

# Estudio de la factibilidad del proceso de electrocoagulación para la obtención de sólidos a partir de la vinaza

## Feasibility study of the electrocoagulation process to obtain solids from vinasse

Elaine Ojeda-Armaignac, Romelia Hing-Cortón y Yudith Gonzalez-Díaz

Facultad de Ingeniería Química, Universidad de Oriente, Sede Mella, Avenida de las América s/n, Apartado Postal 90500, Santiago de Cuba, Cuba, Teléfono 641695. eoa@fiq.uo.edu.cu.

Recibido: 5 de diciembre de 2012.

Aceptado: 12 de marzo de 2012.

Palabras clave: vinaza, electrocoagulación, diseño de experimento factorial, consumo de energía.

Key words: spent wash, electrocoagulation, factorial experimental design, energy consumption.

**RESUMEN.** Los experimentos de electrocoagulación se desarrollaron para la separación de los componentes sólidos de la vinaza que se utilizan como inhibidores de la corrosión. La vinaza se obtiene como residuo del proceso de destilación del alcohol a partir de las mieles finales de la caña de azúcar que procede del Complejo Agroindustrial Urbano Noris de la provincia de Holguín. El objetivo principal de la investigación fue evaluar la factibilidad del proceso de electrocoagulación para la separación de sólidos a partir de la vinaza. Los efectos de la intensidad de corriente, pH, el tiempo de electrólisis y sus interacciones, se investigaron mediante un diseño de experimento factorial  $3^3$ . Como variables de respuesta se analizaron: la cantidad de sólidos obtenidos y el consumo de energía del proceso. Se comprobó que las tres variables son significativas sobre las variables de respuesta. La intensidad de corriente es la de mayor relevancia en cuanto a los sólidos obtenidos y el tiempo de electrólisis en cuanto al consumo de energía. En la determinación de las condiciones óptimas de operación, se consideró el procedimiento de optimización de respuesta múltiple. La mejor conveniencia y el óptimo se alcanzaron para el pH 8,7, la intensidad de corriente de 11 A y el tiempo de electrólisis de 5 min, con los que se obtuvo la mayor cantidad de sólidos y el menor consumo de energía. Para dichas condiciones, se realizó el cálculo económico preeliminar, teniendo en cuenta: el consumo de energía, el gasto del material de los electrodos y el consumo de reactivos químicos; con lo que se obtuvo el correspondiente costo de operación el cual ascendió a \$ 488,74 · 10<sup>-3</sup>/kg.

**Abstract.** The electrocoagulation experiments were conducted process for the removal of the solid components of the spent wash which are used as corrosion inhibitors. The spent wash is obtained as a residue from the alcohol distillery process from sugar cane molasses coming from Urbano Noris Agro-industrial Complex in Holguin. The main objective of this research was to assess the feasibility of the electrocoagulation process vinasse. The effects of: current intensity, pH, electrolysis time, and their interactions, were studied by using a factorial  $3^3$  experimental design. As response variables were analyzed: amount of solids obtained and energy consumption of the electrocoagulation process; confirming that the three influence variables studied have a tremendous on the response variables, the current intensity is of major relevance to the solids obtained and the electrolysis time in relation to energy use. For determining the optimum operating conditions was considered the procedure of multiple response optimizations. The best advisability and the optimum were reached for pH 8.7, current intensity of 11 A, and electrolysis time of 5 min, with those who received the highest amount of solids with the lowest energy consumption. For these conditions, the economic calculus was carried out, taking into account: energy consumption, cost of the electrode and chemical, obtaining an operational cost of \$ 488, 74 · 10<sup>-3</sup>/kg.

## INTRODUCCIÓN

Uno de los métodos que se utilizan en la prevención de la corrosión es el uso de inhibidores, los cuales son sustancias que añadidas en pequeñas cantidades al medio corrosivo disminuyen apreciablemente la velocidad de corrosión. Algunos tipos de

residuos contienen componentes cuyas propiedades inhibitorias de la corrosión contribuyen a la solución de este problema que afecta a nivel mundial. Un ejemplo lo constituyen los efluentes (vinaza) de la industria alcoholera, la cual sin embargo, los vierte al medio ambiente, hecho que trae consigo una elevada contaminación de los ecosistemas donde se vierten.

La vinaza es un residuo agresivo, entre sus características más relevantes se destacan: pH bajo, elevada carga orgánica DQO ([50 000 – 100 000 mg/L], DBO [45 000 – 65 000 mg/L]), alta temperatura y presencia de compuestos nitrogenados entre los que se encuentran: aminoácidos, aminas y vitaminas.<sup>1-7</sup>

La valoración de los residuos industriales resulta una alternativa atractiva, que permite, al mismo tiempo, su tratamiento adecuado, así como su apropiado aprovechamiento mediante un valor agregado.

Los métodos electroquímicos se reportan como procesos adecuados para el tratamiento de tales residuos.<sup>8-12</sup> La electrocoagulación es una opción atractiva, económica y ambiental que reúne, los patrones de descarga del tratamiento de las aguas residuales, así como los requerimientos de conformidad. Entre los beneficios clave de la electrocoagulación se destacan: los bajos costos de operación, que son menores comparativamente que los de los procesos convencionales usando polímeros, equipos simples y de fácil operación, eliminación de requerimientos de almacenamiento y uso de productos químicos, generación de lodos más compactos y en menor cantidad.<sup>13</sup>

La aplicación de tales procesos se realiza por diferentes técnicas: electrooxidación, electrocoagulación y electrofloculación. En la presente investigación se desarrolló la electrocoagulación de la vinaza. En ella, el sólido que se separa queda suspendido o disuelto y constituye el contaminante fundamental de este residuo, el cual se estudiará como posible inhibidor de la corrosión. La operación se ejecuta usando una variedad de electrodos geométricos de aluminio, por los cuales fluye la corriente necesaria para que comiencen a reaccionar con el medio.<sup>14-18</sup> El coagulante se genera *in situ*, por oxidación electrolítica del ánodo al pH apropiado, el hidróxido insoluble que se forma facilita la aglomeración o coagulación de los sólidos presentes, ya que remueve una variedad de contaminantes de la fase acuosa. Entre las variables que influyen en el proceso se encuentran: la intensidad de corriente, el pH y el tiempo de electrólisis.

El propósito de la presente investigación consistió en determinar las condiciones de factibilidad para realizar el proceso de electrocoagulación de la vinaza con vistas a la obtención de sólidos mediante el diseño de experimento factorial 3<sup>3</sup>, que a su vez permita analizar el efecto de las variables intensidad de corriente, pH y tiempo de electrólisis y sus interacciones sobre la cantidad de sólidos obtenidos y el consumo de energía como variables de respuesta. Otro aspecto de la investigación fue aplicar el procedimiento de optimización de respuesta múltiple para alcanzar un máximo de sólidos removidos con un consumo mínimo de energía.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

### **Materiales**

El residuo que fue procesado en la investigación es la vinaza, el cual se obtiene en la destilación alcohólica de las mieles finales de la caña de azúcar, que se lleva a cabo en el complejo azucarero Urbano Noris de la provincia de Holguín. Durante el proceso fabril, el residuo se vierte directamente en un conducto que lo descarga en una laguna de oxidación, una vez determinadas sus características físico-químicas fundamentales (Tabla 1).

En su electrocoagulación a escala de laboratorio se utilizó una celda electrolítica, constituida por un reactor intermitente de vidrio de 350 mL a temperatura ambiente, equipada con dos electrodos planos de aluminio dispuestos verticalmente y separados 15 mm uno del otro, cuyas dimensiones totales fueron: 68 mm de largo, 40 mm de ancho y 1 mm de espesor para un área total efectiva de 56,56 cm<sup>2</sup>. Para el suministro de energía al sistema, se utilizó una fuente de corriente directa provista para regular la corriente y el voltaje aplicado. Provista de un amperímetro y un voltímetro regular conectados en serie y paralelo respectivamente. Los electrodos fueron conectados en paralelo (Fig. 1).

Los reactivos químicos que se emplearon en la realización de los ensayos experimentales para el ajuste del pH inicial de la vinaza fueron los siguientes: ácido sulfúrico, 98 % e hidróxido de sodio 97 %.

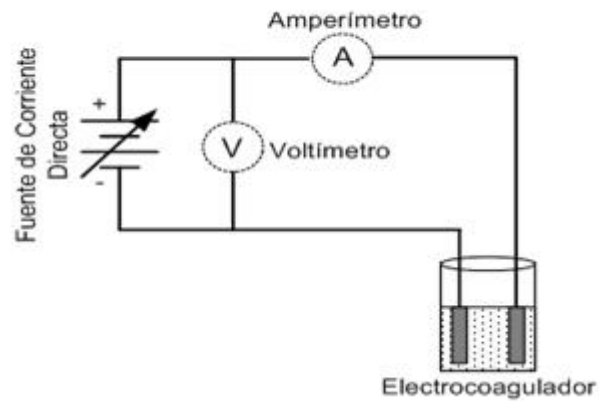
## Métodos

### Procedimiento para la electrocoagulación de la vinaza

La vinaza a temperatura ambiente y pH ajustado previamente con un volumen de 400 mL, (volumen de tratamiento), se evacua en el electrocoagulador experimental (Fig.1). El sistema se energiza mediante la fuente de corriente directa a una intensidad de corriente dada. A medida que transcurre el proceso, el volumen de espuma se incrementa. Al transcurrir el tiempo prefijado, se abre el circuito, se separa la espuma y se evacua la suspensión remanente a un recipiente. A continuación, se pone a secar la espuma en la estufa a 40 °C durante 72 h. La suspensión por su parte se centrifuga y los sólidos suspendidos se separan en forma de lodo, el cual se pone a secar en la estufa a la misma temperatura y durante el mismo tiempo que la espuma. Posteriormente, los sólidos secos se pesan y envasan.

**Tabla 1.** Características físico-químicas de la vinaza

Parámetros	Magnitud
Demanda química de oxígeno (mg/L)	82 400 ± 5000
Demanda bioquímica de oxígeno (mg/L)	53 571 ± 5000
Sólidos totales (mg/L)	32 289 ± 2000
Sólidos disueltos totales (mg/L)	31 235 ± 1500
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	1 054 ± 20
Proteínas solubles (mg/L)	3 150 ± 70
Aminoácidos (mg/L)	227 000 ± 5000
Conductividad eléctrica (mS/cm)	7,39
Viscosidad relativa (Pa · s)	1,167 ± 0,06
Densidad (g · mL <sup>-1</sup> )	1,027 ± 0,02
pH	4,5 ± 0,7



**Fig. 1.** Esquema del circuito eléctrico de la instalación experimental de electrocoagulación.

### Diseño de experimentos

Para la realización de los ensayos experimentales se empleó el diseño de experimento factorial  $3^k$ , de manera que los datos que se obtuvieran se procesaran adecuadamente y con un análisis objetivo se conocieran los valores de los factores que presentan la mejor respuesta. Además, se estimó la superficie de respuesta en la vecindad del máximo (o mínimo) local, para que se comprendan los efectos de los factores estudiados en la cantidad de sólidos obtenidos a partir de la electrocoagulación de la vinaza.<sup>13,17</sup>

El análisis estadístico se realizó por medio del programa Statgraphics Plus 5.1. Las variables seleccionadas para el proceso (Tabla 2) fueron: densidad de corriente, pH y tiempo de electrocoagulación en tres niveles.

**Tabla 2.** Niveles de las variables utilizadas en el experimento.

Variable independiente	Inferior	Nivel central	Superior
$X_1$ : (Intensidad de la corriente [A])	3	7	11
$X_2$ : (pH)	3	6	9
$X_3$ : (Tiempo de exposición [min])	3	5	7

### Metodología para el cálculo económico preliminar

El análisis de los costos se realizó en las condiciones de operación factibles técnicamente, teniendo en cuenta: consumo de energía, consumo de reactivos para ajustar pH, material y desgaste de los electrodos. Las ecuaciones se muestran a continuación.<sup>15</sup>

$$\Delta M_T = \frac{M \cdot I \cdot t}{n \cdot F} \quad (1)$$

$$\varphi = \frac{\Delta M_T}{\Delta M_{Ex}} \quad (2)$$

$$S_{ee} = \frac{N \cdot F \cdot U}{3600 \cdot M \cdot \phi} \quad (3)$$

$$C_{\text{energía}} = \frac{I \cdot U \cdot t}{60} \quad (4)$$

$$C_o = a \cdot C_{\text{energía}} + b \cdot C_{\text{electrodo}} + c \cdot C_{\text{reactivo}} \quad (5)$$

donde:

n Número de electrones.

F Constante de Faraday ( $96487 \text{ c} \cdot \text{mol}^{-1}$ ).

I Intensidad de corriente (A).

t Tiempo de electrocoagulación (s).

M Peso molecular del aluminio ( $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$ ) = 26,9815

$\Delta M_t$  Cantidad teórica de aluminio que se disuelve de acuerdo con la Ley de Faraday (g).

U Voltaje (V).

$\phi$  Eficiencia de la corriente (%).

$\Delta M_{\text{exp}}$  Pérdida de peso experimental de los electrodos durante el proceso de electrocoagulación (g).

$S_{ee}$  Consumo de energía eléctrica específica (kW.h/g de electrodo consumido).

a Costo de la energía eléctrica (\$/kW).

b Costo del electrodo (\$/kg).

c Costo del reactivo para regular pH (\$/kg).

$C_{\text{energía}}$  Consumo de energía (kW).

$C_{\text{electrodo}}$  Consumo del electrodo (kg).

$C_{\text{reactivo}}$  Consumo de reactivo regulador de pH (kg).

$C_o$  Costo de operación (\$/kg).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Diseño de experimentos

Se realizó el diseño de experimento mediante el software Statgraphics Plus 5.1, el análisis incluyó los diagramas de Pareto, análisis de las variables independientes y sus interacciones y gráfica de superficie respuesta (Tabla 3). Se determinó la cantidad óptima de los sólidos obtenidos y el consumo de energía como variables de respuesta.

### Diagrama de Pareto y gráfica de superficie de respuesta estimada

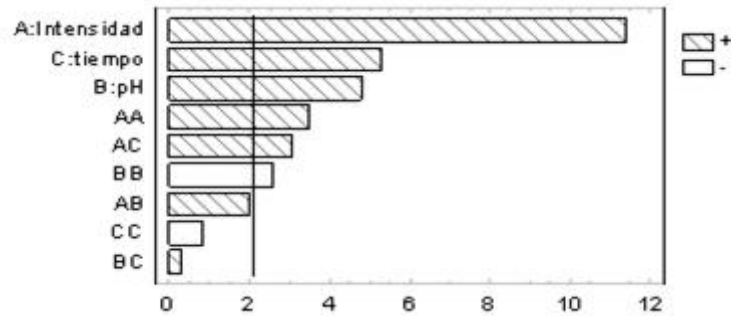
#### Análisis de la variable de respuesta sólidos totales

Según Pareto (Fig. 2), se apreció que la intensidad de corriente, el tiempo, el pH, y la interacción intensidad-tiempo resultan directamente proporcionales a los sólidos totales obtenidos; y constituyen variables de alta significación. El aumento en esas variables produce un incremento significativo en la cantidad de sólidos totales, la intensidad de corriente es la variable de mayor significación.

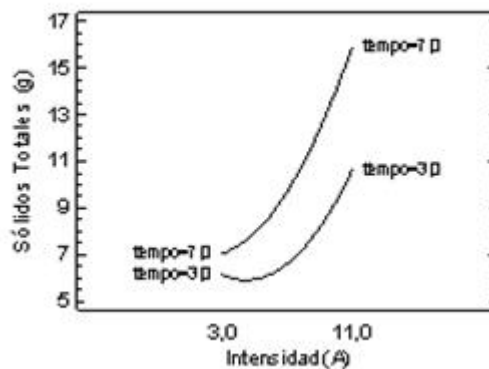
Analizando la interacción intensidad de corriente-tiempo (Fig. 3), se observó que a mayor intensidad de corriente se obtienen las mayores cantidades de sólidos operando al mayor tiempo, mientras que para bajas intensidades de corriente los sólidos obtenidos son aproximadamente iguales e independientes del nivel en que se trabaje el tiempo. Este resultado lo confirmó la información suministrada por el Diagrama de Pareto (Fig. 2) y la gráfica de superficie de respuesta estimada (Fig. 4).

**Tabla 3.** Diseño de experimento con las Variables de respuestas.

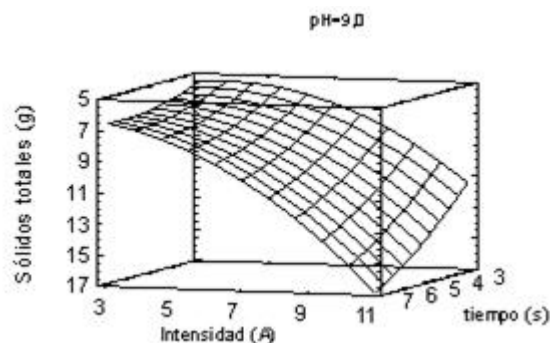
Experimento	Intensidad de la corriente aplicada (A)	pH	Tiempo (min)	Sólidos totales (g)	Consumo energético (kW/kg)
1	7	6	5	7,05	12,81
2	11	3	3	5,70	18,03
3	11	9	5	15,56	6,75
4	7	6	3	6,97	4,79
5	3	6	7	7,85	5,04
6	3	3	3	3,89	3,37
7	11	3	7	5,75	21,17
8	3	9	7	6,93	6,63
9	11	6	3	10,66	5,39
10	11	9	3	10,33	5,46
11	11	6	5	16,34	6,61
12	7	3	5	5,58	20,76
13	7	3	3	6,79	5,05
14	3	6	5	6,46	3,64
15	7	6	7	8,71	17,21
16	7	3	7	6,79	28,52
17	11	3	5	9,65	18,37
18	3	9	3	5,86	1,49
19	11	9	7	16,23	13,19
20	3	9	5	6,53	3,52
21	3	3	5	4,55	6,74
22	7	9	3	6,83	5,21
23	3	6	3	5,28	2,02
24	3	3	7	5,38	9,31
25	11	6	7	16,21	12,93
26	7	9	5	8,52	9,17
27	7	9	7	9,63	14,28



**Fig. 2.** Diagrama de Pareto para los sólidos totales obtenidos.



**Fig. 3.** Efecto de la interacción intensidad de corriente-tiempo para los sólidos totales.

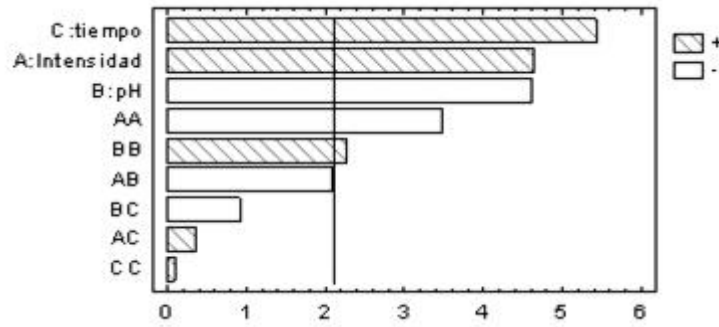


**Fig. 4.** Superficie de respuesta estimada para los sólidos totales obtenidos.

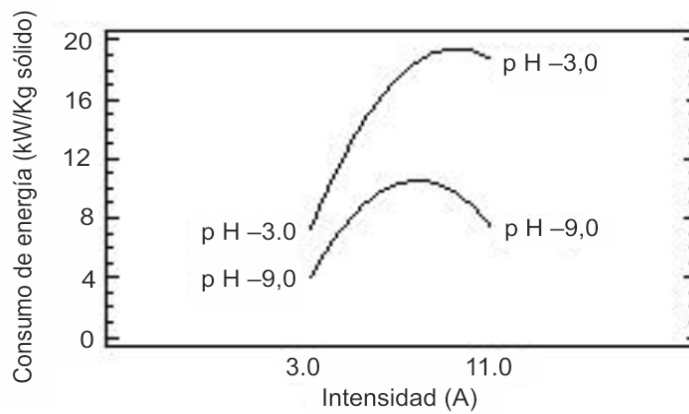
### Análisis del consumo de energía

Para el consumo de energía según Pareto (Fig. 5), se apreció que el tiempo, la intensidad de corriente y la interacción pH-pH son directamente proporcionales a la variable de respuesta, el aumento de estas variables provoca un incremento significativo en el consumo de energía, siendo el tiempo la de mayor relevancia. Sin embargo, el pH y la interacción intensidad de corriente-pH provocan una disminución del consumo de energía, aunque también presentan una gran significación en la variable de respuesta. Según el gráfico de Pareto (Fig. 5), el único efecto significativo entre las variables estudiadas corresponde a la interacción intensidad de corriente-pH. A menor intensidad de corriente, se obtienen los menores consumos de energía sin una gran significación del nivel en que se trabaje el pH (Fig. 6); mientras que para la mayor intensidad de corriente a pH 3, el consumo resulta elevado, se alcanza un valor menor a pH 9. De

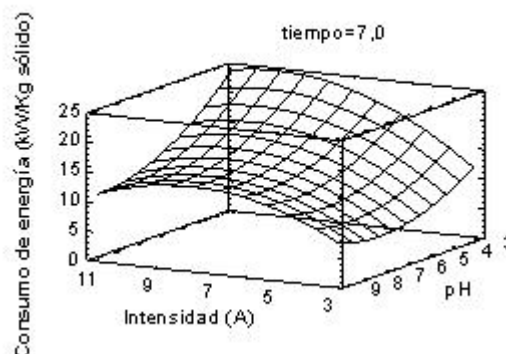
manera general, a mayor pH el consumo de energía es menor, aunque se observó que existe un valor máximo del consumo de energía a partir del cual se produce un punto de inflexión. Esto fue corroborado mediante la superficie de respuesta estimada (Fig. 7). Las condiciones que minimizan el consumo de energía son: corriente de 3 A y pH 8, para un tiempo de 7 min.



**Fig. 5.** Diagrama de Pareto para el consumo de energía.



**Fig. 6.** Efecto de la interacción intensidad de corriente-pH para el consumo de energía.



**Fig. 7.** Superficie de respuesta para el consumo de energía.

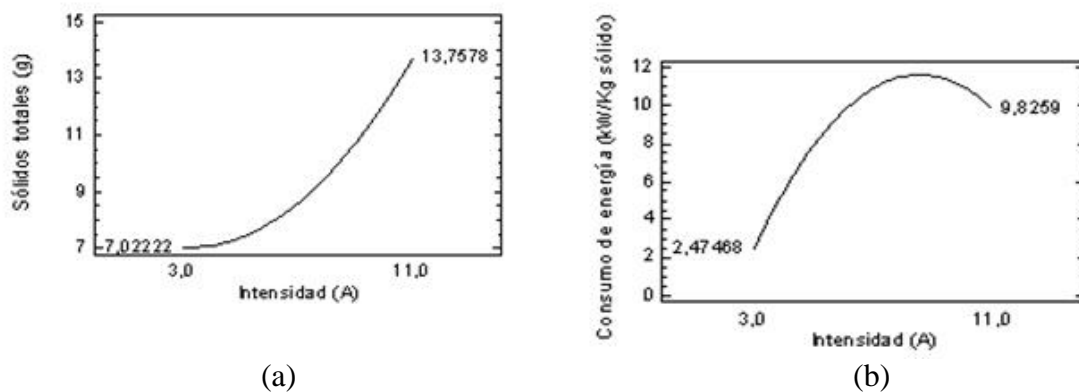
## Análisis de los resultados de las variables independientes

### Efecto de la intensidad de corriente.

Diferentes trabajos reportan el efecto de la intensidad de la corriente en la remoción de color DQO, entre otras variables.<sup>8,13,17,19</sup> Todos coinciden en que la corriente incrementa de forma significativa la cantidad de contaminante separado. Esto se corresponde con la ley de Faraday, que rige el proceso de electrocoagulación, la cual describe la relación entre la cantidad de corriente y la cantidad de iones aportados a la disolución (ecuación 1), aumentando la cantidad de aluminio disuelto, lo que permite una coagulación más rápida y eficaz.

La cantidad de sustancias formadas en un electrodo es proporcional a la cantidad de cargas que pasan a través del sistema y el número total de moles de sustancia formada en el electrodo se relaciona estequiométricamente con la cantidad de electricidad que circula en el sistema, lo que da lugar al aumento de la producción de flóculos y de la velocidad de reacción. Otro fenómeno que contribuye al aumento de transferencia de carga es la no deposición de material orgánico en el cátodo, lo que ejercería una resistencia al paso de la corriente entre electrodos. Esto es posible debido a que la electrólisis del agua genera  $H_2$ , el cual, al burbujear, provoca el arrastre de partículas en el cátodo y en la celda, lo que origina su flotación.

La obtención de sólidos aumentó de 7,022 a 13,7578 g con el incremento de la corriente como era de esperarse en cualquier proceso electroquímico (Fig. 8a). Igualmente, el aumento de corriente da lugar al incremento del consumo de energía hasta el valor a partir del cual se observa la disminución del consumo (Fig. 8 b).



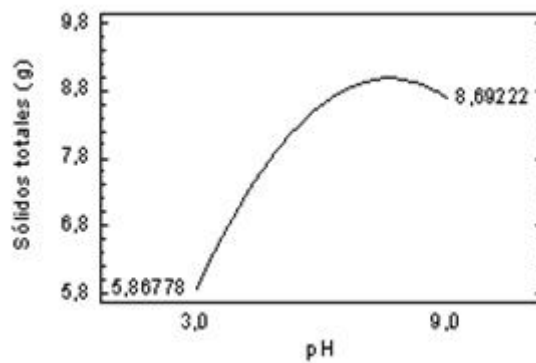
**Fig. 8.** Comportamiento de la intensidad de corriente con respecto a las dos variables de respuesta, a) sólidos totales, b) consumo de energía.

### Efecto del pH inicial

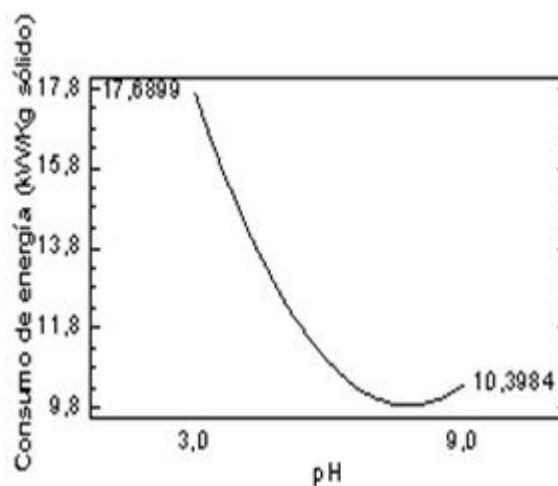
Para investigar la influencia del pH inicial de la vinaza sobre el proceso de electrocoagulación, se varió en el primero intervalo de 3 a 9. Los resultados revelaron que a medida que aumenta el pH se obtiene una mayor cantidad de sólidos (Fig. 9). El pH está vinculado a la constante del producto de solubilidad ( $K_{ps}$ ), la cual disminuye cuando este se elava, lo que significa que los sólidos son más insolubles y por tanto, se

obtiene una mayor precipitación. Pero a pH 8,5 los sólidos totales fueron máximos, valor a partir del cual comienzan a disminuir, esto se atribuye a que a valores de pH mayores se dificulta la formación de los complejos de aluminio en su forma catiónica, en la cual son adsorbidos en las partículas neutralizándolas. Para cada residual existe un rango de pH óptimo para el cual la coagulación, mediante la formación de los hidróxidos, sucede rápidamente. En un rango de pH entre 4 y 9, se favorece la formación del hidróxido de aluminio. Para valores de pH menores que 4 hay menos concentración de iones hidroxilos ( $\text{OH}^-$ ) y no se favorece por tanto la formación de  $\text{Al}(\text{OH})_3$ .<sup>20</sup> Esto se debe a que los protones en la disolución se reducen a  $\text{H}_2$  y por tanto, la producción de hidróxido disminuye, por lo que precipitan menos sólidos.

La precipitación y la adsorción son los dos mecanismos principales de interacción que se tienen en cuenta a diferentes intervalos de pH, a valores bajos de pH los iones  $\text{Al}^{3+}$  generados en el ánodo se unen a las partículas coloidales aniónicas presentes en la disolución, por tanto neutralizan su carga y reducen su solubilidad. Este proceso es conocido como precipitación. El mecanismo de adsorción opera a mayor pH, y consiste en la adsorción de los compuestos orgánicos en los precipitados de hidróxidos amorfos. A medida que aumenta el pH, el consumo de energía disminuye (Fig. 9), hasta alcanzar un mínimo a 6,35, valor a partir del cual el consumo comienza a ascender.



(a)

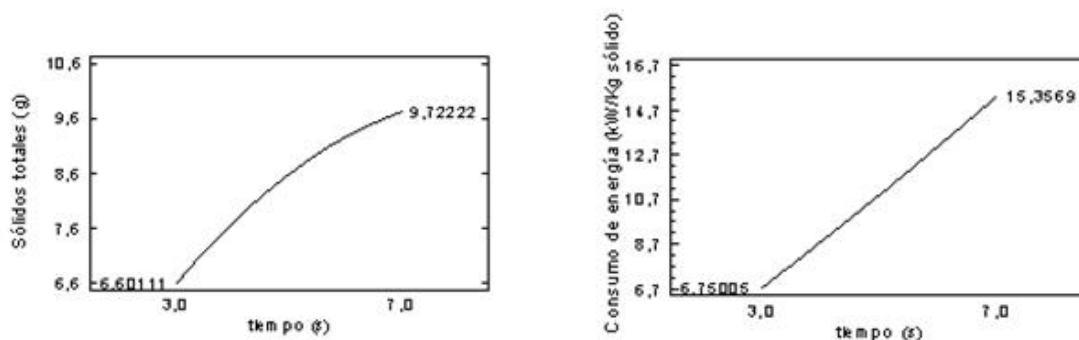


(b)

**Fig. 9.** Influencia del pH sobre las variables de respuesta, a) sólidos totales, b) consumo de energía.

## Efecto del tiempo

El análisis del tiempo de electrocoagulación indicó que a mayor tiempo, mayor es la cantidad de sólidos que se obtiene (Fig. 10), por cuanto se favorecen tanto los procesos de electrodo como la floculación y precipitación de los sólidos, se producen más gases que al ascender llevan las partículas de óxido a la superficie en forma de espuma y a su vez, promueve el crecimiento de los flóculos, así como su posterior precipitación. Un pequeño cambio en el tiempo representa una gran influencia en la cantidad de sólidos a obtener. El mismo comportamiento se presenta para el consumo de energía, según la ecuación 4 la energía eléctrica es directamente proporcional al tiempo, luego a medida que aumenta el tiempo aumenta el consumo.



*Fig. 10. Influencia del tiempo en la obtención de los sólidos totales (a) y en el consumo de energía del proceso (b).*

## Condiciones óptimas de operación

De acuerdo con los resultados, se observó que debe haber un compromiso entre las condiciones técnicas de operación y el consumo de energía para alcanzar la mayor cantidad de sólidos que se desea obtener. Por ello, se determinaron las condiciones óptimas de operación que permitirían maximizar la variable respuesta *sólidos totales* y minimizar el consumo de energía.

## Optimización de respuesta múltiple

El procedimiento de optimización de respuesta múltiple determina la combinación de variables experimentales que simultáneamente optimizan varias respuestas (Fig. 11). El programa para la optimización de respuesta múltiple determinó la combinación de los niveles de las variables que aumentan al máximo la función de conveniencia por encima de la región indicada, así como aquellas con las que se logra la optimización. También se determinaron por el programa los valores límites y de conveniencia para las variables de respuesta. Los resultados revelaron que las condiciones óptimas se alcanzan con una intensidad de corriente 11 A, pH igual a 8,07 y tiempo de electrocoagulación de 5,6 min (Tabla 4) y que la cantidad máxima de sólidos totales que se puede obtener es de 16,34 g para un consumo mínimo de energía de 1,485 kW/kg (Tabla 5).

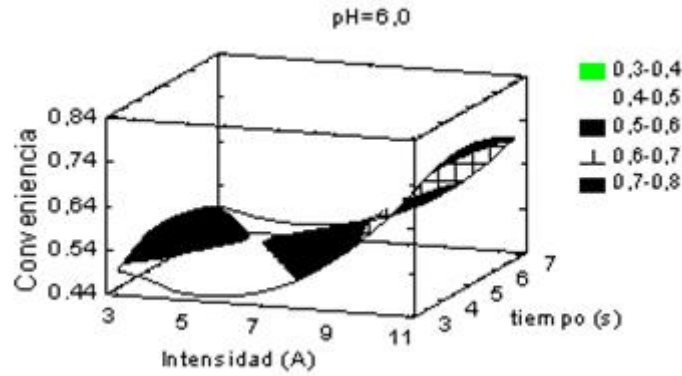


Fig. 11. Gráfico de superficie respuesta para los valores de conveniencia óptimos.

Tabla 4. Condiciones óptimas de operación.

Factores	Bajo	Alto	Óptimo
Intensidad de corriente (A)	3	11	11
pH	3	9	8,07
Tiempo (min)	3	7	5,6

Tabla 5. Valores límites de las variables de respuesta obtenidas por el programa.

Respuesta	Mínimo	Máximo
Sólidos totales (g)	3,89	16,34
Consumo (kW/kg)	1,485	28,519

### Cálculo económico preliminar

La viabilidad de aplicación de un proceso depurativo a la realidad industrial depende de la evaluación costo-beneficios. Por esta razón, se determinaron los costos asociados al proceso de electrocoagulación de la vinaza en las condiciones de operación técnicamente factibles (Tabla 6).

Tabla 6. Costo de operación para las condiciones técnicamente factibles.

Material de electrodo	$C_{energía}$ (kW.h/g de sólido removido)	$\Delta M_{exp}$ (g)	$\Delta M_T$ (g)	$\varphi$ (%)	See (kW.h/g de Al disuelto)	Co (\$/kg $10^3$ )
Al	0,021	0,468	0,308	65,797	104,623	488,74

## CONCLUSIONES

Los resultados de las variables de respuesta estudiadas y la optimización de respuesta múltiple permitieron comprobar la factibilidad del proceso de electrocoagulación para la obtención de sólidos a partir de la vinaza.

Se comprobó mediante el diseño de experimento que todas las variables estudiadas: intensidad de corriente, pH y tiempo de electrolisis, presentan un efecto altamente significativo sobre la cantidad de sólidos obtenidos y el consumo de energía en el intervalo definido para cada variable. Igualmente, resultan altamente significativas las interacciones entre dos factores: densidad-tiempo y pH-densidad para los sólidos obtenidos, y pH-densidad para el consumo de energía.

Se determinó mediante la optimización de respuesta múltiple que las condiciones favorables de operación para y obtener la mayor cantidad de sólidos con el menor consumo de energía están dadas por:  $I = 11 \text{ A}$ ,  $\text{pH} = 8,7$  y  $t = 5,6 \text{ min}$ . En estas condiciones, el costo de operación asciende a  $\$ 488,74 \cdot 10^{-3}/\text{kg}$ .

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Kotrappanavar NS, Hosamani KM, Aminabhavi TM. Distillery wastewater treatment by the membrane-based nanofiltration and reverse osmosis processes. *Water Research*. 2006; 40: 2349-2356.
2. Krishna PR, Srivastava SN. Electrochemical degradation of distillery spent wash using catalytic anode: Factorial design of experiments. *Chemical Engineering Journal*. 2009; 146: 22-29.
3. Kumar M, Anto PI, Ram MJ, Chandra SV, Deo MI. Treatment of bio-digester effluent by electrocoagulation using iron electrodes. *Journal of Hazardous Materials* 2009; 165: 345-352.
4. Linares HI, Barrera DC, Roa MG, Bilycu B, Ureña NF. A combined electrocoagulation-sorption process applied to mixed industrial wastewater. *Journal of Hazardous Materials*. 2007;144: 240-218.
5. Manisankar P, Rani C, Viswanathan S. Effect of halides in the electrochemical treatment of distillery e.fluent. *Chemosphere*. 2004; 57: 961-966.
6. Mohana S, Acharya BK, Madamwar D. Distillery spent wash: Treatment technologies and potential applications. *Journal of Hazardous Materials*. 2009; 163: 12-25.
7. Sevki YY, *et al*. Electrocoagulation of synthetically prepared waters containing high concentration of NOM using iron cast electrodes. *Journal of Hazardous Materials*. 2007; B139: 373-380.
8. Ben SM, Calmanob W, Adina A. Iron-oxidation processes in an electrocoagulation cell. *Journal of Hazardous Materials*. 2009; 171: 704-709.
9. Boroski M, Rodriguez AC, Gracia JC, Passarella G A, Nozaki J, *et al*. The effect of operational parameters on electrocoagulation-flotation process followed by photocatalysis applied to the decontamination of water effluents from cellulose and paper factories. *Journal of Hazardous Materials*. 2008; 160: 135-141.
10. Cañizares P, Jiménez C, Martínez F, Rodrigo MA, Sáez C. The pH as a key parameter in the choice between coagulation and electrocoagulation for the treatment of wastewaters. *Journal of Hazardous Materials*. 2009; 163: 158-164.
11. Kirzhner F, Zimmels Y, Shraiber Y. Combined treatment of highly contaminated winery waste water. *Separation and Purification Technology*. 2008; 63: 38-44.
12. Ojeda E, Hing C. Tratamiento por electrocoagulación y coagulación-floculación de la vinaza de destilerías. *Revista de Tecnología Química*. Edición especial/2009.

13. Savas KA, Sevki YY, Keskinler B, Demircioglu N. Effect of initial pH on the removal of humic substances from wastewater by electrocoagulation. *Separation and Purification Technology*. 2008; 59: 175-182.
14. Chandrakant T, Chandra VS, Deo IM. Electrochemical treatment of a distillery wastewater: Parametric and residue disposal study. *Chemical Engineering Journal*. 2009; 148: 496-505.
15. Daneshvar N, Oladegaragoze A, Djafarzadeh N. Decolorization of basic dye solution by electrocoagulation: An investigation of the effect of operational parameters” *Journal of Hazardous Materials*. 2006; B129: 116-122.
16. Mollaha MY, Morkovskyb P, Gomesc J A, *et al.* Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation, *Journal of Hazardous Materials*. 2004; B114: 199-210.
17. Restrepo MA, Arango RA, Garcés GL, *et al.* La electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas. *Producciones + Limpias*. 2006; 1 (2).
18. Yýldýz YS, Koparal AS, Keskinler B. Effect of initial pH and supporting electrolyte on the treatment of water containing high concentration of humic substances by electrocoagulation. *Chemical Engineering Journal*. 2008; 138: 63-72.
19. Ojeda E, Hing C. Estudio del proceso de electrocoagulación de la vinaza empleando electrodos de aluminio. *Revista de Tecnología Química*, 2010; 30 (2)
20. Hani RM. Utilización de un sistema híbrido basado en filtración con membranas y electrooxidación avanzada para depurar efluentes complejos. [Tesis de grado]. Concepción, Chile. Universidad de Concepción. Marzo de 2009.