

## Remoción de níquel del sistema Ni(II)-NH<sub>3</sub>-CO<sub>2</sub>-SO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O por electrocoagulación a escala de banco. Parte I

Nickel removing of the system Ni(II)-NH<sub>3</sub>-CO<sub>2</sub>-SO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O by electrocoagulation on an bank scale. Part I

Armando Rojas-Vargas<sup>1,2\*</sup> <https://orcid.org/0000-0002-8927-2023>

Aymara Ricardo-Riverón<sup>3</sup> <https://orcid.org/0000-0002-2014-4314>

María Elena Magaña-Haynes<sup>3</sup> <https://orcid.org/0000-0003-2023-8879>

Dania Del Toro-Alvarez<sup>4</sup> <https://orcid.org/0000-0002-5491-3943>

Crispin Sánchez-Guillen<sup>3</sup> <https://orcid.org/0000-0002-0869-6909>

<sup>1</sup>Empresa de Servicios Técnicos de Computación, Comunicaciones y Electrónica del Níquel (SERCONI), Cuba

<sup>2</sup>Centro Universitario Municipal Mayarí, Universidad de Holguín (UHO), Cuba

<sup>3</sup>Centro de Investigaciones del Níquel (CEDINIQ), Cuba

<sup>4</sup>Facultad de Ingeniería Química, Universidad de Oriente (UO), Cuba

\*Autor para la correspondencia: [arojas@eros.moa.minem.cu](mailto:arojas@eros.moa.minem.cu)

### RESUMEN

Se estudió la remoción de níquel del sistema Ni(II)-NH<sub>3</sub>-CO<sub>2</sub>-SO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O por electrocoagulación a escala de banco en un reactor cilíndrico con agitación, de 25 L de capacidad útil y dos pares de electrodos Al/Al. Se utilizó licor efluente del proceso de destilación de la planta productora de níquel en Punta Gorda, Cuba, y licor sintético preparado en el laboratorio. Los parámetros de operación fueron:

pH 8,6, densidad de corriente 8,3 mA/cm<sup>2</sup>, 40 min de electrólisis, 60 °C y concentración inicial de níquel disuelto entre 300 y 652 mg/L. Se obtuvo una eficiencia de remoción promedio de 99,67 (+/-0,06) % para los licores efluentes, resultando una concentración en equilibrio máxima de 7 mg/L. El análisis de la cinética de reacción sugiere que la remoción está determinada por la contribución simultánea de la resistencia de los mecanismos: nucleación, la difusión externa, la reacción química y un posible efecto autocatalítico por la ecuación de Roginskii – Shultz.

**Palabras clave:** cinética; electrocoagulación; níquel.

### **ABSTRACT**

The nickel removal from the Ni(II)-NH<sub>3</sub>-CO<sub>2</sub>-SO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O system was studied by bench-scale electrocoagulation in a stirred cylindrical reactor, with a useful capacity of 25 L and two pairs of Al/Al electrodes. Effluent liquor from the distillation process of the nickel-producer plant in Punta Gorda, Cuba, and synthetic liquor prepared in the laboratory was used. The operating parameters were: pH 8,6, density of current 8,3 mA/cm<sup>2</sup>, 40 min of electrolysis, 60 °C and initial concentration of dissolved nickel between 300 and 652 mg/L. An average removal efficiency of 99,67 (+/-0,06) % was obtained for the effluent liquor, resulting a maximum equilibrium concentration of 7 mg/L. The analysis of the reaction kinetics suggests that the removal is determined by the simultaneous contribution of the resistance of the mechanisms: nucleation, external diffusion, the chemical reaction and a possible autocatalytic effect by the Roginskii-Shultz equation.

**Keywords:** kinetic; electrocoagulation; nickel.

Recibido: 08/08/2021

Aceptado: 15/12/2021

## Introducción

La electrocoagulación se ha presentado como un método efectivo para la remoción de metales pesados de residuales líquidos de diferentes industrias. El proceso consiste en la desestabilización de compuestos suspendidos, emulsificados o disueltos en una celda electrolítica. La corriente eléctrica que fluye por los electrodos proporciona la fuerza electromotriz que provoca una serie de reacciones químicas, cuyo resultado final es la estabilidad de las moléculas contaminantes. Dichas moléculas se mueven a través del campo eléctrico aplicado y forman componentes hidrofóbicos, facilitando su remoción.<sup>(1-3)</sup>

Los factores que influyen en la eficiencia del proceso, con respecto a los parámetros de operación son: pH, densidad de corriente (I), tiempo de retención (t), temperatura (T) y conductividad de la disolución; y desde el punto de vista del diseño de la celda, están relacionados con el material, forma, arreglo y separación de los electrodos.<sup>(1,2,4,5,6,7,8,9,10)</sup>

Con relación al mecanismo del proceso, se han reportado las etapas fundamentales: (1) Reacciones electrolíticas en la superficie de los electrodos, (2) Formación de coagulantes en la fase acuosa, (3) Desestabilización y adsorción de los contaminantes sobre los coagulantes (coagulación), (4) Agregación de las partículas desestabilizadas y formación de flóculos (floculación), y (5) Remoción del material contaminante por medio de flotación o sedimentación. Se refiere además, la contribución de procesos que incrementan la eficiencia de remoción como la precipitación del hidróxido metálico, la reducción sobre la superficie catódica y la co-precipitación.<sup>(1,2,5,6,10,11)</sup>

La remoción del níquel por electrocoagulación se ha investigado a partir de una variedad de aguas residuales industriales y disoluciones sintéticas.<sup>(8,10-16)</sup>

En el caso de la industria del níquel en Cuba por la tecnología de lixiviación carbonato-amoniaca, en el licor efluente del proceso de destilación y obtención

del Carbonato Básico de Níquel, sistema Ni(II)-NH<sub>3</sub>-CO<sub>2</sub>-SO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O, se obtiene una concentración de níquel disuelto remanente entre 0,2 y 1,0 g/L y se encuentran varias especies iónicas con la composición según las proporciones:  $1,5 \leq \text{NH}_3/\text{CO}_2 \leq 2,0$ ;  $1,8 \leq \text{Ni}/\text{S} \leq 3,2$ ;  $10,4 \leq \text{CO}_2/\text{S} \leq 13,8$ , a un pH de 7,4 a 9,0.<sup>(17,18)</sup>

En estudio previo a escala de laboratorio, a través de un diseño experimental completo y el procedimiento de optimización de respuesta múltiple, a concentración inicial de níquel de 660 mg/L, se determinaron las condiciones más favorables para la remoción de níquel con el par de electrodos Al/Al. Se obtuvo un 95 % de eficiencia a 9,8 mA/cm<sup>2</sup>, 60 °C, pH 8,65 y 40 min de electrólisis.<sup>(10)</sup>

Posteriormente, a los valores definidos para las variables independientes y concentración de níquel entre 293 y 1356 mg/L, se determinó la cinética de reacción, la isoterma de adsorción, se caracterizó el precipitado por los métodos analíticos: ICP-OES, DXR y FTIR, y se analizó el mecanismo de remoción. Se propuso un modelo cinético el cual sugiere que el proceso está determinado por la contribución simultánea de la resistencia de los mecanismos: nucleación, difusión externa, la reacción química y un posible efecto autocatalítico.

A partir de esta experiencia, el propósito de este trabajo consistió en determinar a escala de banco, la eficiencia de remoción del níquel del sistema Ni(II)-NH<sub>3</sub>-CO<sub>2</sub>-SO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O por electrocoagulación y la cinética del proceso.

## **Materiales y métodos**

El licor alimentado a la celda de electrocoagulación, procedió de la empresa productora de níquel en Punta Gorda, Cuba. Se utilizó licor efluente (LE) de las columnas de destilación y licor sintético (LS), este se preparó con *Licor Producto*<sup>(18)</sup>, licor efluente y agua destilada (tabla 1).

**Tabla 1-** Caracterización del licor alimentado a la celda de electrocoagulación

Licor	pH	Concentración (g/L)						
		Ni	NH <sub>3</sub>	CO <sub>2</sub>	NH <sub>3</sub> /CO <sub>2</sub>	S	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>2-</sup>
LS <sup>1</sup>	8,67	0,319	1,48	1,18	1,25	0,03	0	0
	8,64	0,531	2,09	1,38	1,51	0,74	1,76	0
	8,65	0,966	3,49	3,35	1,04	0,11	0,01	0
LE <sup>2</sup>	8,66	0,300	0,55	0,13	4,23	2,16	3,83	1,73
	8,60	0,525	0,70	0,18	3,89	2,21	4,21	2,01
	8,59	0,652	1,35	0,97	1,40	2,30	5,08	1,42

<sup>1</sup>Licor sintético <sup>2</sup>Licor efluente de las columnas de destilación

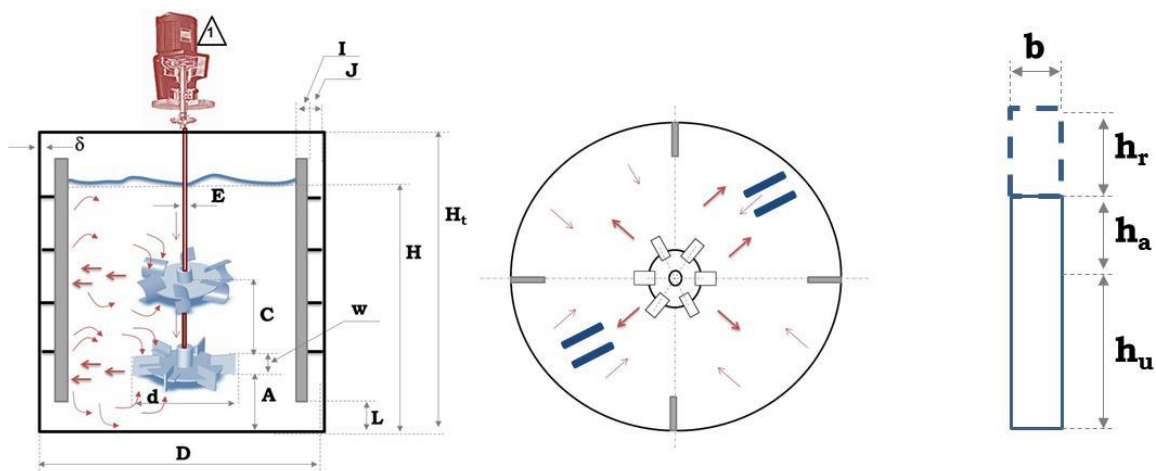
El pH se ajustó a la temperatura de 25 °C, utilizando una disolución amoniaca fuerte de concentración 12 M; o mezcla de ácido clorhídrico al 37 %, ácido nítrico al 61 % y agua destilada en la proporción 5:1:5. Luego se calentó en la plancha de laboratorio, en matraces kitasato taponados.

La electrocoagulación se realizó en un reactor cilíndrico de 25 L de capacidad útil, con 320 mm de diámetro (D) y altura total de 438 mm, con 4 tabiques verticales (baffles). Se instalaron dos impelentes, el superior es de turbina de hojas rectas y disco central; el inferior, turbina de hoja cóncava 180° y disco central, ambos separados 160 mm con los factores de forma a condiciones estándar (tabla 2).

**Tabla 2-** Factores de forma del electrocoagulador a escala de banco

D/d	H/d	I/D	W/d	A/d	Nh
3,0	3	0,1	0,2	1	6

Dispuso de dos pares de electrodos planos Al/Al dispuestos verticalmente, en paralelo, separados 10 mm, con las dimensiones: 150 mm de longitud activa, 100 mm de ancho y 2 mm de espesor, para un área efectiva (Ae) de 6·10<sup>-2</sup> m<sup>2</sup> y la composición química: 98,98 % Al; 0,5 % Mg; 0,33 % Fe; 0,114 % Si (figura 1).



**Fig. 1-** Esquema del reactor de electrocoagulación a escala de banco

Dimensiones (mm): Reactor:  $H_t$ : 438;  $H$ : 320;  $D$ : 320. Baffles:  $I$ : 32;  $J$ : 6;  $L$ : 107. Impelentes:  $C$ : 107;  $A$ : 107,  $d$ : 107,  $w$ : 21. Electrodo:  $b$ : 100, área útil ( $A_e$ )  $1,5 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$  (4 electrodos  $A_e$ :  $6 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$ )  $h_r$ : holgura para fijar los electrodos (mm),  $h_a = H_t - H$ . Se utilizó una fuente de corriente directa, 0,01-30 V, corriente máxima 10 A, alimentación 220 V ( $\pm 10\%$ ), 50 Hz y 250 W; así como multímetro, cronómetro y miscelánea de laboratorio.

Los análisis químico-físicos y la caracterización de los electrodos se realizaron en el laboratorio del Centro de Investigaciones del Níquel y en la Empresa Mecánica del Níquel, Cuba.<sup>(10)</sup>

Las variables dependientes fueron la remoción de níquel ( $X$ , %), el consumo de energía y de electrodo; las variables fijas, densidad de corriente de  $8,3 \text{ mA/cm}^2$ , pH 8,65, tiempo de retención 40 min,  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  y velocidad de agitación 100 rpm; variables independientes, composición iónica del licor de alimentación.

La superficie de los electrodos se preparó antes de realizar las corridas experimentales y cada ánodo se utilizó a lo sumo en dos experimentos.<sup>(10)</sup>

Se tomó una muestra de 250 mL de suspensión cada 10 min del reactor de electrocoagulación, se dejó sedimentar 12 h en matraces aforados y al cabo de ese tiempo, se tomó la alícuota necesaria para realizar el análisis químico. Se

determinó la capacidad de adsorción ( $Q_t$ ) o cantidad de adsorbato adsorbido por unidad de adsorbente ( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ) (1).<sup>(10,19,20)</sup>

$$Q_t = (C_0 - C_t) \cdot \frac{V}{\Delta M_F} \quad (1)$$

donde

$C_0$  ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) es la concentración inicial de níquel;

$C_t$  ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) concentración en cada intervalo de tiempo en la fase líquida;

V volumen de disolución;

$\Delta M_F$  (g) cantidad de metal que se disuelve de acuerdo a la Ley de Faraday (2).

$$\Delta M_F = \frac{M \cdot I \cdot t}{n \cdot F} \cdot L \cdot \frac{1}{60} \quad (2)$$

donde:

M ( $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$ ) es el peso molecular del [Al] 26,98  $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$ ;

I (A) intensidad de corriente;

t (min) tiempo de electrocoagulación;

n, número de electrones para el aluminio ( $n=3$ );

F, constante de Faraday (96487  $\text{c}\cdot\text{mol}^{-1}$ );

L, número de electrodos ánodos ( $L=2$ ). Cuando la duración del proceso es lo suficientemente prolongada,

$Q_t$  es constante y determina la carga o capacidad de adsorción en el equilibrio ( $Q_e$ ) experimental, correspondiente a la concentración ( $C_e$ ) en el equilibrio.

Se evaluó la calidad de ajuste de varios modelos cinéticos (ver tabla 3).<sup>(21,22,23)</sup>

**Tabla 3- Modelos cinéticos**

<b>Modelo</b>	<b>Ecuación cinética</b>	<b>No.</b>
Difusión externa	1-D	$f(I) = 1 - I$ (3)
	2-D	$f(I) = 1 - I^{\frac{1}{2}}$ (4)
	Capa límite	$f(I) = 1 - I^{\frac{2}{3}}$ (5)
Difusión interna	3-D de Ginstling y Brounshtein	$f(I) = 1 - \frac{2}{3} \cdot x - I^{\frac{2}{3}}$ (6)
	3-D Jander	$f(I) = \left(1 - I^{\frac{1}{3}}\right)^2$ (7)
	Difusión	$f(I) = 1 - 3 \cdot I^{\frac{2}{3}} + 2 \cdot I$ (8)
	2-D	$f(I) = I \cdot \ln(I) + x$ (9)
	1-D	$f(I) = x^2$ (10)
Nucleación	Avrami	$f(I) = [-\ln(I)]^{\frac{1}{2}}$ (11)
	Erofeév	$f(I) = [-\ln(I)]^{\frac{1}{3}}$ (12)
	Avrami – Erofeév	$f(I) = \ln \cdot \left[\ln\left(\frac{1}{I}\right)\right]$ (13)
	Johnson-Mell-Avrami-Erofeev-Kolgomorov	$f(I) = 5 \cdot [-\ln(I)]^{\frac{1}{5}}$ (14)
	1-D y crecimiento constante	$f(I) = \ln(x)$ (15)
	Aleatorio y crecimiento rápido	$f(I) = -\ln(I)$ (16)
Autocatálisis	Ecuación de Roginskii-Shultz	$f(I) = x^{\frac{2}{3}} \cdot I^{\frac{2}{3}}$ (17)
	Ecuación de Kolmogorov	$f(I) = x^{\frac{2}{3}} \cdot I^{\frac{4}{3}}$ (18)
	Autocatálisis	$f(I) = x \cdot I$ (19)
Reacción Química	Ley de potencia	$f(I) = 1 - I^{\frac{1}{3}}$ (20)

$I = (1 - x)$   $x$ : Conversión  $I$ : fracción no convertida

Los parámetros se ajustaron aplicando el StatGraphic 5.1 y el Microsoft Excel; la mejor calidad de ajuste se decidió por el mayor coeficiente de determinación ( $R^2$ ).

## Resultados y discusión

### Eficiencia de remoción de níquel

La eficiencia de remoción de níquel por electrocoagulación alcanzó un promedio de 99,65 (+/-0,07) % al procesar los licores efluentes del proceso industrial; sin



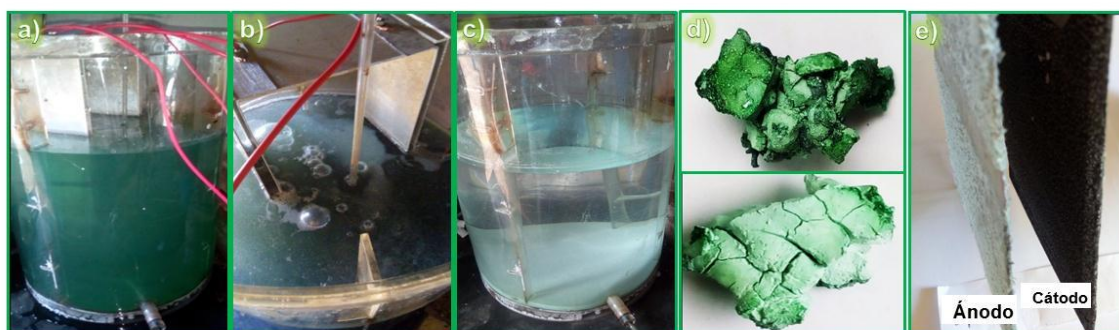
embargo, al utilizar licor sintético la remoción fue inferior y disminuyó con el incremento del níquel en disolución (tabla 4).

**Tabla 4-** Eficiencia de remoción del níquel por electrocoagulación a escala de banco  
8,3 mA/cm<sup>2</sup>, 60 °C, 40 min y pH=8,64+/-0,033

<b>Ni (mg/L)</b>	300	525	652	319*	531*	966*
<b>X (%)</b>	99,7	99,6	99,7	98,1	96,6	78,4

\* Licor sintético

Las transformaciones características del proceso de electrocoagulación para el sistema Ni(II)-NH<sub>3</sub>-CO<sub>2</sub>-SO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O se aprecian en la figura 2.



**Fig. 2-** Remoción del níquel disuelto por electrocoagulación a escala de banco a) Licor inicial verde-azul b) El licor se torna grisáceo, se forman burbujas y espumas c) Clarificación d) Precipitado seco a 60 °C e) Depósitos sobre los electrodos

Los amino-complejos de níquel(II) aportan un color verde-azul característico (a); pero en el transcurso de la electrólisis, debido a la disolución anódica del aluminio y a la precipitación del níquel, la suspensión se torna de gris claro a gris oscuro, así como alrededor y entre los electrodos se forma espuma por la reacción de evolución de hidrógeno en el cátodo (b). Finalizado el proceso, sedimenta un sólido el cual, al filtrarlo y secarlo, adquiere tonalidades verde, azul, gris y blanco (d). Se percibió el desprendimiento de gases irritantes. Sobre la superficie del ánodo y del cátodo se apreciaron depósitos (e).<sup>(10)</sup>

## Cinética de remoción de níquel

Los resultados experimentales se ajustaron a los modelos cinéticos presentados en la tabla 3 y posteriormente, al modelo tiempo de conversión (t) que se propuso en el estudio previo a escala de laboratorio (21), (22).

$$t = \left\{ \begin{array}{l} a \cdot \left[ 5 \cdot [-\ln(1-x)]^{\frac{1}{5}} \right] + b \cdot \left[ 1 - (1-x)^{\frac{1}{2}} \right] \\ + c \cdot \left[ 1 - (1-x)^{\frac{1}{3}} \right] + d \cdot \left[ x^{\frac{2}{3}} \cdot (1-x)^{\frac{2}{3}} \right] \end{array} \right\} \cdot [Ni]^e \cdot [S]^f \cdot [CO_2]^g \cdot [Al]^h \quad (21)$$

$$t^n = \left\{ \begin{array}{l} a \cdot \left[ 5 \cdot [-\ln(1-x)]^{\frac{1}{5}} \right] + b \cdot \left[ 1 - (1-x)^{\frac{1}{2}} \right] \\ + c \cdot \left[ 1 - (1-x)^{\frac{1}{3}} \right] + d \cdot \left[ x^{\frac{2}{3}} \cdot (1-x)^{\frac{2}{3}} \right] \end{array} \right\} \cdot [Ni]^e \cdot [S]^f \cdot [CO_2]^g \cdot K_{Al} \quad (22)$$

El tiempo de conversión (t, min) es el tiempo de retención de electrocoagulación necesario para obtener una conversión (x, fracción masa) o remoción de níquel determinada. Depende de la concentración de los componentes en disolución: níquel [Ni] (mg/L); azufre [S] (g/L); dióxido de carbono [CO<sub>2</sub>] (g/L); y de la masa de aluminio [Al] en cada instante de acuerdo a la Ley de Faraday.

Por otra parte, las constantes (e), (f), (g) son los exponentes de la concentración de níquel, azufre y dióxido de carbono respectivamente. El coeficiente (K<sub>AL</sub>) se utiliza para determinar la masa de aluminio disuelto, depende básicamente de la corriente suministrada al proceso. El exponente del tiempo de conversión (n) posee valor numérico positivo, refleja el efecto favorable y la alta dependencia que tiene la remoción de la formación del hidróxido de aluminio [Al(OH)<sub>3</sub>], el agente principal de la floculación y formación de agregados.

Dicho modelo sugiere que la remoción del níquel está determinada por la contribución simultánea de la resistencia de los mecanismos: El proceso de nucleación y cristalización (a) por la ecuación de Kolgomorov-Johnson-Mehl-Avrami-Erofeev; la difusión externa (b) según el modelo de difusión bidimensional (2-D); la reacción química (c) por el modelo de partículas esféricas según la Ley

de Potencia. Además, se estima un posible efecto autocatalítico según la ecuación de Roginskii-Shultz (d).

Las constantes del modelo (8) se determinaron para los licores efluentes del proceso industrial y conjuntamente con los licores sintéticos (tabla 5).

**Tabla 5-** Coeficientes del modelo (22) de tiempo de conversión

	<i>n</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>	<i>g</i>	$k_{Al} \cdot 10^{-2}$
<sup>1</sup>	0,1574	0,7060	4,2337	3,8147	10,8039	0,0770	0	0	8,8040
<sup>2</sup>	0,0776	1,1808	2,7277	0,9881	10,1434	0,0755	-0,0100	-0,0083	6,9948

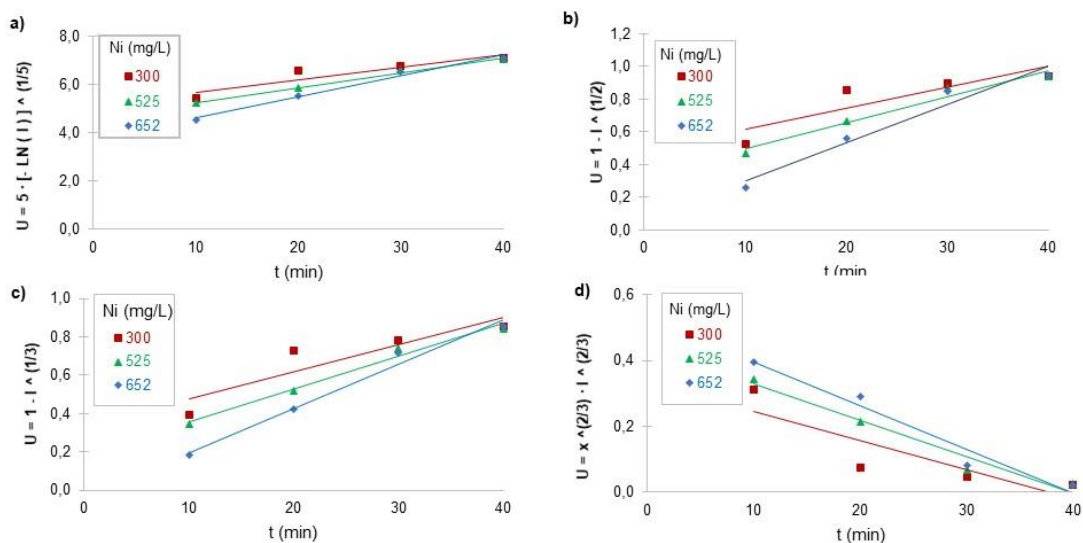
<sup>1</sup>Licor efluente; <sup>2</sup>Licor efluente y licor sintético conjuntamente

El modelo fue representativo de los datos con un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 99,59 % y coeficiente ajustado por los grados de libertad ( $R^2$  g.l.) de 99,44 % para los licores efluentes de la industria; mientras que para el tratamiento conjunto de los datos, tanto de los licores sintéticos como efluentes, se obtuvo ( $R^2$ ) 99,63 % y ( $R^2$  g.l.) 99,44 %.

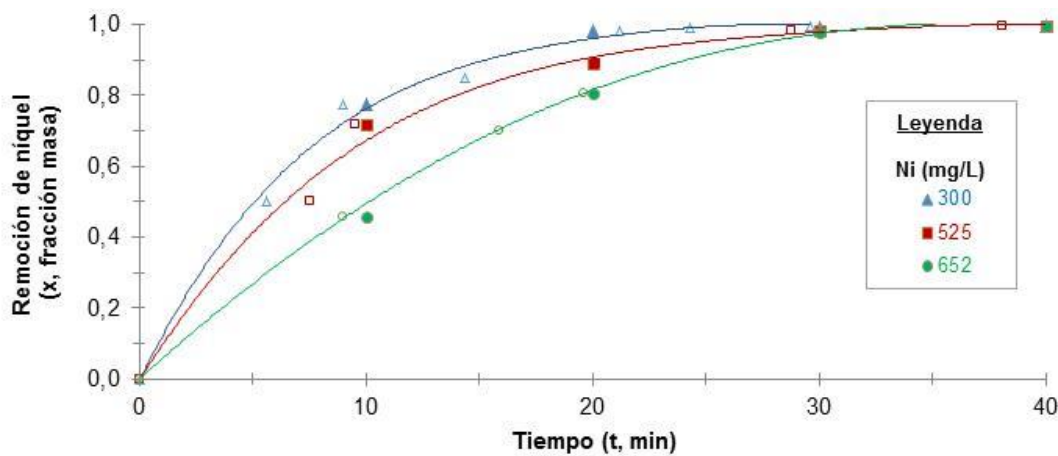
De acuerdo a los coeficientes del modelo (22) que se muestran en la tabla 5, se aprecia un predominio de la resistencia a la reacción química y su contribución autocatalítica (c, d); en cambio, la resistencia a la difusión interna no ejerció un efecto estadísticamente significativo sobre la remoción para un 95 % de nivel de confianza. Luego, se puede referir que los resultados cinéticos y de mecanismo que se obtuvieron a escala de laboratorio, son consistentes con los que se presentan a escala de banco.

Para los licores efluentes del proceso, a concentración de níquel de 300 mg/L, el modelo de nucleación tuvo mejor calidad de ajuste ( $R^2$ : 98,67 %); pero cuando aumenta la concentración (525 y 652 mg/L) son más representativos de los datos, por su orden, reacción química > difusión externa  $\approx$  autocatálisis (95,67 %  $\leq R^2 \leq$  98,28 %) (figura 3).

En la figura 4 se representa la remoción de níquel (fracción masa) en función del tiempo, los valores experimentales (marcadores rellenos) y predichos (reellenos en blanco).



**Fig. 3-** Representación de los modelos cinéticos a) nucleación, b) difusión externa, c) reacción química d) autocatálisis. Fracción no convertida (I) y tiempo (t)



**Fig. 4-** Remoción de níquel por electrocoagulación, a una densidad de corriente 8,3 mA/cm<sup>2</sup>, 60 °C y pH 8,64 (+/-0,033). Licor efluente industrial

## Conclusiones

1. Se obtuvo una eficiencia promedio de remoción del níquel por electrocoagulación a escala de banco de los licores efluentes del proceso industrial, sistema Ni(II)-NH<sub>3</sub>-CO<sub>2</sub>-SO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O, de un 99,65 (+/-0,07) % en el intervalo definido para las variables independientes.
2. El modelo cinético del tiempo de conversión fue representativo de los datos experimentales por su calidad de ajuste; y sugiere que el proceso está determinado por la contribución simultánea de la resistencia de los mecanismos: nucleación, difusión externa, la reacción química y se estima un posible efecto autocatalítico.
3. De acuerdo a los coeficientes del modelo, se considera que el proceso se encuentra probablemente bajo el control de la reacción química y su contribución autocatalítica.

## Nomenclatura

F: Constante de Faraday (96487 C·mol<sup>-1</sup>)

I: Intensidad de corriente (A)

M: Peso molecular del material de electrodo (g·mol<sup>-1</sup>). Para Al: 26,98 g/mol

n: Número de electrones, para aluminio (n=3)

t: Tiempo de electrocoagulación (min)

U: Tensión (V)

V<sub>D</sub>: Volumen útil de la celda de electrocoagulación (25 L)

X: Remoción de Ni (%)

ΔM<sub>exp</sub>: Pérdida de peso experimental de los electrodos (g)

ΔM<sub>F</sub>: Cantidad de metal que se disuelve de acuerdo a la Ley de Faraday (g)

## Referencias bibliográficas

1. AL-QODAH, Z., AL-SHANNAG, M., *et al.* Free radical-assisted electrocoagulation processes for wastewater treatment. *Environ. Chem. Lett.* [en línea]. 2018, **16**(3). 695-714. ISSN: 1610-3661. DOI:10.1007/s10311-018-0711-1
2. NEPO, N.J., GOURICH, B., *et al.* Electrocoagulation process in water treatment: A review of electrocoagulation modeling. *Desalination* [en línea]. 2017, 404. 1–21. ISSN: 0011-9164. DOI:10.1016/j.desal.2016.10.011
3. MAGAÑA-IRONS, L., ROJAS-VARGAS, A., *et al.* Remoción de contaminantes del residual lácteo por electrocoagulación con electrodos de aluminio. *Tecnología Química* [en línea]. 2020, **40**(1). 19-36. ISSN: 2224-6185. DOI:10.1590/2224-6185.2020.1.%25x
4. YASIR-ALJABERI, F., MOHAMMEDB, W.T. Analyzing the removal of lead from synthesis wastewater by electrocoagulation technique using experimental design. *Desalination and Water Treatment.* [en línea]. 2018, **111**. 286-296. ISSN: 1944-3986. DOI:10.5004/dwt.2018.22208
5. DIDAR, S.M. Electrocoagulation (EC) technology for wastewater treatment and pollutants removal. *Sustain. Water. Resour. Manag.* [en línea]. 2017, **5**(1). 359-380. ISSN: 2363-5045. DOI:10.1007/s40899-017-0152-1
6. GARCÍA-SEGURA, A., *et al.* Electrocoagulation and advanced electrocoagulation processes: A general review about the fundamentals, emerging applications. *J. Electroanal. Chem.* [en línea]. 2017, **801**. 267–299. ISSN: 1572-6657. DOI:10.1016/j.jelechem.2017.07.047

7. AL-QODAH, Z., AL-SHANNAG, M. Heavy metal ions removal from wastewater using electrocoagulation processes. *Sep. Sci. Technol.* [en línea]. 2017, **52**(17). 2649-2676. ISSN: 1520-5754. DOI:10.1080/01496395.2017.1373677
8. VLACHOU, M., *et al.* Effect of various parameters in removing Cr and Ni from model wastewater by using electrocoagulation. *Global NEST J.* [en línea]. 2013, **15**(4). 494-503. ISSN: 2241-777X.
9. DERMENTZIS, K., VALSAMIDOU, E., LAZARIDOU, A. Nickel removal from wastewater by electrocoagulation. *J. Eng. Sci. Tech. Rev.* [en línea]. 2011, **4**(2). 188-192. ISSN: 1791-2377. DOI:10.25103/jestr.042.12.
10. ROJAS-VARGAS, A., RICARDO-RIVERON, *et al.* Remoción de níquel por electrocoagulación del sistema Ni(II)-NH<sub>3</sub>-CO<sub>2</sub>-SO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O con electrodos de aluminio. *Tecnología Química* [en línea]. 2020, **40**(2). ISSN: 2224-6185.
11. SABEDOT-PERTILE, T., JONKO, E. Treatment of hydrocyanic galvanic effluent by electrocoagulation: Optimization of operating parameters. *Korean J Chem Eng* [en línea]. 2017, **34**(10). ISSN: 1975-7220. DOI:10.1007/s11814-017-0178-y
12. SHUNXI ZHANG, XIAOHONG YANG, QUNPENG CHENG. Treatment of Wastewater Containing Nickel by Electrocoagulation Process. *Environ. Eng. Sci.* [en línea]. 2017, **34**(12). 861–871. ISSN: 1557-9018, DOI:10.1089/ees.2016.0621
13. BEYAZIT, N. Copper (II), Chromium (VI) and Nickel (II) Removal from Metal Plating Effluent by Electrocoagulation. *Int. J. Electrochem. Sci.* [en línea]. 2014, **9**(8). 4315 – 4330. ISSN: 1452-3981.
14. LEKHLIF, B., OUDRHIRI, L., ZIDANE, F., *et al.* Study of the electrocoagulation of electroplating industry wastewaters charged by nickel (II) and chromium (VI). *J. Mater. Environ. Sci.* 2014, **5**(1). 111-120. ISSN: 2028-2508.
15. KALEEM, M. K, *et al.* Efficiency of Aluminum and Iron Electrodes for the Removal of Heavy Metals [(Ni (II), Pb (II), Cd (II)] by Electrocoagulation Method. *J. Korean Chem. Soc.* [en línea]. 2013, **57**(3). 316-321. ISSN: 1229-5949. DOI: 10.5012/jkcs.2013.57.3.316.

16. MANSOUR, S. E; HASIEB, I. H. Removal of Nickel from drinking water by electrocoagulation technique using alternating current. *Curr. Res. Chem.* [en línea]. 2012, **4**(2). 41-50. ISSN: 2348-5221. DOI: 10.3923/crc.2012.41.50
17. ROJAS-VARGAS, A., *et al.* Medición del pH durante la destilación del licor producto del proceso Caron (III). *Tecnología Química* [en línea]. 2012, **32**(2). 177-185. ISSN: 2224-6185. DOI:10.1590/2224-6185.2012.2.%25x
18. ROJAS-VARGAS, A., *et al.* Lixiviación carbonato amoniacal: estimación del níquel disuelto en el efluente de destilación. *Revista de Metalurgia* [en línea]. 2019, **55**(3). 1-11. ISSN-L: 0034-8570. DOI:10.3989/revmetalm.149
19. VASUDEVAN, S., LAKSHMI, J., SOZHAN, G. Simultaneous removal of Co, Cu, and Cr from water. *Toxicol. Environ. Chem.* [en línea]. 2012, **94**(10). 1930-1940. ISSN: 1029-0486. DOI:10.1080/02772248.2012.742898
20. IDOWU-ADEOGUN, A.; BABU-BALAKRISHNAN, R. Kinetics, isothermal and thermodynamics studies of electrocoagulation removal of basic dye rhodamine B from aqueous solution using steel electrodes. *Appl Water Sci*, [en línea]. 2017, **7**. 1711-1723. ISSN: 2190-5495. DOI 10.1007/s13201-015-0337-4.
21. ROMERO, M. M. R. Expresiones analíticas de los modelos cinéticos para la reducción a temperatura programada en la ecuación generalizada de kissinger. *Minería y Geología*, [en línea]. 2004, 78-86. ISSN: 1993-8012.
22. CANTOS, G.M.A. *et al.* Guachapelí contra Marabú y la cinética de sus pirólisis. *Rev. Cubana Quím.* [en línea]. 2017, **29**(3). 362-378, e-ISSN: 2224-5421.
23. LUO SHI YONG, *et al.* Computer prediction on solid / solid reaction kinetic. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China.* [en línea]. 2001. **11**(3), 466-470. ISSN: 1003-6326. DOI: 1003-6326(2001) 03-0466-05.

### **Conflicto de interés**

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.



## **Contribución de los autores**

Armando Rojas-Vargas: diseño y desarrollo, análisis y expresión de los resultados.

Aymara Ricardo-Riverón: control y ejecución de los análisis químicos.

María Elena Magaña Haynes: desarrollo

Dania Del Toro Álvarez: diseño y revisión crítica.

Crispín Sánchez Guillen: diseño y revisión crítica.