cual, además, genera vertimientos al río Bogotá. El muestreo se realizó en el vertimiento final tomando una cantidad aproximada de 7 L. Las tablas 1-3 reportan los datos más relevantes

**Tabla 1.** Cronograma recolección de muestras

DÍA	HORA	LUGAR	PARÁMETROS
20/04/2019	3:00 p.m.	Villapinzón, Cundinamarca	-pH: 7,84 -Insitu: *Conductividad: No detectable por el multiparametro.

*Nota:* La toma de muestra se realizó una sola vez, teniendo en cuenta las restricciones de la empresa y las limitaciones frente al uso de reactivos en el laboratorio de la Universidad. Fuente: autores.

DÍAS	LUGAR	PARÁMETROS
21-25/04/2019	Laboratorio de aguas, Universidad Central	Físicos: Color real, color aparente, conductividad, turbidez
		Químicos: PH, temperatura, tren de sólidos, oxígeno disuelto, nitritos, nitratos, fosfatos, sulfatos, plomo, cromo, zinc, cadmio
		Biológicos: DQO, DBO
		Bacteriológicos: Coliformes

Fuente: autores.

DÍAS	LUGAR	PARÁMETROS
20/04/2019 hasta 03/05/2019	Laboratorio de aguas, Universidad Central	Físicos: Color real, color aparente, conductividad, turbidez
		Químicos: pH, temperatura, tren de sólidos, oxígeno disuelto, nitritos, nitratos, fosfatos, sulfatos, plomo, cromo, zinc, cadmio
		Biológicos: DQO, DBO
		Bacteriológicos: Coliformes

Fuente: autores.

### Diseño y construcción del sistema de electrocoagulación a escala laboratorio

Para el diseño y la construcción del sistema de electrocoagulación a escala laboratorio se realizó una comparación de investigaciones que dio como resultado la presentación del diseño más viable del sistema a partir de los siguientes parámetros: dimensiones de la celda, materiales de la celda y de los electrodos y equipos necesarios para su correcto funcionamiento.

### Construcción de la celda del reactor para el sistema de electrocoagulación

Para la fabricación de la celda se usó un reactor tipo Batch a escala laboratorio con capacidad de 5 L (figura 3) y se empleó acrílico como material aislante, teniendo en cuenta su resistencia y que este material

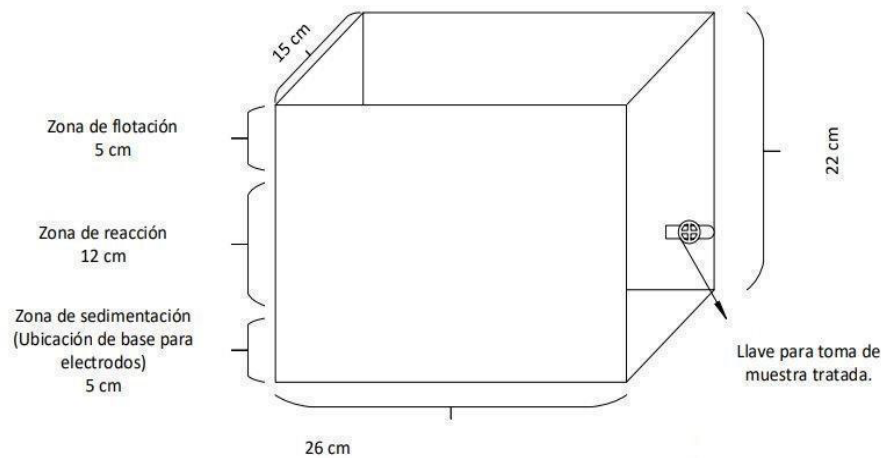
permite apreciar todos los procesos de la electrocoagulación. Además, se usaron soportes en acrílico con separación de 5 mm para la correcta ubicación de las láminas (figura 4). La celda tiene las siguientes dimensiones: A = 15 cm, L = 26 cm y H = 22 cm, y fue diseñada con un criterio de 3 zonas:

- Zona de flotación superior: donde se acumulan los lodos generados.
- Zona de reacción: donde se ubican sumergidos los electrodos y ocurre el proceso de electrocoagulación.

- Zona de sedimentación: en esta zona se precipitan los sólidos sedimentables y también se ubica la base de los electrodos.

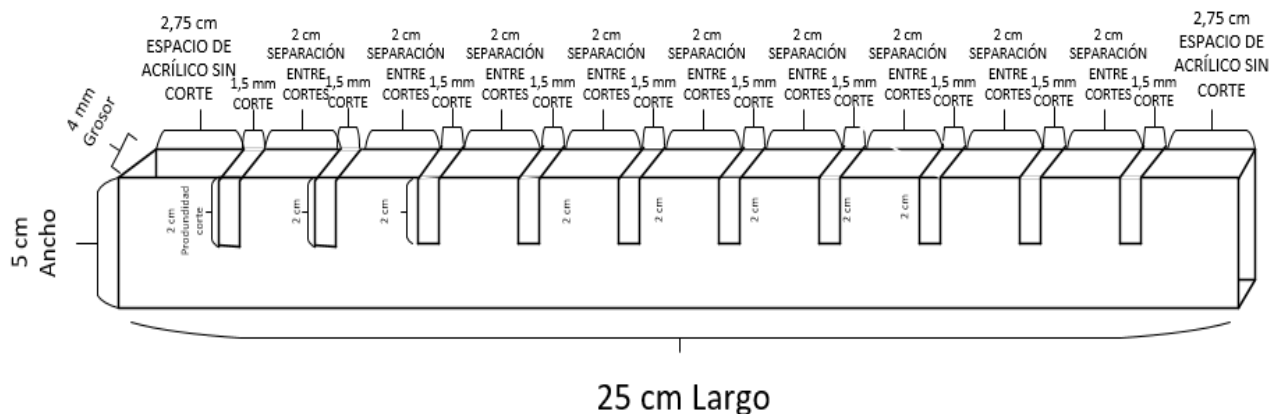
Finalmente, se instaló una llave en una de las caras de la celda a la altura de la zona de reacción para la toma de muestras en cada ensayo y su posterior caracterización y posible evacuación dentro del recipiente de manera segura.

Figura 3. Diseño de celda del sistema de electrocoagulación



Fuente: autores.

Figura 4. Diseño base de electrodos

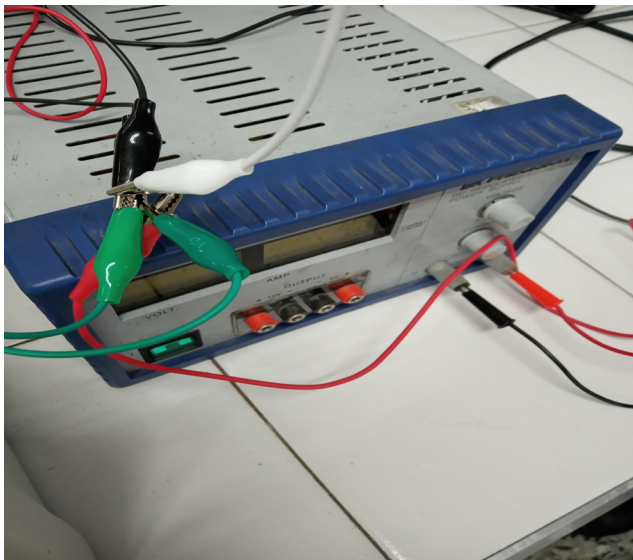


Fuente: autores.

### Sistema eléctrico para el sistema de electrocoagulación

La fuente de poder permite regular la cantidad de corriente suministrada a la celda del sistema de electrocoagulación en cuanto a amperaje y voltaje se refiere. Para el suministro de energía continua a los electrodos se emplearon cables de uso eléctrico y pinzas (cocodrilos) para la conexión de la fuente a las láminas (figura 5). Además, se utilizó una placa magnética para homogeneizar la muestra y ser precursor para las reacciones ocurridas durante el proceso.

Figura 5. Sistema eléctrico



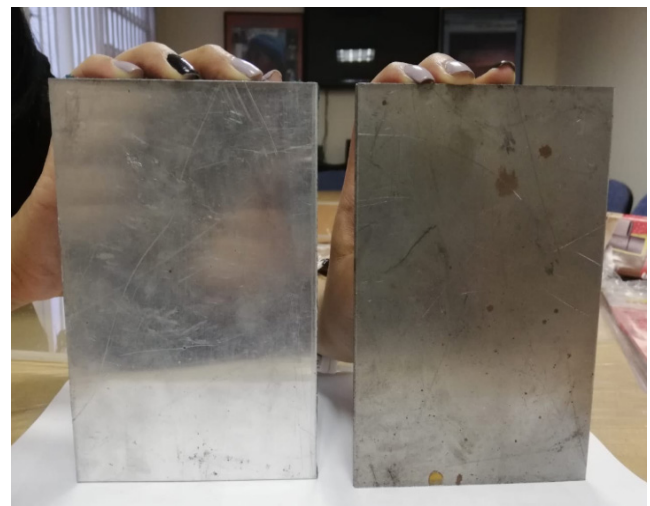
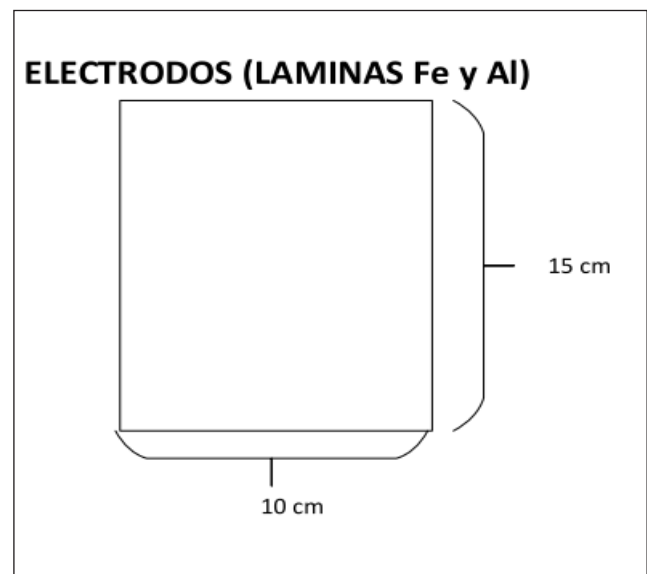
Fuente: autores.

### Sistema de electrodos para el sistema de electrocoagulación

Al evaluar los artículos de investigación consultados se encuentra que los materiales de electrodos más utilizados son el hierro y el aluminio. Para el caso de curtiembres es más viable la utilización de estos, dada su mayor accesibilidad en cuanto a disponibilidad y costos. Adicionalmente, con base en estudios anteriores (Ruíz & Giraldo, 2007; Beltrán, 2015; Camacho & López, 2015), se determinó que los iones de aluminio tienen mejores propiedades adsorbentes y la velocidad de reacción es más rápida que la del hierro, ya

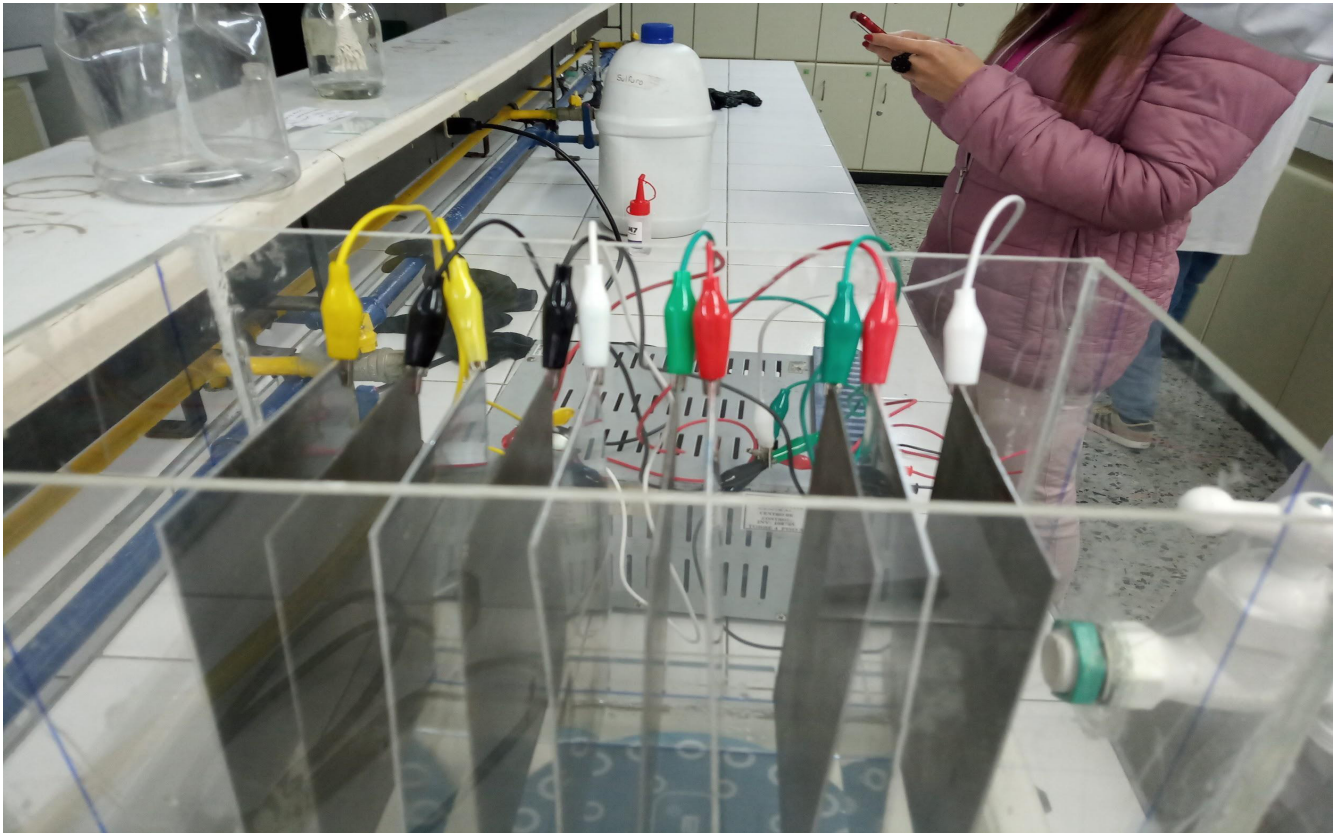
que el aluminio tiene mayor potencial de oxidación. Para este caso, se empleó aluminio con un calibre de 18 pulgadas. Los electrodos utilizados en este experimento tenían una dimensión de 15 cm de largo y 10 de ancho y forma rectangular (figura 6). El montaje cuenta con 10 placas, 5 de hierro (cátodo) y 5 de aluminio (ánodo), cada una con una separación de 2 cm (figura 7).

Figura 6. Sistema de electrodos



Fuente: autores.

**Figura 8.** Sistema de electrodos

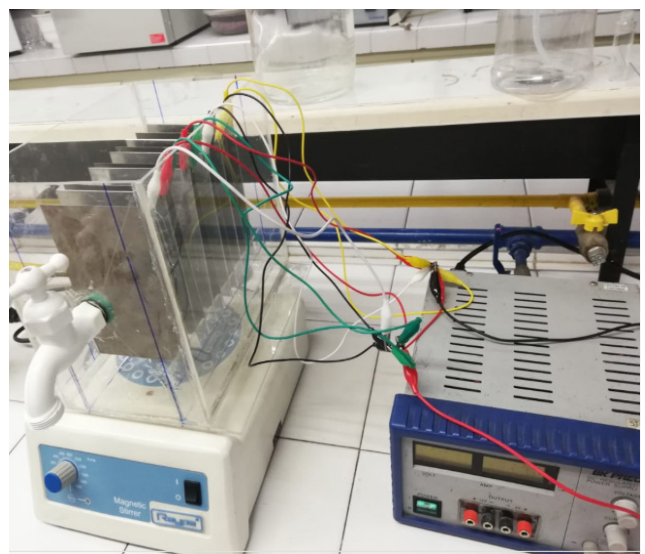


Fuente: autores.

### Implementación del sistema propuesto

Para la implementación del sistema diseñado se ubicó la celda de electrocoagulación en las instalaciones del Laboratorio de Calidad de Aguas de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central. La celda fue dispuesta sobre una placa magnética a 400 rpm con el fin de homogeneizar la muestra (figura 8). Por su parte, el sistema eléctrico fue configurado con un voltaje de 12 V y 5 A constantes.

**Figura 8.** Implementación del sistema propuesto



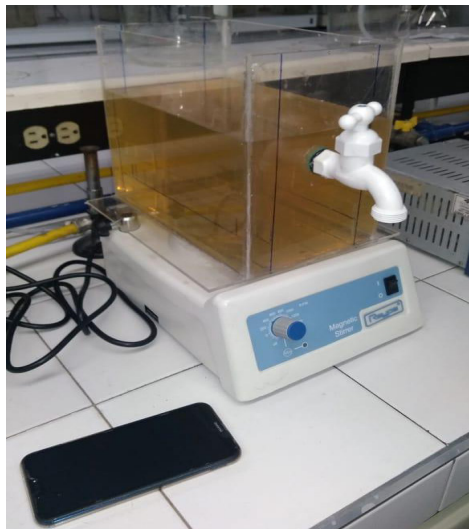
Fuente: autores.



A continuación, se procedió a iniciar las pruebas de funcionamiento del sistema. Inicialmente, se probó con agua de grifo (figura 9) y posteriormente se planteó el sistema completo con el agua problema, como se observa en la figura 10. La duración del experimento fue de 90 minutos, distribuidos entre 20, 40 y 60 min, dejando 30 min para sedimentación, como se observa en la figura 11. Durante este lapso se apreció la variación en los parámetros organolépticos, formación de los flóculos y la rapidez en la sedimentación de los sólidos. Durante el proceso de electrocoagulación se generan compuestos hidrofóbicos que desestabilizan los contaminantes, provocando su floculación.

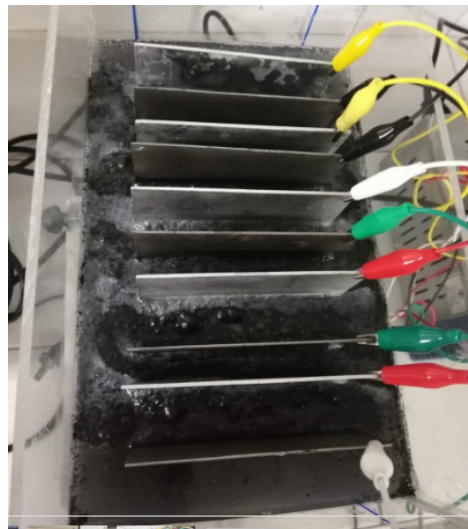
Además, ocurre una disolución anódica donde se liberan elementos que pueden reaccionar con algunos contaminantes en solución, logrando con ello su precipitación. En los electrodos se generan micro burbujas de hidrógeno y oxígeno que chocan y se adhieren a los flóculos, arrastrándolos a la superficie del líquido, donde se forma una espuma que puede ser removida mecánicamente. De igual forma, las burbujas formadas dentro del reactor ayudan a que el aceite y las grasas floten (Cenkin & Belevtsev, 1985). En la figura 12 se muestra el resultado final, es decir, el agua tratada después del sistema de electrocoagulación después del tiempo de residencia.

**Figura 9.** Ensayo con agua de grifo



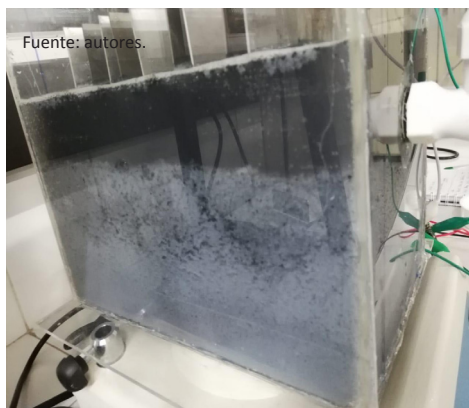
Fuente: autores.

**Figura 10.** Formación de flóculos



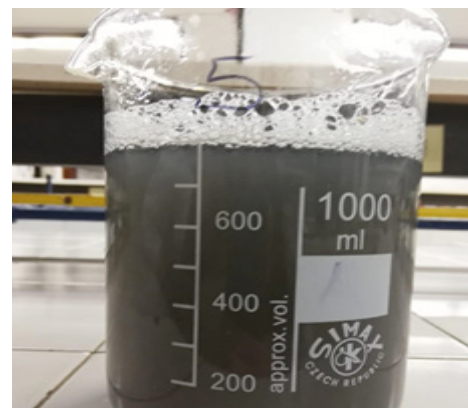
Fuente: autores.

**Figura 11.** Proceso de sedimentación



Fuente: autores.

**Figura 12.** Agua tratada



Fuente: autores.

## RESULTADOS

### Análisis de resultados de los parámetros evaluados

#### Diagnóstico inicial (caracterización antes del tratamiento)

El análisis de los parámetros se realizó a través del protocolo en la Universidad Central, el cual se basa en los métodos analíticos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), donde se evalúan parámetros como: pH, DQO, DBO<sub>5</sub>, SST, sulfatos, nitratos y fosfatos. Para la medición de metales

pesados (Zn, Cr, Cd y Pb) se usó el espectrofotómetro de absorción atómica de los laboratorios de química de la Universidad Central.

#### Comparación con normativa nacional vigente del diagnóstico inicial

Para realizar el diagnóstico inicial del vertimiento se realiza una comparación entre los valores establecidos por la Resolución 0631 del 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y el Acuerdo 08 de 2004 de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. La tabla 4 muestra la verificación del cumplimiento de los datos obtenidos con base en la normativa nacional vigente.

Tabla 4: Comparación de datos obtenidos con la normativa vigente

PARÁMETRO	UNIDAD	DATOS INICIALES	NORMATIVA	CUMPLE O NO
pH	Unidades de pH	8,85	6-9 (Resolución 0631 de 2015)	Cumple
Sólidos totales	mg/L	33030	600 mg/L (Resolución 0631 de 2015)	Incumple
			1000 mg/L Acuerdo 08 (CAR, 2004)	Incumple
Sólidos sedimentables	mg/L	943	2.0 mg/L (Resolución 0631 de 2015)	Incumple
Coliformes Totales	UFC/100ml	5000	5000 Acuerdo 08 (CAR, 2004)	Cumple
DQO	mg/L O <sub>2</sub>	24900	1200 mg/L O <sub>2</sub> (Resolución 0631 de 2015)	Incumple
			400- Acuerdo 08 (CAR, 2004)	
DBO <sub>5</sub>	mg/L	5187,5	600 mg/L O <sub>2</sub> (Resolución 0631 de 2015)	Incumple
			200 Acuerdo 08 (CAR, 2004)	
Sulfato	mg/L	10900	400 Acuerdo 08 (CAR, 2004)	Incumple
Nitrato	mg/L	3930		
Nitrito	mg/L	20.4		
Fosfato	mg/L	6760		
Zinc	mg/L	3.67	25 Acuerdo 08 (CAR, 2004)	Cumple
Cromo total	mg/L	267.8	1.5 mg/L (Resolución 0631 del 2015)	Incumple
			<0,01 Acuerdo 08 (CAR, 2004)	
Cadmio	mg/L	Sin presencia de Cadmio.	0.05 Acuerdo 08 (CAR, 2004)	Cumple

Fuente: autores.

Al realizar el diagnóstico del agua de vertimiento de la curtiembre se evidencia que los parámetros que superan los límites máximos permisibles el vertimiento en aguas superficiales y alcantarillado son: sólidos totales, sólidos sedimentables, DQO, DBO<sub>5</sub>, sulfatos y cromo total. Lo anterior permite determinar que estos niveles son consecuencia de procesos ejecutados durante la operación de curtido, como la separación de pieles, en los cuales se emplean sustancias como cal, sulfuros, formiato, cromo y tintes (anilinas) y se vierten gran cantidad de sólidos provenientes de la separación de la piel del animal, lo que conlleva a la alta concentración de parámetros que impactan negativamente a la calidad del río Bogotá debido a que estas sustancias pueden acelerar procesos como la eutrofización. Sumado a lo anterior, el agua de este río es utilizada en procesos de riego y de abastecimiento de alcantarillado no oficial, situación que conlleva al aumento de enfermedades gastrointestinales en los pobladores de la zona.

### Análisis de resultados del sistema propuesto

Una vez realizado el tratamiento de electrocoagulación del sistema propuesto, se procedió a realizar el análisis del agua tratada haciendo un comparativo de los parámetros del diagnóstico inicial (antes del tratamiento), que posteriormente serán analizados con base a la normativa legal vigente.

### Comparación con normativa nacional vigente del diagnóstico final

Para el análisis de los datos obtenidos en el diagnóstico final del agua tratada por electrocoagulación, se realizó una comparación entre los valores establecidos por la Resolución 0631 del 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y el Acuerdo 08 de 2004 de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. La verificación del cumplimiento de los datos obtenidos se reporta en la tabla 5.

Tabla 5. Comparación de datos obtenidos con la normativa vigente

PARAMETRO	UNIDAD	SIN TRATAMIENTO	CON TRATAMIENTO	NORMA APLICABLE	CUMPLIMIENTO
pH	Unidades de pH	8,85	7,62	6-9 (Resolución 0631 de 2015)	Cumple
Sólidos totales	mg/L	33030	9500	600 (Resolución 0631 de 2015)	Incumple
				1000 Acuerdo 08 (CAR, 2004)	Cumple
Sólidos sedimentables	mL/L	943	34	2.0 mL/L (Resolución 0631 de 2015)	Incumple
Coliformes Totales	UFC/100ml	5000	No hay presencia de coliformes	5000 Acuerdo 08 (CAR, 2004)	Cumple
DQO	mg/L O <sub>2</sub>	24900	9100	1200 (Resolución 0631 de 2015)	Incumple
				400- Acuerdo 08 (CAR, 2004)	Incumple
DBO <sub>5</sub>	mg/L	5187,5	486	600 (Resolución 0631 de 2015)	Cumple
				200 Acuerdo 08 (CAR, 2004)	Incumple
Sulfato	mg/L	10900	770	400 Acuerdo 08 (CAR, 2004)	Incumple
Nitrato	mg/L	3930	23		
Nitrito	mg/L	20.4	0.10		
Fosfato	mg/L	6760	62		
Zinc	mg/L	2,67	8.72	25 Acuerdo 08 (CAR, 2004)	Cumple
Cromo total	mg/L	267,8	126.2	1.5 mg/L 0631 del 2015	Incumple
				<0,01 Acuerdo 08 (CAR, 2004)	Incumple
Cadmio	mg/L	No hay presencia de cadmio	No hay presencia	0.05 Acuerdo 08 (CAR, 2004)	Cumple

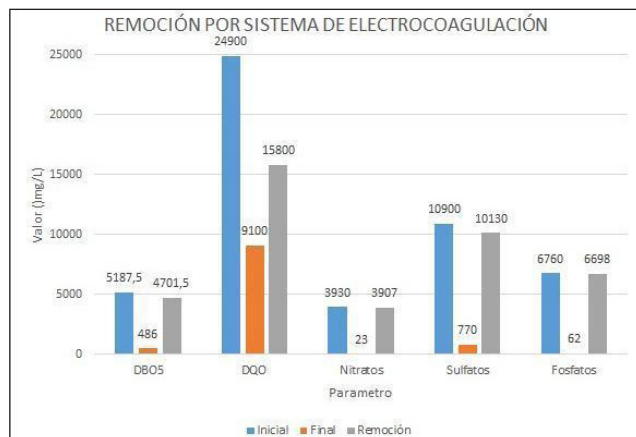
Fuente: autores.

Teniendo en cuenta la información de la tabla 5, se deduce que los niveles de SST, DQO, DBO<sub>5</sub>, sulfato y cromo total, incumplen con la normativa establecida para los vertimientos de aguas residuales industriales, en este caso, de la industria de curtiembres. Esto ocurre como efecto de la alta carga contaminante que se determinó en las pruebas iniciales, teniendo en cuenta que dentro de los procesos desarrollados en la curtiembre no se realiza ningún tipo de tratamiento.

### Eficiencia del sistema

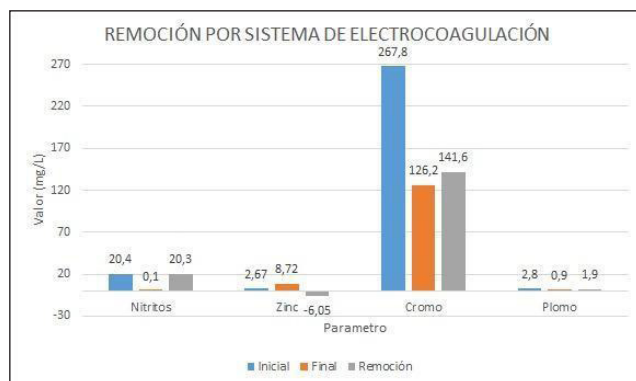
La determinación del porcentaje de remoción se lleva a cabo con base en los parámetros más importantes y el objetivo del tratamiento, es decir, aquellos de más importancia en cuanto a la contaminación del recurso hídrico: DBO, DQO, nitritos, nitratos, sulfatos, fosfatos, zinc, cadmio, cromo y plomo. La remoción de cada parámetro tras analizar el diagnóstico inicial, el diagnóstico final y su reducción, se aprecian en las figuras 13 y 14.

Figura 13. Eficiencia del sistema de electrocoagulación



Fuente: autores.

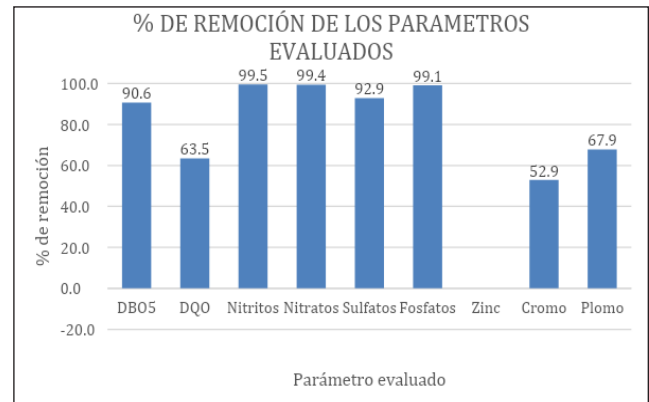
Figura 14. Eficiencia del sistema de electrocoagulación



Fuente: autores.

Teniendo en cuenta las figuras 13 y 14, se obtuvo la figura 15, la cual ilustra los porcentajes de remoción obtenidos en cada parámetro evaluado.

Figura 15. Porcentaje de remoción por parámetro evaluado



Fuente: autores.

## DISCUSIÓN

Considerando la figura 15, se analiza que la alta presencia de aniones nitrito, nitrato, sulfato y fosfatos resulta ser un indicador de vertimientos con una alta carga de materia orgánica en el agua sin tratamiento, generando procesos como la nitrificación y la eutrofización al cuerpo de agua. Esta situación genera incertidumbre, teniendo en cuenta que esta agua sin tratamiento es posteriormente consumida por algunas comunidades cercanas al río Bogotá y utilizada para la hidratación de animales de granja y el riego de cultivos, lo cual puede generar un aumento en la incidencia de enfermedades gastrointestinales; de allí la importancia de la remoción de estos compuestos.

En los 4 parámetros (nitritos, nitratos, sulfatos y fosfatos) se presenta una remoción que supera el 90 %, lo cual indica que el sistema de electrocoagulación es altamente eficiente para la disminución de estos parámetros. Además, sobresale su eficiencia en la remoción en menor magnitud de parámetros tóxicos tales como el cromo y el plomo. En cuanto al DQO y el DBO<sub>5</sub>, se determina que el agua tratada presenta una remoción de 63,4 % de la demanda química de oxígeno, lo que conlleva a concluir la presencia de

materia orgánica biodegradable y no biodegradable en los vertimientos como consecuencia de procesos como el descarte y la separación de pelo y piel.

Los metales pesados en la industria de las curtiembres y sus vertimientos representan un impacto negativo que se ve reflejado en la calidad del hídrico, alteraciones al ecosistema acuático y, por consiguiente, la flora y fauna acuática; de allí la importancia de lograr la disminución de estos compuestos. Por medio del sistema de electrocoagulación se logró una disminución significativa (52,8 %) en los niveles de cromo, el metal pesado más contaminante, y de plomo (67,8 %). Con respecto al zinc, se presentó un aumento de su concentración debido a su naturaleza de material conductor; teniendo en cuenta que el sistema funciona con el paso de corriente continua a través de los ánodos y cátodos, los niveles de zinc pueden llegar a aumentar debido a que las reacciones que se producen al interior del sistema propician un aumento en su concentración.

En la investigación se identificó que los contaminantes más abundantes son el cromo y el plomo. Estos metales, según estudios previos (Molina, Aguilar, & Codovez, 2010), son los que causan mayores repercusiones en la calidad del recurso hídrico y la flora y fauna acuática, gracias a su capacidad de bioacumulación.

De forma indirecta, el ser humano también se ve afectado debido al consumo de productos cárnicos, peces, hortalizas y/o verduras expuestos al agua proveniente del río Bogotá con contenido de contaminantes, principalmente metales pesados. Con respecto al plomo, este tiende a distribuirse en diferentes órganos, tejidos, huesos y dientes, acumulándose con el paso del tiempo y variando de acuerdo con la edad y el nivel de exposición de un individuo (Reyes, Vergara, Torres, Díaz, & Gonzales, 2016). Según la evidencia, el órgano más afectado por este metal pesado es el riñón, debido a que produce cambios en las mitocondrias e inflamación de las células del epitelio, causando serias alteraciones funcionales que provocan aminoaciduria y siendo precursor del síndrome de Fanconi. El cromo también trae serias repercusiones, principalmente por la intolerancia hacia la glucosa; esta es la causa de la aparición de diversos problemas, como los compuestos de Crison cancerígenos (Santoyo, 2009).

Al evaluar los porcentajes de remoción obtenidos tras la caracterización inicial y el análisis del agua tratada después del sistema de electrocoagulación, se obtuvo un alto porcentaje de remoción que puede incrementarse según el diseño del sistema y la disposición de los electrodos. Según la literatura, el uso mixto de electrodos de hierro y aluminio es más eficiente para el tratamiento de vertimientos, así como los tiempos de residencia del agua a tratar; lo anterior, basados en las dimensiones del sistema, teniendo en cuenta que a mayor escala y mayor disposición de electrodos se lograría un aumento en la eficiencia. Sin embargo, se define que el sistema propuesto funciona para esta clase de aguas residuales industriales, siendo una alternativa viable para el tratamiento de estas y para la disminución de impactos generados por esta industria al caudal del río Bogotá. Según datos disponibles en la literatura, la electrocoagulación puede tener un porcentaje de remoción entre 50 y 99 % para contaminantes disueltos en forma emulsionada o no emulsionada y para partículas suspendidas (Apráez & García, 2015). Por su parte, el desarrollo experimental de esta investigación dio como resultado un porcentaje de remoción total de 83 %, el cual se ajusta a los datos reportados en trabajos previos.

## CONCLUSIONES

Para el diseño y construcción del sistema de electrocoagulación a escala laboratorio se realizó una revisión de literatura sobre prototipos realizados e implementados, la cual permitió determinar que el material adecuado para la base exterior y la base de electrodos es el acrílico, gracias a su resistencia dentro de procesos de remoción. De igual manera, este material resultó ser adecuado para la disposición de los electrodos de hierro y aluminio de forma intercalada, debido a que muestra una mayor eficiencia para la minimización o eliminación de metales pesados mediante el tratamiento de electrocoagulación.

Se evaluó el sistema de tratamiento experimental teniendo en cuenta los valores reportados antes y después del tratamiento. Al respecto, se evidenció que el sistema generó una alta eficiencia en la disminución de parámetros como DBO<sub>5</sub>, nitritos, nitratos, sulfatos y fosfatos, permitiendo obtener una remoción superior a 90 % para los parámetros base o de mayor

relevancia por su peligrosidad y contaminación al recurso hídrico. Con los metales pesados se obtuvieron los siguientes resultados en cuanto a remoción: cromo (52,8 %) y plomo (67,8 %), lo cual evidencia que el sistema de electrocoagulación a escala es eficiente, teniendo en cuenta todos los parámetros estudiados, y su implementación es viable, con variaciones en sus dimensiones, cantidad y disposición de electrodos.

Se concluye que el sistema propuesto es eficiente para la minimización de los contaminantes presentes en los vertimientos de curtiembres ubicadas en el municipio de Villapinzón (Cundinamarca) que van a parar al río Bogotá. Este tratamiento podría garantizar los requerimientos de la normatividad vigente colombiana, justificando la minimización en el impacto del recurso hídrico en zonas donde este tipo de actividades tienen una alta presencia y denotando su sencillez, facilidad de montaje y bajo consumo energético, características que hacen que este sistema sea de gran atención para el mejoramiento de los sistemas de tratamiento de aguas residuales industriales existentes.

## REFERENCIAS

- Aguilar-Ascón, E. A. (2015). *Evaluación de la eficiencia de una celda de electrocoagulación a escala laboratorio para el tratamiento de agua* (tesis de maestría). Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima.
- Alcaldía Mayor De Bogotá (2015). *Guía de producción más limpia para el sector curtiembres de Bogotá Enfoque en vertimientos y residuos*. Bogotá: Alcaldía Mayor de Bogotá. <http://www.ambientebogota.gov.co/documents/24732/3987253/Guía+de+producción+más+limpia+para+el+sector+curtiembres+de+Bogotá.+Enfoque+en+vertimientos+y+residuos.pdf>
- Apráez, S., & García, J. (2015). *Análisis de la electrocoagulación como tecnología eficiente para el tratamiento de aguas residuales de una industria textil* (tesis de pregrado). Universidad de La Salle, Bogotá.
- Beltrán, K. E. (2015). *Diseño conceptual y construcción de un electrocoagulador controlado por labview* (tesis de pregrado). Universidad Santo Tomás, Bogotá.
- Camacho, J. M., & López, P. J. (2015). *Evaluación de un proceso de electrocoagulación en un reactor tipo batch para la remoción de cromo hexavalente (Cr6+) con electrodos de aluminio – aluminio y de hierro – aluminio en condiciones de laboratorio* (tesis de pregrado). Universidad Santo Tomás, Bogotá.
- Centkin, V. E., & Belevtsev, A. N. (1985). Electrochemical treatment of industrial wastewater. *Effluent and water treatment journal. Effluent & Water Treatment Journal*, 25, 243-247.
- Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca [CAR] (2014). *Línea Base de carga Contaminante*. <https://www.car.gov.co/uploads/files/5ade351964fd3.pdf>
- Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca [CAR] (2018). *Información General Río Bogotá*. [https://www.car.gov.co/rio\\_bogota](https://www.car.gov.co/rio_bogota)
- Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca [CAR] (31 de enero de 2019). *Curtiembres Río Bogotá* (L. Pinto, & J. Tique, entrevistadores).
- Escobar, A. F., Ubaque, C. A., & Bohórquez, M. L. (2012). Identificación y evaluación de la contaminación del agua por curtiembres en el municipio de Villapinzón. *Tecnura*, 16, 185-194
- Ledesma, D., López, A., Ramírez, S., & Triana, D. (2017). *Calidad de vida y efectos en salud asociados a la generación de olores ofensivos por industrias de curtiembres en los habitantes de dos veredas de Villapinzón durante el 2017-I* (tesis de pregrado). Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales, Bogotá. <https://repository.udca.edu.co/bitstream/11158/865/1/proyecto%20calida%20de%20vida%20final%2012.pdf>
- Martínez, S., & Romero, J. (2018). Revisión del estado actual de la industria de las curtiembres en sus procesos y productos: un análisis de su competitividad. *Revista Facultad de Ciencias Económicas*, xxvi(1)113-124. <https://doi.org/10.18359/rfce.2357>

- Mendoza, L. K., & 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, Bogotá.
- Molina, N., Aguilar, P., & Codovez, C. (2010). Plomo, cromo III y cromo VI y sus efectos sobre la salud humana. *Ciencia & Tecnología para la Salud Visual y Ocular*, 77-88.
- Observatorio Regional Ambiental y de Desarrollo Sostenible del Río Bogotá [ORARBO] (2017). *Información Ambiental para la Gestión Integral de la Cuenca Hídrica del Río Bogotá*. <http://www.orarbo.gov.co/es/indicadores?log=0&id=1407&v=l>
- Observatorio Regional Ambiental y de Desarrollo Sostenible del Río Bogotá [ORARBO] (2018). *Los trabajadores del cuero que le apuestan al resurgir del río Bogotá*. [http://orarbo.gov.co/apc-aa/view.php3?vid=265&cmd\[265\]=x-265-11859](http://orarbo.gov.co/apc-aa/view.php3?vid=265&cmd[265]=x-265-11859)
- Ojeda-Armaignac, E., & Hing-Cortón, R. (2010). Estudio del proceso de electrocoagulación de la vinaza empleando electrodos de aluminio. *Tecnología Química*, 30(2), 5-15.
- Restrepo, A., & Arango, Á. (2006). La Electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas. *Producción+Limpia*, 1(2), 58-72. [http://repository.lasallista.edu.co/dspace/bitstream/10567/514/1/pl\\_v1n2\\_58-77\\_electrocoagulacion.pdf](http://repository.lasallista.edu.co/dspace/bitstream/10567/514/1/pl_v1n2_58-77_electrocoagulacion.pdf)
- Reyes, Y., Vergara, I., Torres, O., Díaz, M., & Gonzáles, E. (2016). Contaminación por metales pesados: implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. *Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo*, 16(2), 66-77. <https://doi.org/10.19053/1900771X.v16.n2.2016.5447>
- Ruíz, A. A., & Giraldo, L. F. (2007). Diseño de una celda de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea. *Revista Universidad EAFIT*, 43(147), 56-67.
- Santoyo, M. (2009). Insuficiencia renal por metales pesados. Efecto del cadmio en la regulación renal del sistema renina-angiotensina y el desarrollo de la hipertensión. *Bioquímica*, 34(1), 55.