

# REMOCIÓN DE SÓLIDOS TOTALES DE VINAZAS POR ELECTROCOAGULACIÓN – ELECTROFLOTACIÓN

## TOTAL SOLID REMOVAL OF VINASSE BY ELECTROCOAGULATION - ELECTROFLOTATION

JAVIER DÁVILA RINCÓN

*Escuela de Ingeniería Química, Universidad del Valle, davila2344@yahoo.com*

NILSON MARRIAGA CABRALES

*Profesor Asistente, Escuela de Ingeniería Química, Universidad del Valle, marriaga@univalle.edu.co*

FIDERMAN MACHUCA MARTINEZ

*Profesor Asistente, Escuela de Ingeniería Química, Universidad del Valle, fiderman@univalle.edu.co*

Recibido para revisar mayo 14 de 2008, aceptado septiembre 30 de 2008, versión final octubre 22 de 2008

**RESUMEN:** El presente artículo presenta los resultados obtenidos en el tratamiento de vinaza proveniente una destilería de alcohol por medio de un proceso de electrocoagulación – electroflotación. Se evaluaron diferentes variables de operación como pH inicial de la solución, densidad de corriente y concentración de NaCl, como soporte electrolítico, en un diseño factorial  $2^3$  usando electrodos de aluminio en un arreglo monopolar. Los resultados indican que esta técnica podría ser usada en el proceso de concentración de vinazas. Se obtuvo remoción de sólidos totales de 37% sin utilizar un soporte electrolítico.

**PALABRAS CLAVE:** Etanol, concentración de vinazas, electrocoagulación, electroflotación.

**ABSTRACT:** This article presents the results obtained in the treatment of vinasse from an alcohol distillery through a process of electrocoagulation – electroflotation. Operating variables such as initial pH of the solution, current density and concentration of NaCl, as supporting electrolyte, were evaluated in a  $2^3$  factorial design using aluminum electrodes in a monopolar arrangement. The results show that this technique could be effective in vinasse concentration process. It achieved a 37% of total solids removal with no supporting electrolyte.

**KEYWORDS:** Ethanol, concentration of vinasse, electrocoagulation, electroflotation.

### 1. INTRODUCCIÓN

El surgimiento de las destilerías de etanol en los ingenios del Valle del Cauca ha incrementado la producción de su residuo principal, la vinaza. La concentración de éstas por evaporación es una etapa importante en el consumo energético de una destilería y, como resultado de su tratamiento, se ve disminuida la capacidad de producción de alcohol debido a problemas de incrustación en los evaporadores. Además, la vinaza es un residuo

contaminante, pues sus características impiden su vertimiento directo a fuentes de agua por su elevada carga orgánica, sales minerales, altos contenidos de DQO, DBO, turbidez y color [1].

Las vinazas en el Valle del Cauca se han tratado de varias formas con el fin de darle diferentes usos. Por ejemplo, a nivel agrícola se utiliza en compostaje y se concentra para

Utilizarla como fertilizante líquido, también se utiliza como materia prima para la fabricación de proteína celular y como alimento para animales; algunas veces se utiliza fermentación anaerobia para producción de biogas y se puede recircular dentro del mismo proceso de fermentación para disminuir su volumen de producción, pero estas aplicaciones tienen desventajas ya sea por tiempos de residencia elevados, inversiones altas o dificultades de operación [2].

Las vinazas han sido tratadas por métodos electroquímicos como se reporta en la literatura [3-7], Zayas *et al* presentan un estudio donde se ha logrado disminuir la demanda química de oxígeno (DQO), la demanda biológica de oxígeno (DBO), el carbono orgánico total (TOC) y turbidez en porcentajes superiores al 90% [3].

Yusuf Y, presenta un estudio de tratamiento de vinaza por electrocoagulación [4]. Se encontró que las concentraciones de un soporte electrolítico y peróxido de hidrógeno en la solución modifican fuertemente la capacidad de remoción del carbono orgánico total, alcanzando valores superiores a 80%. Un trabajo que combina la electrocoagulación con nueces de Areca catechu activada (AAC) muestra que la eficiencia en la remoción de cloruros, sulfatos, DBO y DQO con y sin la adición de AAC puede alcanzar remociones superiores a 80% [5].

Mediante técnicas electroquímicas y membranas de intercambio iónico se puede reducir la incrustación de sales sobre los tubos de equipos de evaporación durante la concentración de vinazas, al presentar porcentajes de concentración y desmineralización de sales entre 98% y 80% respectivamente [6-7].

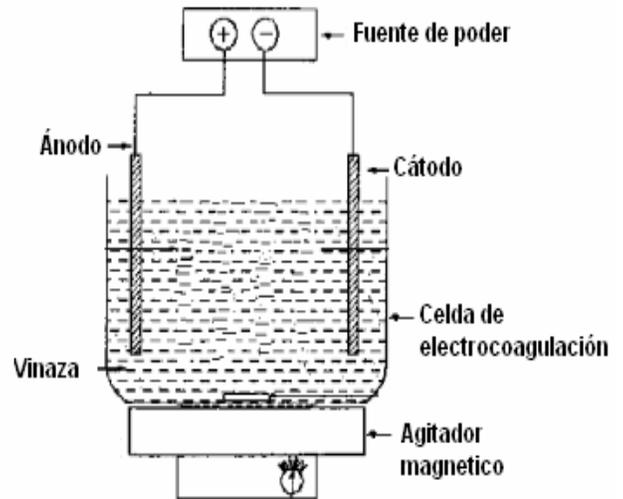
El propósito de este estudio fue evaluar la remoción de sólidos totales, presentes en la vinaza, mediante procesos de electrocoagulación-electroflotación utilizando electrodos de aluminio y como variables de operación pH inicial, concentración de electrolito y densidad de corriente.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Equipo

Las pruebas realizadas se llevaron a cabo en una celda electrolítica de 250 ml con un arreglo monopolar de los electrodos y una velocidad de agitación de 80 rpm por 15 minutos. Se usó una fuente de corriente GPS-S Serie INSTTEK tipo

análogo digital. Los electrodos con un área efectiva (área sumergida) de 32 cm<sup>2</sup> tuvieron 1 cm de separación. La Figura 1 muestra un esquema del montaje usado para las pruebas experimentales.



**Figura 1.** Montaje experimental  
**Figure 1.** Experimental setup

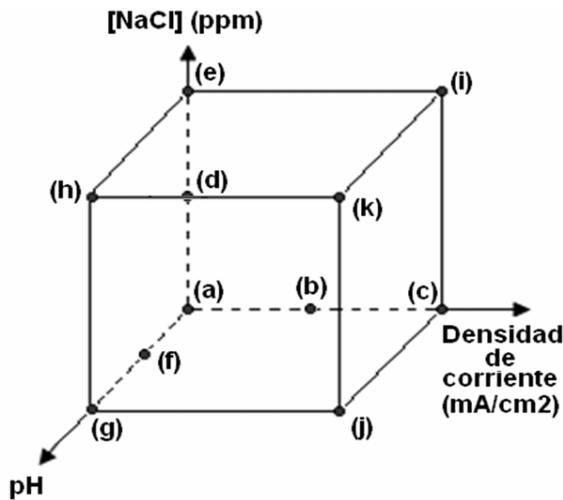
### 2.2 Diseño Experimental

El diseño experimental empleado se muestra en la Figura 2. Éste corresponde a un diseño factorial 2<sup>3</sup> con puntos adicionales sobre las aristas del cubo (puntos b, d y f). Las variables evaluadas fueron densidad de corriente ( $\rho_i$ ), pH inicial y concentración de NaCl como soporte electrolítico, todas las variables en dos niveles.

Los niveles usados para cada variable se seleccionaron con base en resultados previos [8], éstos fueron:  $\rho_i$  20, 40 y 60 mA/cm<sup>2</sup>; pH 4, 7 y 9; [NaCl] 0, 2000 y 4000 ppm.

### 2.3 Desarrollo Experimental

Los ensayos fueron realizados de manera aleatoria para minimizar el error en la secuencia de experimentación. Las condiciones de los ensayos se muestran en la Tabla 1.



**Figura 2.** Diseño experimental  
**Figure 2.** Experimental design

**Tabla 1.** Condiciones de operación en el diseño  $2^3$   
**Table 1.** Operating conditions in the  $2^3$  design

Ensayo	$\rho_i$ (mA/cm <sup>2</sup> )	pH inicial	[NaCl] (ppm)
(a)	20	4.03	0
(b)	40	4.02	0
(c)	60	3.89	0
(d)	20	3.81	2007
(e)	20	3.94	4009
(f)	20	7.07	0
(g)	20	10.06	0
(h)	20	9.06	4002
(i)	60	3.88	4024
(j)	60	8.83	0
(k)	60	9.02	4012

Para medir el pH de las muestras tratadas y sin tratar se utilizó un pH-metro AB15 ACCUMET Basic – Fisher Scientific inmediatamente después de recolectar las muestras. El pH inicial de la solución se ajustó usando soluciones de NaOH 0.7 M y H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> concentrado.

Para el cálculo del porcentaje de sólidos totales (%ST) de cada muestra, se utilizó la expresión (1). Para ello se secó la muestra en un horno a 105 °C hasta peso constante.

$$\%ST = \frac{\text{peso\_residuo}}{\text{peso\_muestra}} * 100 \quad (1)$$

El %ST de la vinaza sin tratar fue de 22.98%, con base en este valor, el porcentaje de remoción de sólidos totales (%RST) se calculó con (2).

$$\%RST = 100 - \frac{\%ST\_Clarificado}{\%ST\_Vinaza} \quad (2)$$

Para las medidas de aluminio desprendido del ánodo se utilizó una balanza analítica All Tech con cuatro cifras significativas.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La vinaza sin tratar presentó un porcentaje de sólidos totales de 22,98%, pH de 4,35 y conductividad eléctrica de 28,4 mS/cm.

Durante la operación se obtuvo espuma por la parte superior de la celda electrolítica y una mezcla remanente en la celda que posteriormente se clarificó.

La Figura 3 muestra una fotografía de la vinaza antes y después del tratamiento lo que evidencia el proceso de concentración. Se observa dos fases, la fase superior (espuma) se generó por el proceso de electroflotación.

La Tabla 2 presenta la cantidad de aluminio desprendido del ánodo de sacrificio y el porcentaje de sólidos totales tanto para la espuma como para el clarificado en cada punto experimental del diseño.

**Tabla 2.** Resultados en remoción de sólidos  
**Table 2.** Solids removal results

Ensayo	Peso aluminio desprendido (g)	% Sólidos totales	
		Clarificado	Espuma
(a)	0.0663	19.81	22.73
(d)	0.0659	20.95	23.49
(e)	0.0245	22.59	24.00
(b)	0.1301	22.09	23.77
(c)	0.2139	21.73	22.77
(f)	0.0648	15.05	17.25
(g)	0.0658	14.56	17.92
(h)	0.0647	15.23	18.69
(i)	0.2109	22.00	23.12
(j)	0.2091	16.88	16.80
(k)	0.2173	20.16	19.15



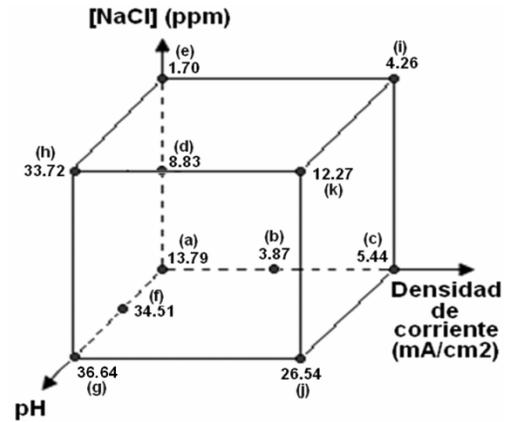
**Figura 3.** (a) Vinaza sin tratar, (b) vinaza tratada  
**Figure 3.** (a) Vinasse without treatment, (b) treated vinasse

La Figura 4 presenta las condiciones experimentales que presentaron mayor remoción de sólidos totales en porcentaje (ensayo (g)). No obstante, al agregar más vinaza, para mantener constante la densidad de corriente, se observó una agitación alrededor de los electrodos que aumentaría el transporte de iones y mejoraría la dosificación de aluminio hacia la solución disminuyendo con esto el sobrepotencial. Los voltajes registrados presentaron la tendencia mostrada en la Figura 5. Sin embargo algunos ensayos presentaron picos atribuidos a cambios en el nivel de la solución en la celda electrolítica y a cambios en el espesor de la película formada alrededor de los electrodos; dificultando el transporte de iones a través de la solución, que incrementan la polarización del electrodo [9-10].

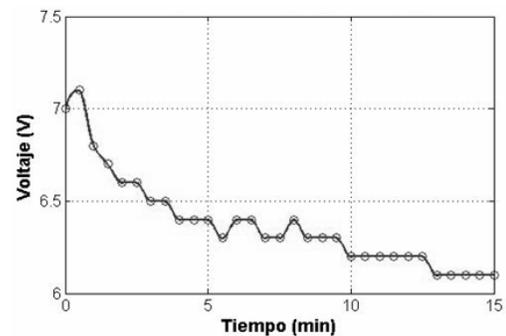
### 3.1 Efecto del pH

El pH de la solución afectó la cantidad de aluminio que se desprendió del ánodo y la concentración final de sólidos. La Figura 6 muestra el comportamiento del pH final de la espuma y del clarificado.

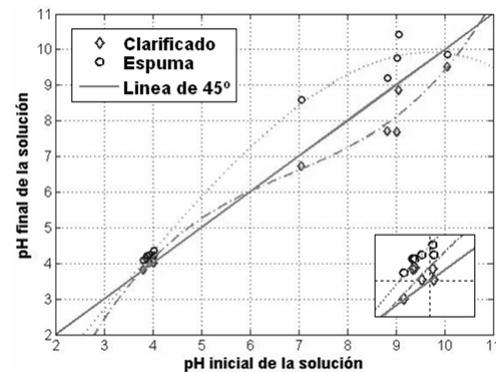
El pH fue más estable a condiciones ácidas, mientras que a condiciones alcalinas el pH del clarificado disminuyó y el de la espuma aumentó. Este comportamiento es característico cuando se trabaja con electrodos de aluminio como lo reporta Mouedhe et al [11].



**Figura 4.** Porcentaje de remoción de sólidos  
**Figure 4.** Percentage of solid removal



**Figura 5.** Comportamiento del voltaje  
**Figure 5.** Behavior of voltage



**Figura 6.** pH final vs. pH inicial de la solución  
**Figure 6.** Final vs. initial pH of solution

Esto sucede posiblemente por la naturaleza de los complejos de hidróxidos de aluminio formados, que a valores alcalinos corresponden a hidróxidos relativamente livianos, comparados con los formados a condiciones ácidas. Las especies de hidróxidos formadas por el desprendimiento

del aluminio dependen fuertemente del pH de la solución [12], esto hace que los complejos formados puedan ser atrapados por las burbujas de gas y sean llevados a la superficie formando la espuma (electroflotación).

Por otra parte, el efecto del pH inicial de la solución sobre la remoción de sólidos totales es más fuerte a condiciones alcalinas.

Cuando se trabajó a condiciones de pH inicial básico la remoción de sólidos totales aumentó, como lo indican los puntos (a), (f) y (g) de la Figura 4, esto se debería a que en condiciones básicas los hidróxidos de aluminio que se forman son del tipo  $AlOH^{2+}$ ,  $Al(OH)_2^+$  [12] que ayudan a desestabilizar partículas coloidales para luego eliminarlas por flotación o sedimentación.

### 3.2 Efecto de la densidad de corriente

La densidad de corriente tuvo gran influencia sobre la cantidad de aluminio desprendido del ánodo de sacrificio, siendo más efectiva para remoción de

sólidos totales a valores bajos; esto indica que un aumento de ésta se utilizaría en otros procesos como el calentamiento de la solución y no en el desprendimiento del metal [9, 11]. Los puntos (a), (b) y (c) de la Figura 4 muestran que los valores de densidad de corriente intermedia y bajos presentaron las mayores remociones de sólidos totales.

A partir de la técnica de superficie de respuesta se observó la variación de la cantidad de masa de aluminio agregada a la solución conforme cambiaron las condiciones de pH inicial y concentración de soporte electrolítico. La Figura 7 presenta la superficie de respuesta a  $60 \text{ mA/cm}^2$ .

Cuando se trabajó a condiciones neutras de pH (cercanas a 7) se desprendió poco aluminio hacia la solución. Esto muestra que a condiciones básicas de pH y sin electrolito soporte se obtienen las mayores cantidades de aluminio desprendido del ánodo.

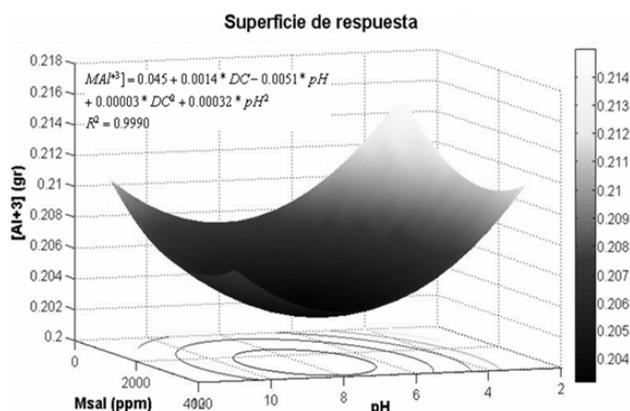


Figura 7. Superficie de respuesta de la masa de aluminio desprendida a  $60 \text{ mA/cm}^2$

Figure 7. Surface response of the mass of aluminum detached to  $60 \text{ mA/cm}^2$

### 3.3 Efecto De La Concentración De NaCl

La vinaza es muy conductora ( $28.4 \text{ mS/cm}$ ) comparada con otras soluciones (agua potable  $0.5 \text{ mS/cm}$  y agua de mar  $50 \text{ mS/cm}$ ). La alta conductividad de la vinaza se debe a su alto contenido en sales inorgánicas, especialmente sales de potasio.

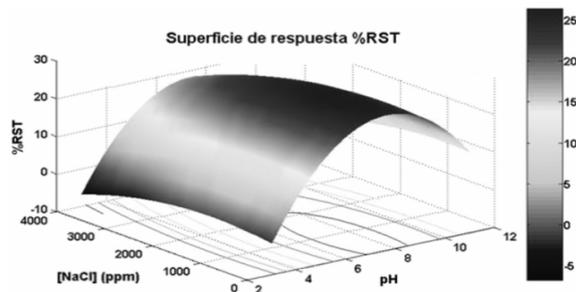
La concentración de NaCl como soporte electrolítico tuvo un efecto contrario al del pH inicial, la remoción de sólidos totales fue inversamente proporcional a la concentración de NaCl.

Se encontró que es más favorable prescindir del NaCl debido a la alta conductividad que

presenta la vinaza; este comportamiento se debe probablemente a que los iones  $\text{Na}^+$  y  $\text{Cl}^-$  podrían saturar la solución de sales que forman complejos muy pesados disminuyendo la remoción por flotación [2, 3, 8,10].

Los puntos (a), (d) y (e) de la Figura 4 muestran que a medida que se aumenta la concentración de NaCl se obtiene menos remoción de sólidos totales, indicando que el uso del soporte electrolítico no mejora la remoción de sólidos totales.

Finalmente, la Figura 8 muestra la superficie de respuesta de remoción de sólidos totales respecto al pH inicial de la solución y la concentración de electrolito soporte a una densidad de corriente de  $60 \text{ mA/cm}^2$ .



**Figura 8.** Superficie de respuesta para la remoción de sólidos totales

**Figure 8.** Surface response to total solids removal

A pH iniciales básicos, sin adición de NaCl, se lograron los mejores resultados para la remoción de sólidos totales.

El pH inicial fue la variable más importante en el proceso de remoción de sólidos totales y la concentración de NaCl fue la variable menos influyente; lo que se confirmó con un análisis de varianza (Tabla 3).

**Tabla 3.** Análisis de varianza  
**Table 3.** Analysis of variance

Fuente de variación	G.L	SC	CM	F
Densidad de corriente	1	174.28	174.28	4.75
pH inicial	1	881.58	881.58	24.02
[NaCl]	1	115.98	115.98	3.16
Error	4	146.83	36.71	
Total	7	1318.67		

(G.L) grados de libertad; (SC) suma de cuadrados; (CM) cuadrado medio; (F) factor de Fisher

#### 4. CONCLUSIONES

La concentración de vinazas por medio de electrocoagulación – electroflotación resultó factible logrando disminuir el contenido de sólidos totales en un 37%.

Las condiciones alcalinas favorecieron la remoción de sólidos totales y la disolución del aluminio en la solución. Asimismo, al aumentar la densidad de corriente aumentó la disolución de aluminio, aproximadamente  $0.0037 \text{ g}$  de aluminio por cada  $1 \text{ mA/cm}^2$ .

Las condiciones a las que se obtuvo un mayor desprendimiento de aluminio no coincidieron con las condiciones a las que se lograron las mayores remociones en sólidos totales.

Teniendo en cuenta que la vinaza tiene una conductividad eléctrica alta no fue necesario el uso de un electrolito soporte.

#### 5. AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento al Ingenio Providencia S.A. por el suministro de vinaza, a la Escuela de Ingeniería Química y al Proyecto Univalle - Colciencias No RC-239 “Diseño e implementación de un sistema de gestión del conocimiento y la innovación en la relación universidad-empresa-estado en el sur occidente colombiano. Aplicación al desarrollo y transferencia de tecnologías para la producción de biocombustibles líquidos”, por el apoyo económico en el desarrollo del proyecto.

#### REFERENCIAS

[1] GARCÍA, A., ROJAS, C. Posibilidades de uso de la Vinaza en la agricultura de acuerdo con su modo de aplicación en los suelos, Técnicaña., 14, 3-13, 2006.

- [2] DÁVILA R. JAVIER ANDRÉS. Tratamiento de vinazas de destilería por Electrocoagulación/flotación/oxidación. [Tesis de Maestría en Ingeniería]. Cali, Universidad del Valle, 2008.
- [3] ZAYAS T., RÓMERO, V., SALGADO, L., MERAZ, M. AND MORALES, U. Applicability of coagulation/flocculation and electrochemical processes to the purification of biologically treated vinasse effluent, Separation and Purification Technology, 57, 268-274, 2007.
- [4] YUSUF Y. EC AND EF processes for the treatment of alcohol distillery wastewater, Separation and purification technology, 53, 135-140, 2006.
- [5] KANNAN, N., KARTHIKEYAN, G. AND TAMILSELVAN, N., Comparison of treatment potential of electrocoagulation of distillery effluent with and without activated *areca catechu* nut carbon, Journal of Hazardous Materials, 137, 1803-1809, 2006.
- [6] DECLoux, M., ET AL, Interest of electro dialysis to reduce potassium level in vinasses. Preliminary experiments, Desalination, 146, 393-398, 2002.
- [7] MILEWSKI, J. A. AND LEWICKI, P. P., Demineralisation of vinasse by electro dialysis, Journal of Food Engineering, 7, 177-196, 1988.
- [8] BECERRA-HERNÁNDEZ, C., GÓMEZ-CABAL D. M., Estudio exploratorio de la remoción de DBO y DQO en vinazas mediante electrocoagulación, [Trabajo de grado], Cali, Universidad del Valle, 2007.
- [9] MORKOVSKY P., ET AL., Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation, Journal of Hazardous Materials B, 199-210, 2004.
- [10] XUEMING, C., GUOHUA, C. AND PO LOCK, Y., Investigation on the electrolysis voltage of electrocoagulation, Chemical Engineering Science, 57, 2449-2455, 2002.
- [11] MOUEDHEN, G., FEKI, M., WERY, M. P. AND AYEDI, H. F. Behavior of aluminum electrodes in electrocoagulation process, Journal of Hazardous Materials. 150, 124 – 135, 2008.
- [12] HOLT, P., BARTON, G. AND MITCHELL C. Electrocoagulation as a wastewater treatment. In The Third Annual Australian Environmental Engineering Research. Castlemaine, Victoria, Australia. 23-26 November 1999.