

REMOCIÓN POR ELECTROCOAGULACIÓN DE Cr (VI) PRESENTE EN AGUAS RESIDUALES REALES DE UNA INDUSTRIA DE GALVANOPLASTIA

Macías Castro Santiago Eduardor¹, Arriola V. Erasmo², Ardila A. Alba N.^{3}*

^{1,2,3} Grupo de Investigación CAMER, Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, carrera 48 No. 7-151, Medellín, Colombia. CP 4932. Email:¹ santiago_macias64161@elpoli.edu.co, ² erasmoarriola@elpoli.edu.co, ³ anardila@elpoli.edu.co.

RESUMEN

La electrocoagulación es conocida como un proceso alternativo para la remoción de contaminantes en aguas, que por medio de inducción de diferencial de potencial, se genera una reacción de óxido-reducción, que liberan los iones metálicos coagulantes directamente del ánodo de sacrificio. En la presente investigación se muestran los resultados de remoción de cromo hexavalente de un agua residual ideal, a partir de las condiciones de las aguas residuales no domésticas de una planta de galvanizado, ubicada en el área metropolitana del valle de aburra, la cual solo cuenta con un sistema primario de precipitado y retención de lodos disueltos. Se realizó una jornada de aforo y un plan de muestreo, para obtener una muestra compuesta representativa. En la primera parte experimental se utilizó técnicas electroquímicas con las cuales se encontró que 2.4 V es el potencial mínimo requerido para generar la electrodisolución del electrodo de sacrificio (hierro) y, 1 cm de distancia entre electrodos, para la remoción del contaminante. En la segunda parte, el diseño experimental se realizó a varios ensayos, con una celda de electrocoagulación tipo Batch, con dos electrodos de hierro, con 50 mL de agua ideal a 5 ppm de Cr VI, a diferentes pH, conductividad eléctrica y tensión eléctrica. Al evaluar las eficiencias de remoción se obtuvo que las condiciones óptimas para el proceso de remoción de Cr (VI) por electrocoagulación fue con un pH inicial de 4.0 a 30 voltios y una conductividad 800 $\mu\text{s}/\text{cm}$, dando una densidad de corriente de 9.6 mA/cm^2 ; obteniéndose una reducción de 99% del contaminante en 40 minutos, pero se obtuvieron remociones del 90% estableciendo un equilibrio entre el costo económico y la eficiencia de remoción del contaminante a una densidad de corriente entre 2.4 y 3.4 mA/cm^2 . La remoción por electrocoagulación de Cr (VI) presente en aguas residuales reales de la industria de galvanoplastia, es un tratamiento efectivo y económico que permite el cumplimiento de la norma ambiental vigente en cuanto a los límites máximos permisibles para este contaminante, convirtiéndose en una alternativa ambientalmente sostenible para el tratamiento de aguas residuales del sector productivo en mención.

Palabras clave: aguas residuales no domésticas, industria de galvanoplastia, electrocoagulación, cromo (VI).

ABSTRACT

Electrocoagulation is known as an alternative process for the removal of pollutants in water, which by means of induction of potential differential, generates an oxide-reduction reaction, which releases the coagulating metal ions directly from the sacrificial anode. This report shows the results of the removal of hexavalent chromium from an ideal water, from the conditions of the non-domestic wastewater of a galvanizing plant, located in the metropolitan area of the Bored Valley, which only has one primary system of precipitate and retention of dissolved sludge. There was a day of capacity and a sampling plan, to obtain a representative composite sample. In the first experimental part, electrochemical techniques

Working Paper

were used, with which it was found that 2.4 V are the minimum potential required to generate the electro-dissolution of the sacrificial electrode (iron) and, 1 centimeter of distance between electrodes, for the removal of the contaminant. In the second part, the experimental design was carried out in several tests, with a Batch electrocoagulation cell, with two iron electrodes, with 50 mL of ideal water at 5 ppm of Cr VI, at different pH, electrical conductivity and electrical voltage. . When evaluating the removal efficiencies it was obtained that the optimal conditions for the process of removal of Cr (VI) by electrocoagulation was with an initial pH of 4, at 30 volts and a conductivity 800 $\mu\text{s}/\text{cm}$, giving a current density of 9.6 mA / cm^2 ; obtaining a reduction of 99% of the contaminant in 40 minutes, but removals of 90% were obtained, establishing a balance between the economic cost and the removal efficiency of the contaminant at a current density between 2.4 and 3.4 mA / cm^2 . The treatment of water contaminated with Cr (VI) by electrocoagulation allows compliance with the current environmental standard, which makes the process of removal of Cr (VI) from an industrial effluent less costly and allows it to be an effective and economical treatment.

Keywords: non-domestic wastewater, electroplating industry, electrocoagulation, chromium (VI).

INTRODUCCIÓN

El cromo se presenta en dos estados comunes de oxidación: Cr (III) y Cr (VI). El Cr (VI) es un contaminante común en las aguas residuales, siendo altamente tóxico, teratogénico, carcinógeno. Es transportado por las corrientes de agua y ha sido clasificado en varias regiones del mundo como un contaminante importante. Además, es tóxico para la mayoría de los organismos vivos (plantas, animales, humanos), específicamente afecta la salud humana causando cáncer de pulmones, ulcera, perforaciones del tabique nasal y daños en el hígado, en los riñones, en el sistema respiratorio, la piel y los ojos.

La industria de galvanoplastia contribuye significativamente a la contaminación del recurso hídrico por cromo, ocasionando serios problemas a los ecosistemas acuáticos, terrestres y a la salud humana. Así en Colombia se encuentran registrada 1800 empresas de dedicadas a la industria de la Galvanoplastia, de las cuales los efluentes de grandes empresas pueden contener hasta 2500 mg/L Cr (VI), ya que por arrastre se pueden perder el 40% de sales de cromo en los procesos para piezas mecánicas; y para procesos decorativos se pierde más del 70%, por lo tanto, estos valores superan los límites máximos permisibles establecidos en la Norma de Vertimientos Puntuales a Cuerpo de Aguas Superficiales no Domesticas, Resolución 0631 del 17 de marzo del 2015, demostrando de esta manera la alta carga contaminante presente en los vertidos y la necesidad de realizar un tratamiento de remediación.

Por lo cual, en los últimos años se han propuesto métodos para el tratamiento de sus aguas residuales en aras de mitigar los impactos generados por su actividad contaminante, como son los procedimientos químicos para la remoción del cromo. Desafortunadamente estas técnicas (¿cuáles técnicas?) tienen dificultades por los altos costos y dificultades operacionales. En los últimos años se han propuesto otros métodos alternativos y viables para la reducción de Cr (VI) a Cr (III), entre los cuales se resalta la electrocoagulación.

Working Paper

La electrocoagulación es un proceso que se utiliza para remover las cargas contaminantes de las aguas residuales de diferentes tipos de industrias, tal como la Galvánica; como su nombre lo indica es una tecnología que por medio de una corriente eléctrica, produce un efecto coagulante para eliminar contaminantes en el medio acuoso, que se encuentran suspendidos, disueltos o emulsificados, sin necesidad de ningún tipo de producto químico para su coagulación. La corriente eléctrica que circula a través de dos placas metálicas en paralelo (aluminio y hierro las más utilizadas) que componen una celda electrocoagulante, inducen a una sucesión de reacciones químicas que transforman los contaminantes en sustancias hidrofóbicas que facilitan su separación. Esta metodología tiene ventajas excepcionales como bajos costos, limpia y segura, reusabilidad de los electrodos, sin uso de agentes químicos tóxicos y a su vez la no generación de otros contaminantes indeseables.

En la presente investigación se evaluó la remoción de cromo VI presente en agua mediante un proceso de electrocoagulación. Además, se establecieron los mejores parámetros electroquímicos de reacción para la remoción de Cr (VI) y actualmente se está analizando el proceso de electrocoagulación bajo las mejores condiciones de reacción para la remoción de Cr presente en un agua residual no doméstica de una empresa de galvanoplastia ubicada en el Área Metropolitana del Municipio de Medellín.

En la presente investigación se evaluaron las relaciones fundamentales entre las condiciones de operación del proceso de electrocoagulación y la eficiencia de remoción de cromo (VI) presente en aguas residuales no domésticas de una empresa de galvanoplastia ubicada en el Área Metropolitana del Municipio de Medellín. Para el cumplimiento de esto se estudió la influencia de las condiciones de operación (pH, potencial eléctrico, densidad de corriente y tiempo) involucradas en el proceso de electrocoagulación para la remoción de cromo. Adicionalmente, se analizó el proceso de electrocoagulación bajo las mejores condiciones de reacción para la remoción de Cr (VI) presente en un agua residual no doméstica de una empresa de galvanoplastia ubicada en el Área Metropolitana del Municipio de Medellín. Finalmente, se determinó la destinación del recurso hídrico después del tratamiento por electrocoagulación.

METODOLOGÍA**Jornada aforo, muestreo y caracterización fisicoquímica del agua ARnD de la empresa de la industria galvánica**

Para recolectar el efluente se realizó una jornada de aforo y un plan de muestreo. Esto con el fin de obtener una muestra compuesta representativa. El muestreo se llevó a cabo durante 5 horas. Durante este periodo se tomaron 10 muestras simples cada 30 minutos, cada una con un volumen igual a 500 mL, a las cuales se les midió inmediatamente propiedades fisicoquímicas como temperatura, pH y sólidos sedimentables. A partir de estas muestras simples se formó una muestra compuesta, a la cual se le analizó parámetros como temperatura, pH, conductividad, turbidez y color. Cada muestra se almacenó en recipientes de plásticos de alta densidad a 4 °C, y se adicionaron aproximadamente 15 gotas de ácido nítrico 0.5 M para evitar el crecimiento de microorganismos. Finalmente, todas las muestras se conservaron y vigilaron de manera adecuada para garantizar la integridad de la cadena de custodia de las mismas. El análisis de estos parámetros se realizó en un laboratorio acreditado siguiendo las normas APHA, AWWA y WEF para el

Working Paper

análisis de aguas superficiales y aguas residuales.

Pruebas electroquímicas

Primeramente, con el fin de encontrar las condiciones óptimas para la remoción de cromo (VI), se realizaron técnicas de voltamperometría cíclica y lineal, para determinar el potencial mínimo requerido en la celda de electrocoagulación, empleando la ecuación de potencial de celda ($E^\circ = E_{ox} - E_{red}$), con electrodos de acero 304 (electrodo de sacrificio) según la reacción química y aluminio 1100, ambos con área de contacto de 2.5 x 2.5 cm; utilizando como referencia un electrodo de Calomel y alambre de platino para cerrar el circuito, en ambas semireacciones de óxido-reducción. Todas las pruebas electroquímicas se realizaron en un Bi-Potenciostato/Galvanostato, marca BioLOGIC, modelo VSP-CHAS, utilizando un beaker de 10 mL como celda electroquímica, el cual contenía 9 mL de solución de cromo (VI) de 100 ppm, a 10 mV/s y 6 repeticiones; Teniendo en cuenta que antes de realizar cualquier tipo de prueba con los electrodos, se efectuaba un tratamiento de desengrase con alcohol etílico desnaturalizado 40B J.T. Baker, durante 10 minutos y después se empleaba una lija de calibre de 1200 para pulir la superficie de los electrodos, para mejorar la superficie de contacto.

Optimización de parámetros fisicoquímicos del proceso de electrocoagulación

Las pruebas de electrocoagulación se llevaron a cabo en una celda de geometría rectangular, de material acrílico con dimensiones de 5 x 4 x 16 cm (alto, ancho y largo), y con par de electrodos con solo una cara expuesta. Los electrodos utilizados fueron de acero 304, con dimensiones de 2.5 x 2.5 cm x 1 mm (alto, ancho, grosor).

Con el objetivo de establecer las condiciones óptimas del tratamiento por electrocoagulación sobre la eficiencia de remoción de Cr (VI), se prepararon todos los ensayos a temperatura ambiente, utilizando soluciones ideales con 5 ppm de Cr (VI) (concentración aproximada previamente determinada en el ARnD real de la industria galvánica).

Determinación de la distancia óptima de los electrodos

Inicialmente, se realizaron algunas pruebas para establecer la distancia óptima entre los electrodos, en donde se variaron diferentes distancias de separación desde 1 hasta 5 cm, con 3 réplicas cada distancia, bajo las mismas condiciones (pH de 5, potencial de celda de 4 V y 40 minutos).

Estudio del efecto del pH, la conductividad eléctrica y la tensión eléctrica

Una vez establecida la distancia óptima entre los electrodos, se aplicó un diseño experimental factorial basado en la incidencia de 3 factores: pH del medio (4.0, 6.0 y 8.0), conductividad eléctrica (400, 600 y 800 $\mu\text{s}/\text{cm}$) y tensión eléctrica (10, 20 y 30 voltios), controlada por una fuente de voltaje. Estos factores de incidencia fueron escogidos bajo las condiciones máximas y mínimas encontradas en el análisis del ARnD recolectada.

Working Paper

Se realizó el respectivo análisis de varianza (ANOVA) con un nivel de confianza del 95% usando el software Statgraphics Centurion XV (Stat Point Technologies, Inc.).

ANÁLISIS DE RESULTADOS**1. Caracterización inicial del efluente**

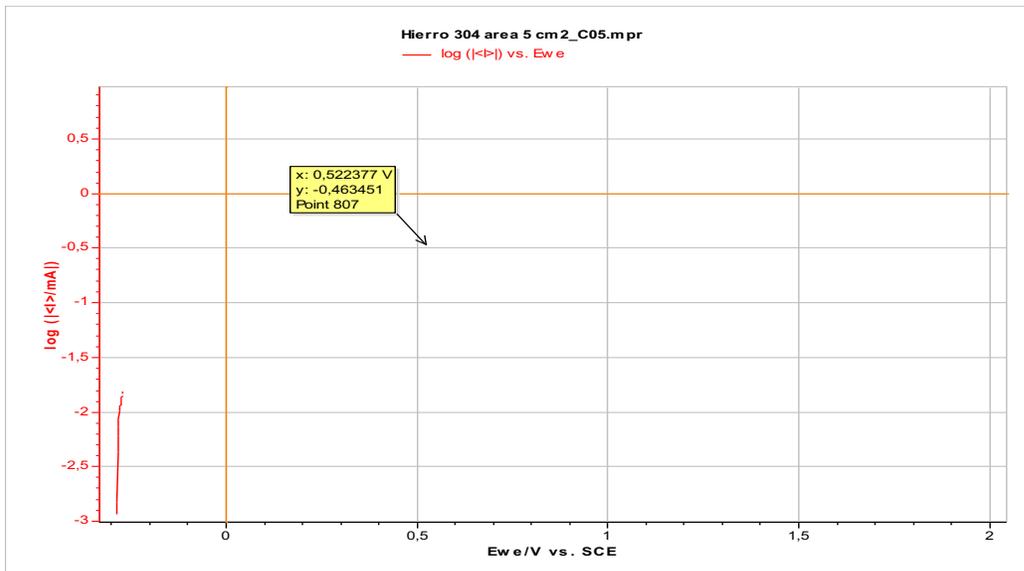
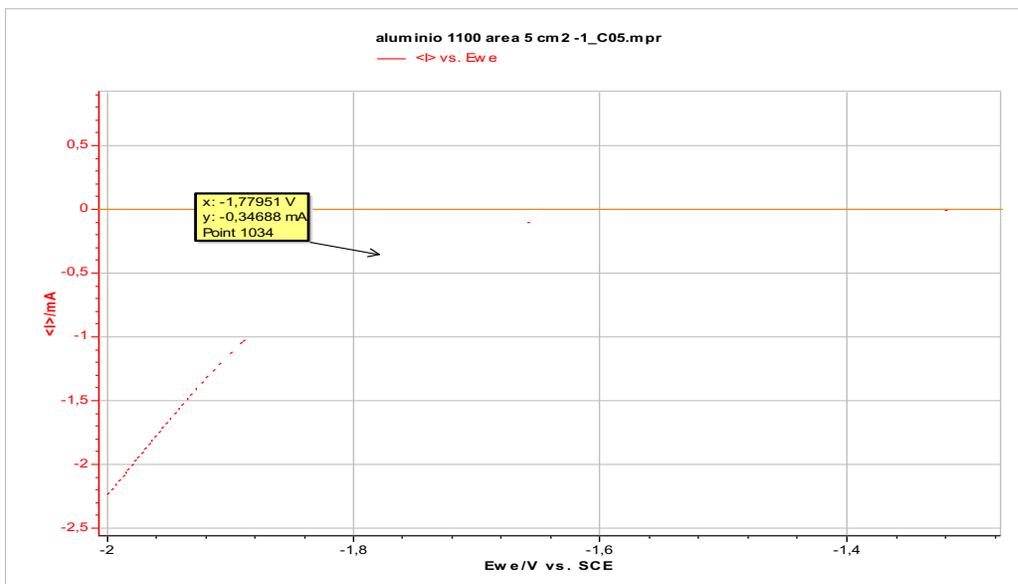
El agua residual se aforó por el método volumétrico durante toda la jornada de muestreo con el fin de garantizar que se tuviera todo el caudal durante la prueba.

Resultado de jornada de aforo y muestreo**Tabla 1.** Jornada de aforo y muestreo

Muestra	pH	Conductividad (µs/cm)	Caudal instantáneo (L/s)
1	7.41	634	0.27
2	8.02	749	0.32
3	6.47	513	0.26
4	4.15	598	0.27
5	7.83	391	0.33
6	4.73	765	0.32
7	8.05	519	0.29
8	4.75	803	0.31
9	7.52	499	0.28
10	6.32	603	0.32
Promedio	6.50	609	0.30
Máximo	8.05	803	0.33
Mínimo	4.15	391	0.26

Resultado de caracterización fisicoquímica del ARnD de empresa Galvánica.**Tabla 2.** Resultados fisicoquímicos de muestra compuesta vs Resolución 0631 de 2015.

Parámetro	Unidad	Valor registrado	Valor Máx. permisible	Cumplimiento
Temperatura	°C	24,3	40	Cumple
pH	Unidades pH	6,8	5 a 9	Cumple
DQO	mg/L O ₂	42	375	Cumple
DBO ₅	mg/L O ₂	15	150	Cumple
SST	mg/L	11,3	75	Cumple
SSED	mL/L	0,1	3	Cumple
HTP	mg/L	6	10	Cumple
CN ⁻	mg/L	0,08	0,1	Cumple
Cromo	mg/L	4,95	0,5	No cumple
Conductividad	µs/cm	670	No aplica	
Turbiedad	NTU	1,49		
Colorimetría	PCU	20		

Pruebas electroquímicas**Figura 1.** Voltamperometría lineal del electrodo de Fe.**Figura 2.** Voltamperometría lineal de electrodo de Al.

Se utilizó la ecuación de potencial de celda igual a $E^\circ = 0.5 \text{ V} - (-1.779 \text{ V}) = 2.3 \text{ V}$

Resultados de pruebas a diferentes distancias

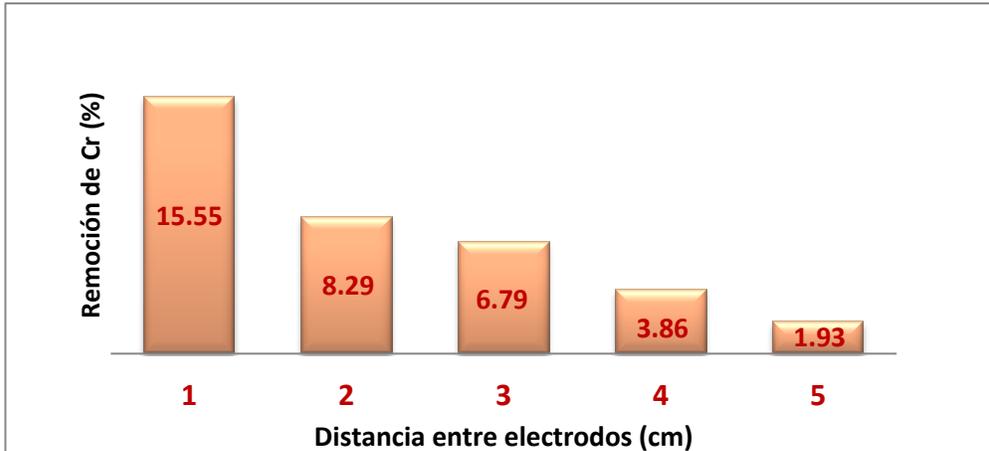
Working Paper

Figura 3. Porcentaje de remoción de cromo a distintas distancias entre los electrodos.

Tabla 3. Resultados de curva de calibración.

STD	[ppm]	ABS
STD 1	0,03	0,019
STD 2	0,06	0,061
STD 3	0,15	0,129
STD 4	0,40	0,336
STD 5	0,60	0,511
STD 6	1,00	0,8
STD 7	1,50	1,24

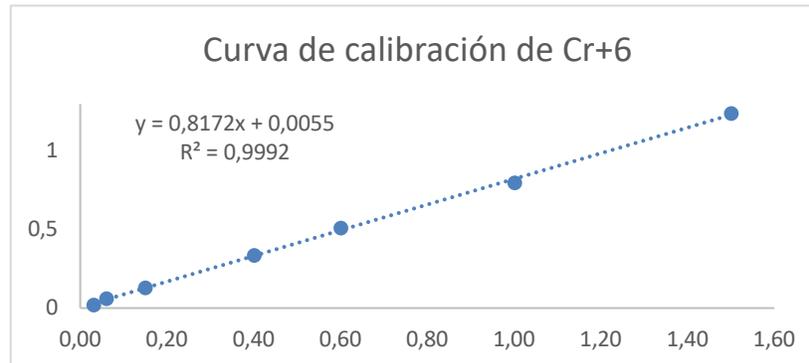


Figura 4. Curva de calibración de Cr VI.

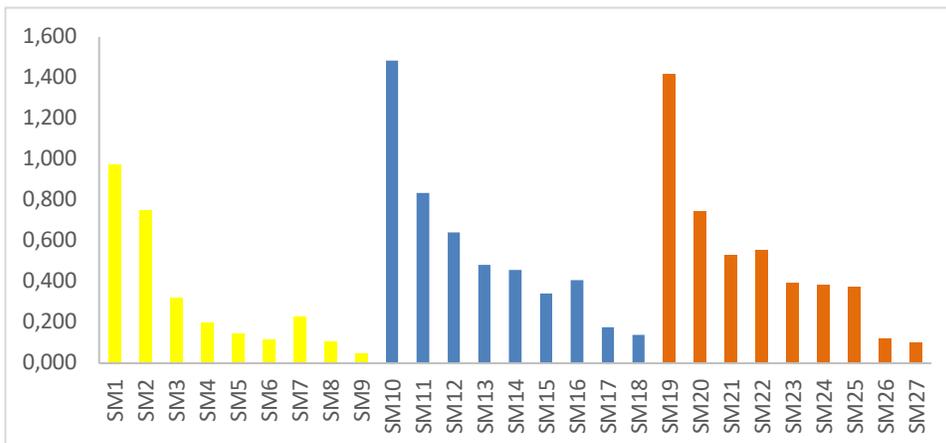
1.1. Resultados del diseño experimental factorial

Tabla 4. Resultados del diseño experimental.

[Conc de Cr ⁺⁶ inicial ppm]		5,00		
MUESTRA	ABS	[ppm]	40 minutos en celda batch	% Remoción
SM1	0,642	0,974	pH 4, 10 v, 400, 0,8 mA/cm ²	80,53%
SM2	0,495	0,749	pH 4, 10 v, 600, 1,6 mA/cm ²	85,03%

**Working Paper**

SM3	0,214	0,319	pH 4, 10 v,800, 2,4 mA/cm ²	93,62%
SM4	0,135	0,198	pH 4, 20 v,400, 2,4 mA/cm ²	96,04%
SM5	0,101	0,146	pH 4, 20 v,600, 5,6 mA/cm ²	97,08%
SM6	0,08	0,114	pH 4, 20 v,800, 8,8 mA/cm ²	97,72%
SM7	0,153	0,226	pH 4, 30 v,400, 4 mA/cm ²	95,49%
SM8	0,075	0,106	pH 4, 30 v,600, 7,2 mA/cm ²	97,87%
SM9	0,037	0,04818	pH 4, 30 v,800, 9,6 mA/cm ²	99,04%
SM10	0,975	1,483	pH 6, 10 v,400, 0,8 mA/cm ²	70,34%
SM11	0,552	0,836	pH 6, 10 v,600, 1,6 mA/cm ²	83,28%
SM12	0,425	0,642	pH 6, 10 v,800, 2,4 mA/cm ²	87,17%
SM13	0,321	0,483	pH 6, 20 v,400, 3,2 mA/cm ²	90,35%
SM14	0,305	0,458	pH 6, 20 v, 600, 4 mA/cm ²	90,84%
SM15	0,229	0,342	pH 6, 20 v,800, 5,6 mA/cm ²	93,16%
SM16	0,272	0,408	pH 6, 30 v,400, 4 mA/cm ²	91,85%
SM17	0,12	0,175	pH 6, 30 v,600, 8 mA/cm ²	96,50%
SM18	0,096	0,138	pH 6, 30 v,800, 9,6 mA/cm ²	97,23%
SM19	0,932	1,417	pH 8, 10 v, 400, 0,8 mA/cm ²	71,66%
SM20	0,492	0,744	pH 8, 10 v,600, 1,6 mA/cm ²	85,12%
SM21	0,353	0,532	pH 8, 10 v,800, 2,4 mA/cm ²	89,37%
SM22	0,367	0,553	pH 8, 20 v,400, 2,4 mA/cm ²	88,94%
SM23	0,264	0,395	pH 8, 20 v,600, 4 mA/cm ²	92,09%
SM24	0,257	0,385	pH 8, 20 v,800, 5,6 mA/cm ²	92,31%
SM25	0,251	0,376	pH 8, 30 v,400, 4 mA/cm ²	92,49%
SM26	0,085	0,122	pH 8, 30 v,600, 8 mA/cm ²	97,57%
SM27	0,072	0,102	pH 8, 30 v,800, 9,6 mA/cm ²	97,97%

**Figura 5.** Resultados del diseño experimental

Remoción de Cr ^{VI} respecto al tiempo									
Muestra	Experimento Parámetros	10 min		20 min		30 min		40 min	
		[ppm]	%	[ppm]	%	[ppm]	%	[ppm]	%
SM9	pH 4, 30 v, 800, 9,6 mA/cm ²	2,14	57,2	1,37	72,6	0,553	88,94	0,047	99,06
SM18	pH 6, 30 v, 800, 9,6 mA/cm ²	2,76	44,8	1,57	68,6	0,683	86,34	0,141	97,18
SM27	pH 8, 30 v, 800, 9,6 mA/cm ²	2,34	53,2	1,45	71,0	0,754	84,92	0,109	97,82

Tabla 5. Remoción de Cr VI respecto al tiempo

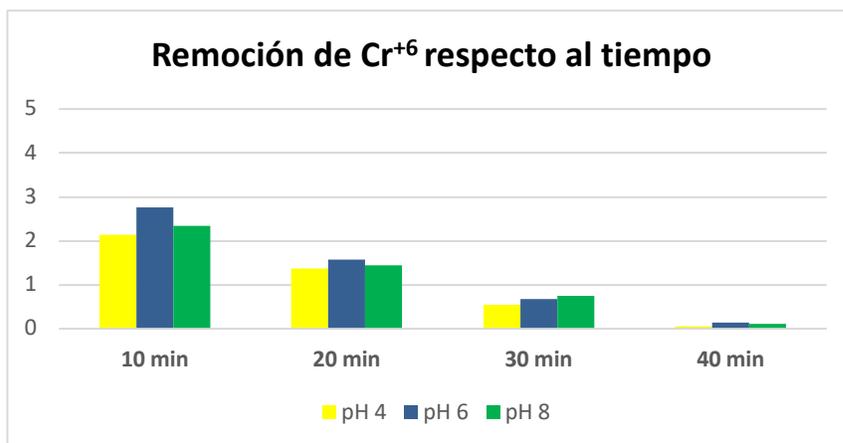


Figura 6. Remoción de Cr VI respecto al tiempo.

2. ANALISIS DE RESULTADOS

2.1. Jornada de aforo, muestreo y caracterización fisicoquímica

En la jornada de aforo, como se observa en la **TABLA 1**, se estableció el caudal, siendo este de 0,3 L.s⁻¹ por descarga. La caracterización del ARnD de dicha empresa fue realizada a la muestra compuesta, obteniendo una conductividad de 670 μ S, turbiedad de 1,49 NTU, colorimetría de 20 PCU, pH 6,8 y temperatura 23 °C. Bajo la Resolución 0631 de 2015, el cual establece los parámetros y los valores máximos permisibles para los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales, a los sistemas de alcantarillados públicos y se dictan otras disposiciones. La Resolución mencionada tiene una vigencia a partir del 01 de enero de 2016; el valor del pH cumple al estar en el rango de 5 a 9 y también la temperatura ya que está por debajo del límite permisible establecido por la normatividad que es 40 °C; pero para el Cromo la norma establece un máximo permisible de 0,50 mg/L, por lo tanto, este parámetro está en valores críticos ya que supera el máximo permitido, con una concentración de 5 mg.L⁻¹; por ende, evidencia que la operación primaria de tratamiento de ARnD realizado por la empresa, no remueve los metales pesados presentes en sus aguas por dicha actividad, estableciendo la importancia de esta investigación.

2.2. Pruebas electroquímicas

Las condiciones óptimas en la remoción de cromo total, que se realizaron por técnicas de Voltamperometría cíclica, en la cual se determinó un potencial onset a -0,52 V y 1.7 V; y la Voltamperometría lineal, fue de 2,3 V, lo cual es muy cercano a lo encontrado en la literatura con valores que varía entre 2,2 a 2,5 V, por ende se podría garantizar los resultados de las pruebas.

2.3. Pruebas a diferentes distancias de los electrodos

Working Paper

Los ensayos realizados a diferentes distancias entre los electrodos, muestran un incremento en el porcentaje de remoción de Cr VI con la disminución en la distancia, obteniéndose un valor máximo de remoción de 15.55% a una distancia de 1 cm. Esto es debido a que al aumentar la distancia, se incrementa la resistencia del paso de la corriente en el sistema de la celda de electrocoagulación, por lo tanto, afectando la electrodisolución del electrodo de sacrificio, disminuyendo el ion coagulante Fe^{2+} y la eficiencia del proceso.

2.4. Diseño experimental factorial

En la literatura se encontró un rango amplio de pH para la remoción de contaminantes en agua, pero para el Cr VI se sugiere un pH entre 4 a 5. Como se observa en la **GRAFICA 5**, el ensayo SM9 fue el de las condiciones con mayor remoción de Cr VI del 99% de remoción, aunque los ensayos SM3, SM4, SM5, SM6, SM7 y SM8, lograron remociones >90%, lo cual coincide con otras publicaciones, indican que en medio ácido, como pH 4, se favorecen la reducción del Cr^{6+} a Cr^{3+} con los iones de Fe^{2+} , permitiendo su precipitación en hidróxidos de cromo, hidróxidos liberados por la hidrólisis del electrodo cátodo. Pero como se observa en la **TABLA 4**, la remoción del contaminante fueron >85% en los tres niveles de pH, por lo tanto, según los resultados obtenidos, se evidencia que la reducción se relaciona más a la conductividad de la solución, por lo tanto, como nos indica la ley de Faraday de la electrolisis, “La masa de una sustancia depositada en un electrodo durante la electrolisis es directamente proporcional a la cantidad de electricidad transferida a este electrodo”, se analizó que a mayor conductividad de la solución, hay una relación directamente proporcional con la densidad de corriente que pasa por el electrodo de sacrificio, ocasionado más iones coagulantes Fe^{2+} en solución.

En la **TABLA 5**, la cual se realizó con los ensayos de mayor remoción de Cr VI, a diferentes pH, para analizar la reducción cada 10 minutos hasta completar 40 minutos. Se observó que si bien el porcentaje de reducción a los primeros 10 minutos casi del 50% en los tres ensayos, esta reducción va disminuyendo con el tiempo. Este fenómeno lo han ligado a la temperatura, la cual, a más de 40°C trae efectos negativos al proceso de electrocoagulación, afectando al electrodo que cumple la función de cátodo, con una pequeña capa de óxido que interfiere en la reacción. Por lo tanto, aunque al aumentar la densidad de corriente en el sistema incrementa la remoción del contaminante, también se aumenta la temperatura que afecta el sistema a medida que pase el tiempo.

Para este problema, se puede llegar a un equilibrio de eficiencia de remoción de Cr VI, entre la densidad de corriente y la temperatura, como el caso de los ensayos que llegaron a tener densidades de corriente de 2.4, y 3.2 mA/cm², lo que no provocó un aumento significativo de temperatura y aun así, llegaron a tener remociones del contaminante aproximadamente del 90%, con un menor de consumo de energía, por ende, reduciría costos del sistema.

3. CONCLUSIONES

- Para las diferentes condiciones evaluadas, se encontró que hay mayor porcentaje de remoción de Cr VI del 99% en 40 minutos, a una distancia entre electrodo de un centímetro, pH 4 y una densidad de corriente 9,6. Pero se reducirían los costos del proceso manteniendo una densidad de corriente entre 2.4 y 3.2 mA/cm², con

Working Paper

remociones del contaminante a los diferentes pH evaluados del 90% aproximadamente.

- La técnica de Voltamperometría lineal permitió evidenciar que se requiere un potencial mínimo de celda de 2,3 V para que la electrodisolución de iones de hierro permita la reacción para la remoción de cromo durante el proceso electrocoagulación entre los electrodos de Fe/Al.
- Aunque la empresa del sector de galvanoplastia cuenta con un tratamiento primario para el ARnD, se evidenció que el valor encontrado para el cromo total (5 mg/L) se encuentra por encima del límite máximo permisible establecido en la Resolución 0631 de 2015 para este tipo de efluentes; lo que hace indispensable buscar tratamientos alternativos como lo la electrocoagulación, que se logró obtener grandes resultados a nivel experimental.

4. REFERENCIAS

- A. Alzate, C. Oquendo, and A. Muñoz**, “Guía nacional de producción limpia para el sector de recubrimientos electrolíticos en Colombia,” Chem. ..., p. 25, 2004.
- Á. Chávez Porras, D. L. Cristancho Montenegro, and É. A. Ospina Granados**, “Una Alternativa Limpia para el Tratamiento de las Aguas Residuales Galvánicas: Revision Bibliografica,” Rev. Ing. Univ. Medellín, vol. 8, no. 14, pp. 39–50, 2009.
- A. De Revision and A. Arango**, “La electrocoagulación : una alternativa para el tratamiento de aguas residuales,” vol. 2, no. 1, pp. 49–57, 2005.
- A. Esmaeili, A. M. Nia, and R. Vazirinejad**, “Chromium (III) Removal and Recovery from Tannery Wastewater by Precipitation Process,” Am. J. Appl. Sci. 2, vol. 2, no. 10, pp. 1471–1473, 2005.
- A. Moezzi, A. M. McDonagh, and M. B. Cortie**, “Zinc oxide particles: Synthesis, properties and applications,” Chem. Eng. J., vol. 185–186, pp. 1–22, 2012.
- A. N. A. Arias**, “Caracterización de catalizadores 0,8% Pd/TiO₂ sol-gel usados en reacciones de hidrodecloración catalítica en fase líquida,” Rev. Latinoam. Metal. y Mater., vol. 30, no. 2, pp. 164–180, 2010.
- [b]A. P. Restrepo Mejía, Á. Arango Ruíz, and L. F. Garcés Giraldo**, “La electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas,” Producción+Limpia, vol. 1, no. 2, pp. 58–77, 2012.
- F. Akbal and S. Camci**, “Copper, chromium and nickel removal from metal plating wastewater by electrocoagulation,” Desalination, vol. 269, no. 1–3, pp. 214–222, 2011.
- G. Acosta, C. Barrera, A. Bourdón, and E. Cuervo**, “La Electrocoagulación como un tratamiento eficiente para la remoción de metales pesados presentes en aguas residuales,” Fac. Ciencias Básicas, vol. 9, no. 2, pp. 306–318, 2013.
- H. Wei, Q. Zhang, Y. Zhang, Z. Yang, A. Zhu, and D. D. Dionysiou**, “Enhancement of the Cr(VI) adsorption and photocatalytic reduction activity of g-C₃N₄ by hydrothermal treatment in HNO₃ aqueous solution,” Appl. Catal. A Gen., vol. 521, pp. 9–18, 2016.
- Heidmann and W. Calmano**, “Removal of Ni, Cu and Cr from a galvanic wastewater in an electrocoagulation system with Fe- and Al-electrodes,” Sep. Purif. Technol., vol. 71, no. 3, pp. 308–314, 2010.
- I. Kabdaşlı, I. Arslan-Alaton, T. Ölmez-Hancı, and O. Tünay**, “Electrocoagulation applications for industrial wastewaters: a critical review,” Environ. Technol. Rev., vol. 1, no. 1, pp. 2–45, 2012.
- I. Nandi, P. Mitra, P. Banerjee, A. Chakrabarti, M. Ghosh, and S. Chakrabarti**, “Ecotoxicological impact of sunlight assisted photoreduction of hexavalent chromium present in wastewater with zinc oxide nanoparticles on common Anabaena flos-aquae,” Ecotoxicol. Environ. Saf., vol. 86, no. September, pp. 7–12, 2012.

Working Paper

- J. Ananpattarachai and P. Kajitvichyanukul**, “Enhancement of chromium removal efficiency on adsorption and photocatalytic reduction using a bio-catalyst, titania-impregnated chitosan/xylan hybrid film,” *J. Clean. Prod.*, vol. 130, pp. 126–136, 2016.
- J. Guo, Y. Li, R. Dai, and Y. Lan**, “Rapid reduction of Cr(VI) coupling with efficient removal of total chromium in the coexistence of Zn(0) and silica gel,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 243, pp. 265–271, 2012.
- J. Melorose, R. Perroy, and S. Careas**, “Recuperación Y Reutilización De Cromo De Las Aguas Residuales Del Proceso De Curtido De Curtiembres De San Benito (Bogotá), Mediante Un Proceso Sostenible Y Viable Tecnológicamente,” *Statew. Agric. L. Use Baseline 2015*, vol. 1, no. 9, pp. 1689–1699, 2015.
- K. Dermentzis, A. Christoforidis, E. Valsamidou, A. Lazaridou, and N. Kokkinos**, “removal of hexavalent chromium from electroplating wastewater by electrocoagulation with iron electrodes,” vol. 13, no. 4, pp. 412–418, 2011.
- M. Al-shannag, Z. Al-qodah, K. Bani-melhem, and M. Rasool**, “Heavy metal ions removal from metal plating wastewater using electrocoagulation : Kinetic study and process performance,” vol. 260, pp. 749–756, 2015.
- M. Y. A. Mollah, P. Morkovsky, J. A. G. Gomes, M. Kesmez, J. Parga, and D. L. Cocke**, “Fundamentals , present and future perspectives of electrocoagulation,” vol. 114, pp. 199–210, 2004.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Territorial**, “Resolución 0631.” 2015.
- N. Bibiana and M. Posada**, “Sistema de electrocoagulación como tratamiento de aguas residuales galvánicas electrocoagulation system as treatment of galvanic wastewater,” vol. 20, no. 1074, pp. 33–44, 2010.
- S. Chakrabarti, B. Chaudhuri, S. Bhattacharjee, A. K. Ray, and B. K. Dutta**, “Photo-reduction of hexavalent chromium in aqueous solution in the presence of zinc oxide as semiconductor catalyst,” *Chem. Eng. J.*, vol. 153, no. 1–3, pp. 86–93, 2009.
- U. Piratoba Morales, A. Mariño Camargo, and J. J. Olaya**, “Diagramas Típicos Con Circuitos Equivalentes Electrochemical Impedance - Interpretation of Typical Diagrams With Equivalent Circuits,” *Dyna*, vol. 77, no. 164, pp. 69–75, 2010.
- Vi, C. O. N. Carbón, A. C. E, V. Ibarra, and G. Alejandro**, “REDUCCIÓN DE SOLUCIONES SINTÉTICAS Diagramas Eh-pH,” no. Vi, pp. 451–457, 2009.
- Y. C. Zhang, M. Yang, G. Zhang, and D. D. Dionysiou**, “HNO₃-involved one-step low temperature solvothermal synthesis of N-doped TiO₂ nanocrystals for efficient photocatalytic reduction of Cr(VI) in water,” *Appl. Catal. B Environ.*, vol. 142–143, pp. 249–258, 2013.
- Y. Qu, X. Zhang, J. Xu, W. Zhang, and Y. Guo**, “Removal of hexavalent chromium from wastewater using magnetotactic bacteria,” *Sep. Purif. Technol.*, vol. 136, pp. 10–17, 2014.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid por la financiación del proyecto de investigación titulado “Remoción por electrocoagulación de cromo (VI) presente en aguas residuales no domésticas de la Industria de Galvanoplastia”, aprobado en la Convocatoria de Proyectos de Investigación Sede Central y Sedes Regionales del Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, 2018 y con centro de costo 2061080368, adscrito al Grupo de Investigación en Catálisis Ambiental y Recursos Renovables (CAMER).