

# Tratamiento por Electrocoagulación para la remoción de índigo carmín presente en agua

A. Rojas-Mena, C. Santiago-Santiago, G. Macedo-Miranda\*, J. González-Juárez, S. Martínez-Gallegos, S. Díaz-Sagal y C. García-Ibarra

Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Toluca, Av. Tecnológico S/N, Col. Agrícola Bella Vista, Metepec, Estado de México

*Electrocoagulation treatment in the indigo carmine removal from aqueous solution*  
*Tractament per Electrocoagulació per a la remoció de indi carmí present en aigua*

RECEIVED: 24 JANUARY 2018; REVISED: 3 JULY 2018; ACCEPTED: 23 JULY 2018

## SUMMARY

In this study, the optimal conditions for the application of the electrocoagulation (EC) process were evaluated in the indigo carmine (IC) dye removal from aqueous solution. Several initial concentrations 100, 200 and 300 mg/L of IC were tested, and the optimum current density (CD) was determined for each concentration. The results obtained for treatment time of 40 min show a linear behavior between initial concentration and DC, a higher IC concentration the CD was increased. For the initial concentrations 100, 200 and 300 mg/L, were obtained 65, 61 and 54% of IC remotion respectively.

**Keywords:** Electrocoagulation; flocs; current density; indigo carmine.

## RESUMEN

En el presente estudio se evaluaron las condiciones óptimas del proceso de electrocoagulación (EC) para su aplicación en la remoción del colorante índigo carmín (IC) presente en agua. Se utilizaron soluciones acuosas de diferentes concentraciones iniciales de 100, 200 y 300 mg/L del colorante. Se determinó la densidad de corriente (DC) óptima para cada una de las concentraciones de partida. Se encontró que, al aumentar la concentración inicial del índigo carmín, la DC óptima utilizada fue mayor, para un tiempo de

tratamiento de 40 minutos. Los porcentajes de remoción de color obtenidos fueron 65, 61 y 54% partiendo de concentraciones inicial de 100, 200 y 300 mg/L respectivamente.

**Palabras clave::** Electrocoagulación; flocs; densidad de corriente; indigo carmin.

## RESUM

En el present estudi es van avaluar les condicions òptimes del procés d'electrocoagulació (EC) per a la seva aplicació en la remoció del colorant indi carmí (IC) present a l'aigua. Es van utilitzar solucions aquoses de diferents concentracions inicials de 100, 200 i 300 mg/L de colorant. Es va determinar la densitat de corrent (DC) òptima per a cadascuna de les concentracions de partida. Es va trobar que, en augmentar la concentració inicial de l'indi carmí, la DC òptima utilitzada va ser major, per un temps de tractament de 40 minuts. Els percentatges de remoció de color obtinguts van ser 65, 61 i 54% partint de concentracions inicials de 100, 200 i 300 mg/L, respectivament.

**Paraules clau:** Electrocoagulació; flocs; densitat de corrent; indi carmí.

\*Corresponding author: macedomiranda@yahoo.com

## INTRODUCCIÓN

Los efluentes de agua residual municipal o industrial no tratados han ocasionado la contaminación de cuerpos receptores, lo cual ha generado un problema de interés global. El agua residual industrial es difícil de tratar por la gran variedad en composición y la difícil degradación de algunos contaminantes presentes<sup>1</sup>. Estos efluentes se caracterizan por una alta Demanda Química de Oxígeno (DQO)<sup>2</sup> y una gran variación en el pH<sup>3</sup>. Se han reportado más de 10,000 colorantes sintéticos utilizados en industrias tales como la textil, papel, plásticos entre otras. Los colorantes textiles tienen gran persistencia en el ambiente y los métodos de tratamiento biológico convencionales no son eficientes<sup>4</sup>. El color debe ser eliminado antes de la descarga al cuerpo receptor<sup>5</sup>, ya que son factores de riesgo ambiental, siendo la inhibición de procesos fotosintéticos en los ecosistemas acuáticos uno de ellos<sup>6</sup>.

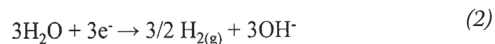
Existen diversas técnicas para eliminar colorantes sintéticos como el cristal violeta, negro 5, verde ácido 50, naranja II, rojo ácido II<sup>7</sup>, empleando la precipitación, coagulación química, adsorción<sup>8</sup>, biológico<sup>9, 10, 11</sup>, intercambio iónico, ultrafiltración<sup>12</sup>, procesos de oxidación avanzada (POA) y la electrocoagulación (EC)<sup>13, 14, 15</sup>, además de remover sólidos suspendidos, disueltos y material coloidal presentes<sup>1</sup>, así como compuestos orgánicos<sup>16</sup>, contaminantes inorgánicos<sup>7</sup>, entre otros.

La EC involucra la electrodisolución de los ánodos de sacrificio provocando una mayor concentración de metales en la solución y la formación de compuestos hidroxometálicos empleados como coagulantes<sup>1, 17</sup>. Se efectúa la desestabilización de las partículas presentes, neutralizando las fuerzas repulsivas que las mantienen suspendidas en el agua, formando agregados más grandes y así facilitar su separación del líquido<sup>18</sup>. Los factores que influyen en el desempeño de la EC son: el pH, la fuerza iónica<sup>19</sup>, la densidad de corriente (DC)<sup>20</sup> y el estado de oxidación de las especies; además de los parámetros operacionales, como son los tiempos de retención y gradientes de velocidad en el mezclado<sup>21</sup>. La eficiencia del proceso de EC dependerá directamente de la cantidad y especiación del aluminio disuelto durante el tratamiento<sup>22</sup>. En el tratamiento por electrocoagulación pueden utilizarse electrodos de hierro o aluminio<sup>20</sup>. Al usar electrodos de aluminio, las reacciones químicas que se llevan a cabo son<sup>23, 24</sup>:

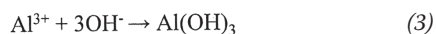
En el ánodo, el metal se oxida en cationes



En el cátodo, el agua se reduce a hidrógeno ( $\text{H}_2$ ) y aniones hidroxilo ( $\text{OH}^-$ )



En solución



La cantidad de metal disuelto por oxidación anódica puede ser calculada usando la ley de Faraday<sup>25, 26</sup>:

$$n = \frac{It}{zF} \quad (4)$$

Donde  $n$  son los moles del metal, por lo tanto es una función del tiempo de electrolisis  $t$  (s) y de la intensidad de corriente  $I$  (A),  $z$  es el número de oxidación del metal (material del electrodo) y  $F$  es la constante de Faraday (96500 C/mol)<sup>20, 22, 27</sup>.

La concentración de aluminio en solución se puede calcular con la ecuación 5:

$$M = \frac{n}{V} \quad (5)$$

siendo  $n$  el número de moles del metal que se forman en la solución y  $V$  el volumen del reactor.

El objetivo de esta investigación fue el de establecer las condiciones óptimas de densidad de corriente, tiempo de tratamiento y concentración de índigo carmín para la remoción del colorante presente en agua.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### 1.1 Reactivos y materiales

Los reactivos que se utilizaron fueron: cloruro de sodio al 99.5 % de pureza (grado reactivo, Sigma Aldrich), índigo carmín (grado reactivo, Meyer). Las soluciones fueron preparadas con agua tipo 1 (conductividad 0.06  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , SARTORIUS deionizer, modelo Arium 611 UF, Germany).

### 1.2 Caracterización del índigo carmín (IC)

El IC (Azul Ácido 74,  $\text{C}_{16}\text{H}_8\text{N}_2\text{Na}_2\text{O}_8\text{S}_2$ ), es un colorante sintético (Figura 1), utilizado principalmente para el teñido de fibras de poliéster y mezcilla<sup>28, 29</sup>, debido a su alta solubilidad (10 g/L)<sup>8</sup>.



Figura 1. Estructura química del colorante IC.

Para determinar la longitud de onda de máxima absorción del colorante, se utilizaron muestras de soluciones de IC y se les realizaron barridos en un intervalo de longitudes de onda de 200 a 800 nanómetros (nm), mediante espectroscopía UV-Vis (UV-Vis Genesys Modelo 10, Thermo Fisher Scientific).

### 1.3 Celda electroquímica

La celda electroquímica se construyó de acrílico, con capacidad de 3 L. Se utilizaron 10 electrodos de aluminio como cátodos (2), ánodos (2) y electrodos de sacrificio (6), con una distancia de separación entre cada uno de ellos de 8 mm, con el siguiente arreglo,

ánodo – sacrificio– cátodo. Las dimensiones de cada placa fueron de 9x 6 cm. El área total de aluminio activo fue de  $A= 342 \text{ cm}^2$ . Los electrodos se conectaron a una fuente de poder (Tektronix PWS2326), que suministró corriente directa a la solución acuosa (0.4-0.6 A) y la DC que se aplicó fue de 8.8–15.5  $\text{A/m}^2$ . El tratamiento se realizó bajo agitación (Parrilla Thermolyne Cimarec®3).

## 2.4 Proceso de electrocoagulación

Se realizaron estudios preliminares del tratamiento de EC con diferente densidad de corriente (DC) para establecer el valor más óptimo, considerando la concentración inicial del colorante IC. Para 100 mg/L se emplearon DC de 6.1, 8.8 y 14.6  $\text{A/m}^2$ ; para 200 mg/L se utilizaron DC de 12.2, 14.6 y 17.5  $\text{A/m}^2$  y para 300 mg/L se utilizaron DC de 15.5 y 17.5  $\text{A/m}^2$ .

A las soluciones acuosas del colorante IC de 100, 200 y 300 mg/L, se les ajustó la conductividad a un valor de 1000 mS/cm, adicionando solución acuosa de cloruro de sodio 3M. La solución del colorante se colocó en la celda de electrocoagulación, se colocó el agitador magnético en el interior de la misma, se colocaron los electrodos de aluminio en un arreglo bipolar en serie, finalmente se conectó el sistema a la fuente de poder. El pH inicial fue de 6.8-7.6 (dependiendo de la concentración inicial de IC)<sup>28</sup>. Los experimentos se realizaron por duplicado.

Durante el proceso de EC se tomaron muestras de 20 mL a intervalos de tiempo de 0, 20 y 40 minutos. Al finalizar el tratamiento, se centrifugaron las muestras de agua tratada (centrifuga Universal 320 R, Hettich-Zentrifugen), por 10 min a 3500 rpm, se decantó el sobrenadante. En la fase líquida se determinaron los parámetros de respuesta para establecer la eficiencia del tratamiento. El pH se determinó de acuerdo a la NMX-AA-008-SCFI-2011<sup>30</sup>, utilizando un electrodo combinado (pH-metro Denver Instrument Modelo 250). Para la conductividad, se realizó de acuerdo a la NMX-AA-093-SCFI-2000<sup>31</sup>, utilizando una celda de conductividad BO42504 005. La turbiedad se determinó por nefelometría<sup>32</sup>, utilizando un turbidímetro marca Thermo Scientific (Modelo Orion AQ4500). Para la medición de color se utilizó la NMX-AA-045-SCFI-2001<sup>33</sup>, con un colorímetro (HACH DR/890 Colorimeter). Para la cuantificación de la DQO se empleó el método de acuerdo a la norma NMX-AA-030/2-SCFI-2011<sup>34</sup>, utilizando un digestor marca HACH (modelo DRB200). La cuantificación inicial y residual del colorante índigo carmín se realizó por Espectroscopía UV-VIS (UV-Vis Thermo Scientific).

## 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1 Bandas de absorción del IC, en el intervalo de longitud de onda de 200 a 800 nm.

Las principales bandas de absorción del colorante IC, se muestran en la Figura 2.

Como se observa, se presentan picos de máxima absorbancia a 287 y 612 nm, tal como lo reportan algunos autores<sup>28, 29, 35, 36, 37</sup>.

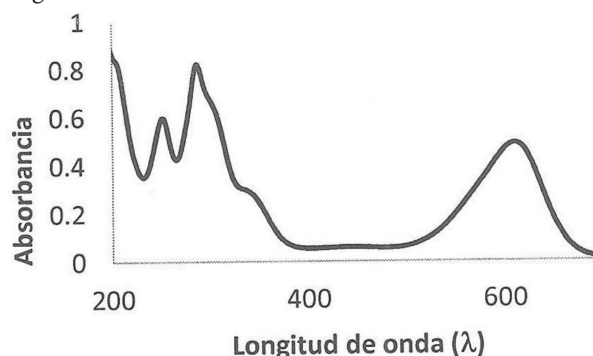


Figura 2. Espectro de absorción del colorante IC.

### 3.2 Densidad de corriente óptima

Con la finalidad de obtener la DC óptima para cada una de las concentraciones iniciales del colorante IC, se realizó el tratamiento de EC durante 40 minutos. Para una concentración de 100 mg/L de colorante IC se utilizaron densidades de corriente de 6.1, 8.8 y 14.6  $\text{A/m}^2$ ; para la concentración de 200 mg/L de colorante IC, se propusieron dos DC 12.2 y 17.5  $\text{A/m}^2$ ; mientras que para la concentración de 300 mg/L del colorante IC, se utilizaron DC de 15.5 y 17.5  $\text{A/m}^2$ . Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1 Resultados del Porcentaje de remoción (%) de [IC], color y DQO

| Concentración de IC (mg/L) | DC ( $\text{A/m}^2$ ) | Tiempo (min) | Porcentaje de Remoción |       |      |
|----------------------------|-----------------------|--------------|------------------------|-------|------|
|                            |                       |              | [IC]                   | Color | DQO  |
| 100                        | 6.1                   | 20           | 69.8                   | 62.8  | 60.5 |
|                            |                       | 40           | 78.1                   | 74.1  | 76.3 |
|                            | 8.8                   | 20           | 55.3                   | 50.5  | 55.9 |
|                            |                       | 40           | 74.7                   | 65.3  | 77.9 |
|                            | 14.6                  | 20           | 61.0                   | 55.9  | 38.9 |
|                            |                       | 40           | 78.5                   | 78.5  | 72.2 |
| 200                        | 12.2                  | 20           | 52.1                   | 55.9  | 48.2 |
|                            |                       | 40           | 66.9                   | 60.8  | 57.1 |
|                            | 14.6                  | 20           | 44.5                   | 50.0  | 33.3 |
|                            |                       | 40           | 60.6                   | 56.5  | 51.9 |
|                            | 17.5                  | 20           | 56.6                   | 48.6  | 44.8 |
|                            |                       | 40           | 74.2                   | 67.6  | 58.6 |
| 300                        | 15.5                  | 20           | 42.7                   | 41.5  | 39.6 |
|                            |                       | 40           | 54.4                   | 53.6  | 52.1 |
|                            | 17.5                  | 20           | 35.0                   | 34.1  | 37.8 |
|                            |                       | 40           | 47.3                   | 39.2  | 48.6 |

Para una concentración inicial de 100 mg/L, la DC de 8.8  $\text{A/m}^2$ , se consideró como la óptima. Al utilizar la DC de 6.1  $\text{A/m}^2$ , las características del floc formado no fueron las adecuadas debido a que se requería de un mayor tiempo para su sedimentación. Para las concentraciones de 200 y 300 mg/L se consideraron las DC óptimas de 12.2 y 15.5  $\text{A/m}^2$  correspondientemente. Con una DC de 17.5  $\text{A/m}^2$ , se formó un floc de textura muy gelatinosa en la solución lo cual dificulta la sedimentación y con ello la separación del lodo. A una DC elevada, la disolución del aluminio de los electrodos aumenta, dando lugar a una mayor cantidad de precipitado,

pero también influyendo en las características del floc formado (lo cual puede dificultar su separación) y en la generación de burbujas de H<sub>2</sub><sup>38</sup>.

### 3.3 Tratamiento electroquímico

Los resultados de la cuantificación de los parámetros de respuesta del tratamiento por EC para las concentraciones iniciales de 100, 200 y 300 mg/L del colorante IC en soluciones acuosas a diferentes tiempos aplicando la DC de 8.8, 12.2 y 15.5 A/m<sup>2</sup> respectivamente, se muestran en la Tabla 2.

Durante el proceso de EC, el pH sufrió un cambio a valores básico entre 9.9 - 10.2, lo cual se atribuye a la formación del hidróxido de aluminio Al(OH)<sub>3</sub>, debido a la disolución de los electrodos utilizados. Estos valores de pH están en el rango de formación óptima del agente coagulante Al(OH)<sub>3</sub>, responsable de la aglomeración de partículas contaminantes<sup>39</sup>. La estabilización del pH es característico de procesos de EC en batch<sup>40</sup>.

**Tabla 2.** Resultados del tratamiento por EC a diferentes intervalos de tiempo

| Concentración de IC (mg/L) | Tiempo (min) | pH          | Turbiedad (NTU) | [IC] (mg/L) | DQO (mg/L)   | Color Pt/Co |
|----------------------------|--------------|-------------|-----------------|-------------|--------------|-------------|
| 100                        | 0            | 7.62 ± 0.1  | ND              | 105.5 ± 1.8 | 93.2 ± 0.9   | 980 ± 84.8  |
|                            | 20           | 9.47 ± 0.2  | 3.7 ± 0.04      | 31.9 ± 13.9 | 41.1 ± 7.3   | 485 ± 21.2  |
|                            | 40           | 9.85 ± 0.4  | 2.8 ± 0.02      | 23 ± 5.7    | 20.6 ± 0.2   | 340 ± 28.9  |
| 200                        | 0            | 7.05 ± 0.1  | 9.5 ± 1.0       | 203 ± 5.9   | 221 ± 0      | 2270 ± 509  |
|                            | 20           | 9.95 ± 0.1  | 6.6 ± 0.06      | 94.7 ± 0.2  | 114.5 ± 16.7 | 1000 ± 14.1 |
|                            | 40           | 10.15 ± 0.1 | 17.7 ± 1.2      | 64.1 ± 7.7  | 94.7 ± 0     | 890 ± 84.9  |
| 300                        | 0            | 6.86 ± 0.2  | 37.15 ± 3.4     | 317 ± 2     | 309.2 ± 13.1 | 2750 ± 198  |
|                            | 20           | 9.73 ± 0.1  | 27.4 ± 2.4      | 179.7 ± 6.5 | 186.6 ± 40.7 | 1610 ± 113  |
|                            | 40           | 9.87 ± 0.1  | 70.95 ± 1.9     | 141.8 ± 2.4 | 148 ± 8.3    | 1275 ± 176  |

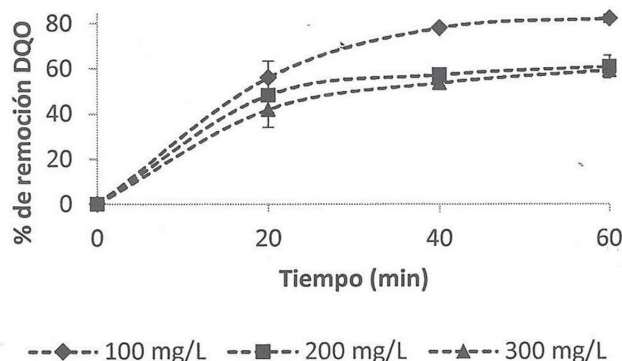
En la Tabla 3, se muestran los porcentajes finales de remoción del colorante al término del tratamiento, considerando un tiempo óptimo de 40 minutos, concentraciones iniciales de IC de 100, 200 y 300 mg/L y DC de 8.8, 12.2 y 15.5 A/m<sup>2</sup> respectivamente.

**Tabla 3.** Porcentajes de eficiencia del tratamiento electroquímico.

| Concentración mg/L | Porcentaje de remoción (%) |       |     |
|--------------------|----------------------------|-------|-----|
|                    | [IC]                       | Color | DQO |
| 100                | 75                         | 65    | 77  |
| 200                | 67                         | 61    | 57  |
| 300                | 55                         | 54    | 52  |

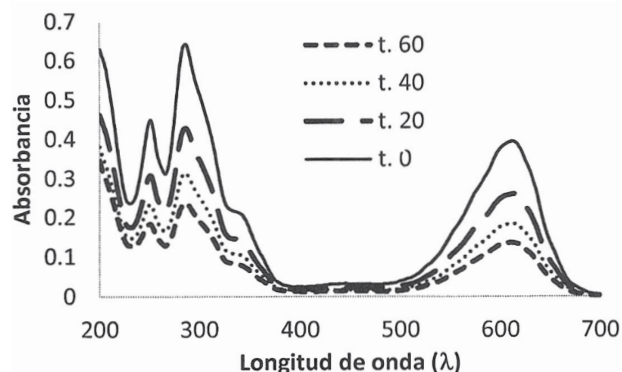
Como se observa, para una menor concentración inicial del colorante IC, la eficiencia de remoción es mayor disminuyendo al aumentar la concentración inicial. Resultados de investigaciones realizadas establecen que la eliminación del color y la reducción de la DQO disminuyen con el aumento de la concentración inicial del colorante<sup>41</sup>.

En la Figura 3, se muestra que se presenta una disminución considerable del valor de la DQO para cada una de las concentraciones iniciales de IC de 100, 200 y 300 mg/L y DC de 8.8, 12.1 y 15.5 A/m<sup>2</sup>, respectivamente.



**Figura 3.** Porcentaje de remoción de DQO.

En la cuantificación de la DQO, se presenta un mayor porcentaje de remoción para una concentración de 100 mg/L, disminuyendo la eficiencia al aumentar la concentración inicial. En la Figura 4, se muestran los resultados de los espectros UV-Vis obtenidos durante el tratamiento de EC a diferentes intervalos de tiempos de (0, 20 y 40 minutos) para una concentración de 100 mg/L de colorante IC.



**Figura 4.** Evolución de los espectros UV-Vis de soluciones acuosas del colorante IC durante el tratamiento de EC.

Se observa que, a mayor tiempo de tratamiento de EC, se presenta una disminución en la intensidad de las bandas en el espectro UV-Vis, lo cual puede atribuirse a la remoción de color del agua en tratamiento. No se observan modificaciones en los espectros de UV-Vis obtenidos, ya que, durante el proceso de EC, el colorante IC no se destruye, se reubica en su totalidad en el precipitado de Al(OH)<sub>3</sub>. Esto ocurrió de igual forma para las soluciones acuosas de IC con concentraciones de 200 y 300 mg/L.

Los resultados obtenidos muestran que la remoción de IC se efectúa desde el inicio del proceso. Para este estudio, se consideró un tiempo óptimo de 40 minutos, permitiendo una adecuada formación de flocs, así como para la realización de la sedi-

mentación/flotación de los mismos. Adicionalmente, es importante considerar en todos los procesos electroquímicos la DC ( $A/m^2$ ), ya que determina la producción de coagulante y la producción de burbujas de  $H_2$  y por lo tanto afecta la formación y crecimiento de floculos. En este trabajo se reporta que la DC varía de acuerdo a la concentración inicial del colorante. Adicionalmente, la agitación interviene en la eficiencia del proceso ya que origina el crecimiento de los flocs y por consiguiente la sedimentación de estos. En la tabla 4, se muestran resultados del tratamiento por electrocoagulación reportados por otros autores y los obtenidos en esta investigación.

El electrólito soporte que se emplean en los procesos electroquímicos permiten el flujo de corriente eléctrica y aumenta la eficiencia para la remediación de los efluentes por la adición de iones, para producir un mejor flujo de corriente eléctrica<sup>19</sup>. En este caso, la adición de la solución como electrolito soporte fue adecuada.

Como se muestra en la tabla 4, los resultados del tratamiento por electrocoagulación obtenidos, son similares a los trabajos reportados por otros autores.

**Tabla 4.** Resultados del tratamiento por electrocoagulación de agua contaminada

| Referencia   | Densidad de corriente o corriente                                | Muestra tratada                              | Concentración inicial  | % de Remoción de DQO o de Color              |
|--------------|--|--|--|--|
| 42           | Densidad de corriente: 56.2 $A/m^2$                              | Agua residual sintética                      | DQO: 1140 mg/L   | DQO: 74%                                     |
| 26           | Densidad de corriente: 60.6 $A/m^2$                              | Agua residual industrial                     | DQO: 2202 mg/L   | DQO: 70%                                     |
| 43           | Densidad de corriente: 800 $A/m^2$<br>Electrodos de Fe           | Agua residual industrial                     | Color (Pt-Co U): 3525<br>Color (U. Pt-Co): 2160<br>DQO: 889.5 (mg/L) | Color: 81%<br>DQO: 52%<br>Color: 85%         |
| 44           | Densidad de corriente: 50 $A/m^2$                                | Agua residual                                | DQO: 204 mg/L  | DQO: 51 %                                    |
| 45           | 966 $A/m^2$<br>Electrodos de Cu                                  | Agua residual industrial                     | DQO: 2300.00 mg/L<br>Color (unidades Pt-Co): 7450.00                 | DQO: 89%<br>Color: 98%                       |
| 46           | Intensidad de corriente: 100-300 A<br>Electrodos Carbono-platino | Solución acuosa de Azul de bromotimol        | DQO: 121 mg/L  | DQO: 50%                                     |
| Este trabajo | Densidad de corriente: 8.8 $A/m^2$<br>Electrodos de Al           | Solución acuosa de indigo carmin de 100 mg/L | DQO: 93.2 mg/L<br>Color (unidades Pt-Co): 980                        | DQO: 77%<br>Color: 65%<br>Indigo Carmin: 75% |
| Este trabajo | Densidad de corriente: 15.5 $A/m^2$<br>Electrodos de Al          | Solución acuosa de indigo carmin de 300 mg/L | DQO: 309.2 mg/L<br>Color (unidades Pt-Co): 2750                      | DQO: 52%<br>Color: 54%<br>Indigo Carmin: 57% |

### 3.4 Concentración de aluminio en la solución acuosa de IC

Para calcular la cantidad de  $Al^{3+}$  formado en el proceso electroquímico, se utilizó la ley de Faraday (ecuación 4), considerando las condiciones experimentales de intensidad de corriente de (0.4-0.6) A, 40 min de tratamiento electroquímico, el valor de la constante de Faraday y la carga del catión ( $z = 3^+$ ). Igualmente se determinó la concentración de aluminio en solución (ecuación 5), donde n es el número de moles de aluminio que se forman y V es el volumen de la celda utilizada (3 L). La cantidad presente en la solución puede ser incrementada al

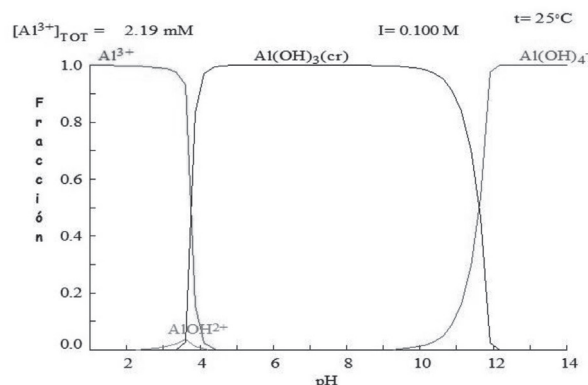
incrementar la corriente. Los resultados que se obtuvieron para cada una de las concentraciones se muestran en la Tabla 5.

**Tabla 5.** Resultados de la cantidad de aluminio formada durante el tratamiento de EC

| Concentración inicial [IC] (mg/L) | Densidad de corriente ( $A/m^2$ ) | Cantidad máxima de $Al^{3+}$ formado en el proceso electroquímico (g) | Concentración [M] de Al en la muestra tratada (mol/L) |
|-----------------------------------|-----------------------------------|---|---|
| 100                               | 8.8                               | 0.1182  | $2.19 \times 10^{-3}$                                 |
| 200                               | 12.2                              | 0.2242  | $4.15 \times 10^{-3}$                                 |
| 300                               | 15.5                              | 0.2865  | $5.30 \times 10^{-3}$                                 |

El  $Al(OH)_3$  formado durante el proceso (de acuerdo a la ecuación 3) es el responsable del aumento de pH y la neutralización de cargas electrostáticas de partículas dispersas, reduciendo la repulsión entre ellas y favoreciendo las atracciones de Van der Waals, facilitando la aglomeración y posterior separación de partículas en el efluente<sup>47</sup>. El  $Al^{3+}$  es la especie predominante en un rango de pH de 1.0 a 3.0, mientras que el  $Al(OH)_3$  impera a pH mayor. Los iones  $Al^{3+}_{(aq)}$  y  $OH^-$  generados durante el proceso de electrocoagulación, pueden formar varias especie monoméricas como  $Al(OH)^{2+}$ ,  $Al(OH)_2^+$ ,  $Al_2(OH)_2^{4+}$ ,  $Al(OH)_4^-$ , así como especies poliméricas como  $Al_6(OH)_{15}^{3+}$ ,  $Al_7(OH)_{17}^{4+}$ ,  $Al_8(OH)_{20}^{4+}$ ,  $Al_{13}O_4(OH)_{24}^{7+}$ ,  $Al_{13}(OH)_{34}^{5+}$ , las cuales tienden a la formación de  $Al(OH)_3$  de acuerdo al incremento de pH<sup>48</sup>. El  $Al(OH)_3$  formado es como una suspensión gelatinosa, la cual puede remover los contaminantes del agua residual por la formación de complejos, por sorción, coprecipitación o por atracciones electrostáticas, seguido de coagulación.

De acuerdo al diagrama de especie-predominio<sup>49</sup> del aluminio (Figura 5) y de la concentración formada de Al en la muestra tratada ( $2.19 \times 10^{-3}$  Mol/L) partiendo de una concentración inicial del colorante IC de 100 mg/L, la especie predominante en el intervalo de pH inicial y final del tratamiento de EC, se formó principalmente  $Al(OH)_3$ . Esta distribución de especies de aluminio no cambia con respecto a las concentraciones formadas de Al en las muestras tratadas a concentraciones iniciales de IC de 200 y 300 mg/L.



**Figura 5.** Diagrama de distribución de especies del aluminio en función del pH

En varios casos, la cantidad de agente coagulante medido en solución representa menos del 1% en relación a la cantidad total de coagulante generado en el proceso de EC <sup>44</sup>. En las normas oficiales mexicanas referentes a agua residual (tratada o no tratada), no se establece un valor del límite máximo permisible (LMP) para el ion aluminio.

Se ha reportado que un problema que puede presentarse en la EC, es la formación de películas pasivas de óxidos de Al en la superficie de los electrodos evitando la disolución del mismo, lo que conduce a un consumo excesivo de electricidad, lo cual se evita limpiando adecuadamente los electrodos posterior a su uso <sup>22</sup>.

## CONCLUSIONES

La densidad de corriente es uno de los factores más importantes en el proceso de electrocoagulación, determinando la producción del coagulante, la formación y las características finales del floc. A mayor concentración inicial del colorante IC, se requiere una mayor densidad de corriente. El cambio en el pH durante el proceso se atribuye a la disolución del aluminio de los electrodos utilizados, formándose especies químicas de aluminio, principalmente el Al(OH)<sub>3</sub>. El proceso de electrocoagulación es un tratamiento eficiente en la remoción del colorante índigo carmín y de compuestos orgánicos recalcitrantes, disminuyendo la eficiencia al aumentar la concentración del colorante.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo financiero del Tecnológico Nacional de México, proyecto 5650.15-p.

## REFERENCIAS

1. García, S. S.; Eiband, M. S.G.; Vieira de Melo, J.; Martínez, H. C. A. Electrocoagulation and advanced electrocoagulation processes: A general review about the fundamentals, emerging applications and its association with other technologies. *Journal of Electroanalytical Chem.* **2017**, 801, 267–299.
2. Khelifi, E.; Gannoun, H., T. Y.; Bouallagui, H.; Hamdi, M. Aerobic decolorization of the indigo dye-containing textile wastewater using continuous combined bioreactors. *Journal of Hazardous Materials.* **2008**, 152, 683–689.
3. Riera, M. T.; Gutiérrez, C. B. Optimisation of the electrochemical and UV combined treatment to remove colour and organic halogenated compounds of textile effluents. *Separation and Purification Technology.* **2012**, 98, 375–382.
4. Fernández, E. M. P. Proyecto Ejecutivo de Planta de Tratamiento de Aguas Residuales para la Localidad de Santiago Sochiapa, Veracruz. 2010.
5. Ghanbari, F.; Moradi, M. A comparative study of electrocoagulation, electrochemical Fenton, electro-Fenton and peroxi-coagulation for decolorization of real textile wastewater: Electrical energy consumption and biodegradability improvement. *Journal of Environmental Chemical Engineering.* **2015**, 3, 499–506.
6. Martínez, H. C. A.; Brillas, E. Applied Catalysis B: Environmental decontamination of wastewaters containing synthetic organic dyes by electrochemical methods: A general review. *Applied Catalysis B: Environmental.* **2009**, 87, 105–145.
7. Merzouk, B.; Yakoubi, M.; Zongo, I.; Leclerc, J.; Paternotte, G.; Pontvianne, S.; Lapique, F. Effect of modification of textile wastewater composition on electrocoagulation efficiency. *Desalination.* **2011**, 275, 181–186.
8. Arenas, C. N.; Vasco, A.; Betancur, M.; Daniel, J. Removal of indigo carmine (IC) from aqueous solution by adsorption through abrasive spherical materials made of rice husk ash (RHA). *Process Safety and Environmental Protection.* **2017**, 106 (Ic), 224–238.
9. Paz, A.; Domínguez, J. M.; Carballo, J.; Pérez, M. J. Biological treatment of model dyes and textile wastewaters. *Chemosphere.* **2017**, 181, 168–177.
10. Li, H.-X., Xu, B., Tang, L., Zhang, J., & Mao, Z.-G. (2015). Reductive decolorization of indigo carmine dye with *Bacillus*. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 103, 30–37.
11. Cho, E. A.; Seo, J.; Lee, D.; Pan, J. G. Decolorization of indigo carmine by laccase displayed on *Bacillus subtilis* spores. *Enzyme and Microbial Technology.* **2011**, 49, 100–104.
12. Ganiyu, S. O.; Van Hullebusch, E. D.; Cretin, M.; Esposito, G.; Oturan, M. A. Coupling of membrane filtration and advanced oxidation processes for removal of pharmaceutical residues: A critical review. *Separation and Purification Technology.* **2015**, 156, 891–914.
13. Sebastian, M. S.; Cretescu, I.; Petrescu, S. An experimental study of indigo carmine removal from aqueous solution by electrocoagulation. *Desalination.* **2011**, 277, 227–235.
14. Elazzouzi, M.; Haboubi, K.; Elyoubi, M. S. Electrocoagulation flocculation as a low-cost process for pollutants removal from urban wastewater. *Chemical Engineering Research and Design.* **2017**, 117, 614–626.
15. Khadim, M. M.; Kane, C.; Oury, N. D.; Mar Diop, C.; Chauvet, F.; Comtat, M.; Tzedakis, T. Electrocoagulation process applied on pollutants treatment-experimental optimization and fundamental investigation of the crystal violet dye removal. *Journal of Environmental Chemical Engineering.* **2016**, 4(Part A), 4001–4011.
16. Aswathy, P.; Gandhimathi, R.; Ramesh, S. T.; Nidheesh, P. V. Removal of organics from bilge water by batch electrocoagulation process. *Separation and Purification Technology.* **2016**, 159, 108–115.

17. An, C.; Huang, G.; Yao, Y.; Zhao, S. Emerging usage of electrocoagulation technology for oil removal from wastewater: A review. *Science of the Total Environment*. **2017**, 579, 537–556.
18. Moussa, D. T.; El-Naas, M. H.; Nasser, M.; Al-Marri, M. J. A comprehensive review of electrocoagulation for water treatment: Potentials and challenges. *Journal of Environmental Management*. **2017**, 186, 24–41.
19. Moreira, F. C.; Boaventura, R. A. R.; Brillas, E.; Vilar, V. J. P. Electrochemical advanced oxidation processes: A review on their application to synthetic and real wastewaters. *Applied Catalysis B: Environmental*. **2016**, 1–112.
20. Nepo, J.; Gourich, B.; Cha, M.; Stiriba, Y.; Vial, C.; Drogui, P.; Naja, J. Electrocoagulation process in water treatment: A review of electrocoagulation modeling approaches. *Desalination*. **2017**, 404, 1–21.
21. Pérez, C. S.; Rivera, H. M.; Martín, D. A.; Gelover, S. S.; Piña, S. M.; Gómez, R. A.; Hernández, Y. C.; Cortes M. J. Comparación técnico-económica entre coagulación química y electrocoagulación para remover arsénico del agua. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, III. **2012**, 5–22.
22. Mansouri, K.; Ibrik, K.; Bensalah, N.; Abdel-Wahab, A. Anodic dissolution of pure aluminum during electrocoagulation process: Influence of supporting electrolyte, initial pH, and current density. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. **2011**, 50, 13362–13372.
23. García-Morales, M. A.; Roa-Morales, G.; Barrera-Díaz, C.; Balderas-Hernández, P.; Bilyeu B. An integrated electrocoagulation and ozonation process for removal of indigo carmine dye from denim processing effluent. *Sustain. Environ. Res*. **2013**, 23, 241-245.
24. Roa-Morales, G.; Barrera-Díaz, C.; Balderas-Hernández, P.; Zaldumbide-Ortiz, F.; Reyes-Perez, H.; Bilyeu, B. Removal of Color and Chemical Oxygen Demand Using a Coupled Coagulation-Electrocoagulation-Ozone Treatment of Industrial Wastewater that Contains Offset Printing Dyes. *J. Mex. Chem. Soc*. **2014**, 58, 362-368.
25. Juárez-Posadas, N. Determinación de la eficiencia de la electrocoagulación-peróxido de hidrógeno en el tratamiento de agua contaminada con metilparation. Bachelor Thesis. Universidad Autónoma del Estado de México. México, 2007.
26. Linares, H. I.; Barrera, D. C.; Roa-Morales, G.; Ureña, N. F. Remoción de contaminantes bio-refractarios en aguas residuales industriales mediante métodos electroquímicos. *Quivera*, **2008**, 10, 1-15.
27. Gu, Z.; Liao, Z.; Schulz, M.; Davis, J. R.; Baygents, J. C.; Farrell, J. Estimating dosing rates and energy consumption for electrocoagulation using iron and aluminum electrodes. *Ind. Eng. Chem. Res*. **2009**, 48, 3112–3117.
28. Stergiopoulos, D., Dermentzis, K., Giannakoudakis, P., & Sotiropoulos, S. (2014). Electrochemical decolorization and removal of indigo carmine textile dye from wastewater. *Global NEST Journal*, 16(3), 499–506.
29. Santiago, S. M. C. Tratamiento por electrocoagulación O<sub>3</sub>/UV para la degradación de indigo carmín presente en agua contaminada. Tesis de Grado, Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Toluca. México, 2016.
30. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. NMX-AA-008-SCFI-2011. Que establece el método de prueba para determinación del pH del agua. *Diario Oficial de la Federación (DOF)*: 2 de septiembre de 2011.
31. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. NMX-AA-093-SCFI-2000. Que establece el método de prueba para la determinación de la conductividad electrolítica en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. *Diario Oficial de la Federación (DOF)*: 18 de diciembre de 2000.
32. Gray, J.R., and Glysson, G.D. Proceedings of the Federal Interagency Workshop on turbidity and other sediment surrogates, April 30- May 2, 2002, Reno, Nevada. U.S. Geological Survey, 2003.
33. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. NMX-AA-045-SCFI-2001. Análisis de agua - Determinación de color platino cobalto en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba. *Diario Oficial de la Federación (DOF)*: 1 de agosto de 2001.
34. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. NMX-AA-030/2-SCFI-2011. Análisis de agua-Determinación de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba - parte 2 - Determinación del Índice de la Demanda Química de Oxígeno - Método de tubo sellado a pequeña escala. *Diario Oficial de la Federación (DOF)*: 27 de junio 2013
35. Paz, A.; Domínguez, J. M.; Carballo, J.; Pérez, M. J. Biological treatment of model dyes and textile wastewaters. *Chemosphere*. 2017, 181, 168–177.
36. Stepniowski, W. J.; Norek, M.; Budner, B.; Michalska-Domanska, M.; Nowak-Stepniowska, A.; Bombalska, A.; Bojar, Z. In-situ electrochemical doping of nanoporous anodic aluminum oxide with indigo carmine organic dye. *Thin Solid Films*. **2016**, 598, 60–64.
37. Liao, H.; Stenman, D.; Jonsson, M. Study of Indigo carmine as radical probe in photocatalysis. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. **2009**, 202, 86–91.
38. Elazzouzi, M.; Haboubi, K.; Elyoubi, M. S. Electrocoagulation flocculation as a low-cost process for pollutants removal from urban wastewater. *Chemical Engineering Research and Design*. **2017**, 117, 614–626.

39. Kobya, M.; Demirbas, E. Evaluations of operating parameters on treatment of can manufacturing wastewater by electrocoagulation. *Journal of Water Process Engineering*. **2015**, *8*, 64–74.
40. Holt, P. K. Electrocoagulation: Unravelling and Synthesising the Mechanisms Behind a Water Treatment Process. Ph. D. Dissertation, University of Sydney, 2002.
41. El-Ashtoukhy, E. S. Z. Removal of Indigo Carmine Dye from Synthetic Wastewater by Electrochemical Oxidation in a New Cell with Horizontally Oriented Electrodes. *Int. J. Electrochem. Sci*. **2013**, *8*, 846 – 858.
42. Faiqun, N. M.; Othman F.; Sohaili, J.; Fauzia Z. Removal of cod and turbidity to improve wastewater quality using electrocoagulation technique. *The Malaysian Journal of Analytical Sciences*. **2007**, *11*, 198-205.
43. Linares, H. I.; Martínez, M. V.; Barrera, D. C.; Pavón, R. S.; Bernal, M., L.; Lugo, L. V. Oxidación de materia orgánica persistente en aguas residuales industriales mediante tratamientos electroquímicos. *Avances en Ciencias e Ingeniería*. **2011**, *2*, 21-36.
44. Senghor, Fatou.; Drogui, P.; Seyhi, B. A Combined Electrocoagulation-Electroperoxidation Process for the Tertiary Treatment of Domestic Wastewaters. *Water Air Soil Pollut*. **2015**, *226*, 3-11.
45. García, G. A.; Martínez, M. V.; Martínez., C. I. G.; Almazán, S. P. T.; Castaneda, J. M.; Linares, H. I. Industrial wastewater treatment by electrocoagulation–electrooxidation processes powered by solar cells. *Fuel*. **2015**, *149*, 46–54.
46. Maamar M.; Naimi I.; Mkadem Y.; Souissi N.; Bellakhal N. Electrochemical oxidation of bromothymol blue: Application to textile industrial wastewater treatment. *J. Adv. Oxid. Technology*. **2015**, *18*, 105-113.
47. Mores, R.; Treichel, H.; Zakrzewski, C. A.; Kunz, A.; Steffens, J.; Dallago, R. M. Remove of phosphorous and turbidity of swine wastewater using electrocoagulation under continuous flow. *Separation and Purification Technology*. **2016**, *171*, 112–117.
48. Bazrafshan, E.; Mohammadi, L.; Ansari-Moghaddam A.; Mahvi, H. A. Heavy metals removal from aqueous environments by electrocoagulation process– a systematic review. *Journal of Environmental Health Science & Engineering*. **2015**, *13*, 1-16.
49. Puigdomenech, I. Program MEDUSA (Make Equilibrium Diagrams Using Sophisticated Algorithms); Royal Institute of Technology. Inorganic Chemistry. 10664. Stockolm Sweden. 2004. ignasi@inorg.kth.se.