

# TRATAMIENTO POR ELECTROCOAGULACIÓN Y COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN DE LA VINAZA DE DESTILERÍAS

Elaine Ojeda Armaignac, Romelia Hing Cortón  
Facultad de Ingeniería Química, Universidad de Oriente

*El objetivo principal del presente trabajo, es el análisis de las variables que influyen en la obtención de sólidos a partir de la vinaza, mediante un proceso de electrocoagulación, y posteriormente someter el líquido residual a un proceso de coagulación-floculación. Se utilizó el coagulante PERCOL 734 para disminuir la agresividad de este residual, y se midieron parámetros tales como pH, conductividad, DQO y SST, mediante el método de control de la Prueba de las jarras. El análisis de la influencia de las variables en el proceso de electrocoagulación, se desarrolló mediante un diseño de experimentos factorial 2<sup>3</sup>, considerando como variables: el pH de la vinaza, la intensidad de corriente y el tiempo de residencia, obteniéndose las combinaciones óptimas de estas variables que permiten mayor cantidad de sólidos en las variables respuestas: sólidos obtenidos en la espuma, y en el líquido. Las variables más significativas estadísticamente fueron el pH y tiempo de residencia para los sólidos obtenidos en el líquido, y pH e intensidad de corriente para los sólidos obtenidos en la espuma. Ninguna de las interacciones resultó significativa en los sólidos obtenidos en el líquido ni en los de la espuma. En la etapa de coagulación-floculación se obtuvo que entre 60 y 80 mg/L de coagulante, se encuentra la dosis óptima que promueve una mayor coagulación-floculación en el líquido residual disminuyendo su agresividad. Se presentan gráficos que muestran el comportamiento de las variables pH, conductividad, DQO y SST en función de la dosis de coagulante añadida. Se proponen algunas recomendaciones.*

**Palabras clave:** electrocoagulación, coagulación-floculación, vinaza.

*The main objective of this paper is the analysis of variables affecting the collection of solids from vinasse by a process of electrocoagulation, and then subjecting the liquid waste through a process of coagulation-flocculation. Coagulant was used to reduce the 734 percolating aggressiveness of this residual, and measured parameters such as pH, conductivity, COD and TSS, using the method of controlling the test mugs. The analysis of the influence of the variables in the process of electrocoagulation, was developed by a 2<sup>3</sup> factorial design of experiments, taking as variables: the pH of the vinasse, current density and the residence time, obtaining the optimal combinations of these variables that allow greater amount of solids in the response variable: solids obtained in the foam and liquid. The statistically significant variables were pH and residence time for solids from the liquid, and pH and intensity of current to the solids obtained in the foam. None of the interactions was significant in solids from the liquid or in the foam. During the coagulation-flocculation was obtained between 60 and 80 mg/L of coagulant, is the optimal dose that promotes greater coagulation-flocculation in the residual liquid to decrease its aggressiveness. Presents graphs showing the behavior of the variables pH, conductivity, COD and TSS depending on the dose of coagulant added. A set of recommendations.*

**Key words:** electrocoagulation, coagulation-flocculation, vinasse.

## Introducción

En la composición del residual de la destilería se destaca la vinaza, de la cual, en trabajos realizados anteriormente, se comprobó que se podía extraer, mediante un proceso de electrocoagulación, un sólido con propiedades anticorrosivas, pero esta extracción no disminuye la agresividad de este líquido residual, por lo que

se debe someter el mismo a un proceso posterior de coagulación floculación para disminuir la agresividad que éste mantiene.

Para solucionar parcialmente la contaminación por vertimiento de residuales la práctica tradicional ha sido, durante muchos años, exigir a la industria la utilización de tecnologías para el control de la contaminación al final de los proce-

---

tos o actividades, a fin de garantizar el cumplimiento de los límites máximos admisibles de contaminantes en las emisiones y descargas; como en la destilería santiaguera, donde se propuso la solución poco efectiva de reducir a diez los días de producción de aguardiente, a partir de las mieles finales de caña, pues aunque reduce en parte los riesgos para la salud y el ambiente asociados a este fenómeno, aun la contaminación seguía latente y por último se decidió eliminar la producción de aguardiente de esta destilería y trasladarla a otra provincia, por lo que el problema, en lugar de eliminarlo, se trasladó.

Las tecnologías limpias son una opción amigable con el ambiente que permiten reducir la contaminación en el medio natural y la generación de desechos. El uso de éstas representa una opción técnica, económica y ambientalmente apropiada que contribuye al desarrollo sostenible de las organizaciones y de la sociedad en general.

Al valorar la situación actual, de que este residual presenta una gran agresividad debido, entre otros factores, a la gran cantidad de sólidos en suspensión, y considerando que estos sólidos se pueden utilizar como inhibidores de la corrosión, y actuando con el pensamiento de que se debe trabajar hoy en función de las futuras generaciones y del desarrollo tecnológico del país, tratando de eliminar las importaciones y de disminuir la agresividad del líquido residual, se identificó como objetivo general, determinar las condiciones operacionales más eficientes para la separación de los sólidos presentes en el residual a través del método de electrocoagulación y tratar de disminuir la agresividad del mismo mediante la utilización de un proceso de coagulación-floculación.

## Materiales y métodos

El líquido a tratar en esta investigación es la vinaza residual producto de la destilación alcohólica a partir de mieles finales, que se lleva a cabo en la destilería Hatuey, perteneciente a la empresa Cuba Ron de la provincia Santiago de Cuba.

El coagulante que se utilizó, en el desarrollo de este trabajo para lograr una disminución de la agresividad del líquido residual de la

electrocoagulación de la vinaza, fue el PERCOL 734 perteneciente a la familia de los copolímeros catiónicos de acrilamina.

Para la obtención del sólido a partir de la vinaza, se utilizó un electrocoagulador a escala de laboratorio, el cual está compuesto por 30 electrodos planos de aluminio, dispuestos verticalmente, cuyas dimensiones totales son de 13,98 cm de largo, 4,0 cm de ancho, y 1.0 mm de espesor, espaciados 1,5 cm, con un área de 61.51cm<sup>2</sup>. Para energizar el sistema, se utilizó una fuente de corriente directa, en la que se podía regular la corriente y el voltaje aplicado; mediante la conexión de un amperímetro y un voltímetro, en serie y paralelo respectivamente. Los electrodos fueron conectados en paralelo para que la diferencia de potencial entre las placas fuera la misma.

A medida que transcurre el proceso de electrocoagulación, el volumen de espuma se incrementa. Al transcurrir el tiempo prefijado (30 o 60 min), se desenergiza el sistema, se remueve la espuma, y se evacua el líquido a un recipiente.

A continuación se pone a secar la espuma y se procede a centrifugar el líquido, el sólido floculado se extrae de la centrífuga en forma de lodo, y se pone a secar en la estufa también. Al cabo de 72 h aproximadamente, el sólido presente tanto en la espuma como en el lodo se encuentra totalmente seco, y listo para ser pesado y envasado.

A la vinaza residual, procedente del proceso de electrocoagulación, se le realiza el ensayo conocido como la prueba de jarras. A cada jarra se le adicionó el coagulante PERCOL 734. Al líquido obtenido de la coagulación - floculación se le determinó el pH, la conductividad, los SST, y la DQO

## Análisis estadístico

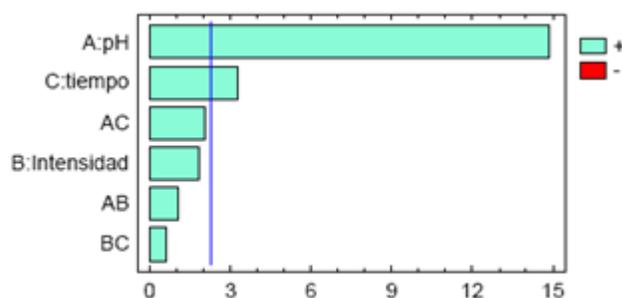
En los experimentos que se realizan en el proceso de electrocoagulación se consideraron variables que tienen una gran influencia como son: pH inicial de la vinaza a tratar, la intensidad de corriente y el tiempo de exposición. En los planes factoriales 2<sup>k</sup> se utilizan dos niveles para cada variable (superior e inferior) y k denota el número de variables independientes o factores, como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1  
Niveles de las variables utilizadas en el experimento

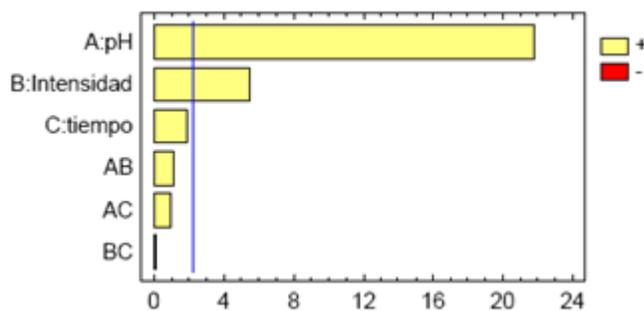
Variable independiente	Nivel inferior (-1)	Nivel superior (+1)
X <sub>1</sub> : Tiempo (min)	30	60
X <sub>2</sub> : Intensidad de corriente (A)	10	15
X <sub>3</sub> : pH de la vinaza a tratar	4.3	9

El procesamiento de estos datos se realizó a través del programa STATGRAPHICS PLUS 5,1, con un intervalo de confianza para este diseño de un 95 % de probabilidad.

En los gráficos 1 y 2 se representan los diagramas de Pareto considerando todos los factores y las interacciones de éstos para la cantidad de sólidos obtenidos en el líquido y en la espuma, respectivamente.



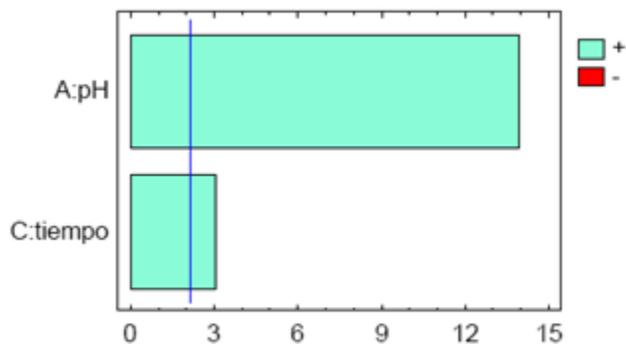
Gráf. 1 Diagrama de Pareto para los sólidos en el líquido.



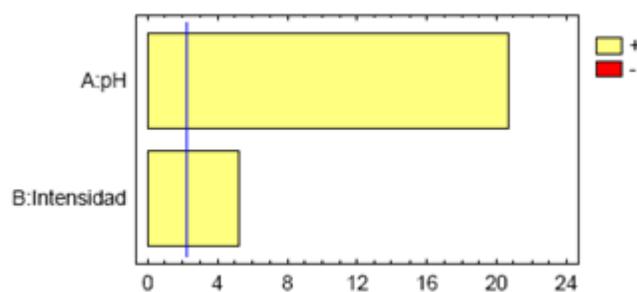
Gráf. 2 Diagrama de Pareto para los sólidos en la espuma.

Al eliminar las variables e interacciones no significativas se obtuvieron nuevos diagramas de Pareto para

el sólido obtenido en el líquido y en la espuma, los cuales se muestran en los gráficos 3 y 4 respectivamente.



Gráf. 3 Diagrama de pareto para los sólidos en el líquido.



Gráf. 4 Diagrama de pareto para los sólidos en la espuma.

El estadístico R2, que indica que el modelo así ajustado explica o representa el 92,808 1 % de la variabilidad del sólido en el líquido y el 97,209 8 % de la variabilidad del sólido en la espuma. No obstante, a que este resultado es aceptable, se sugiere realizar otros análisis en la búsqueda de nuevos modelos, que hagan una representación aún más exacta del proceso, donde aparezca un mayor grado de relación de las variables.

El estadístico Durbin-Watson resultó ser 1,856 1 y 1,640 98 para el sólido del líquido y la espuma respectivamente, en ambos mayor que 1,4; indicando que no existen dependencias entre las variables consideradas independientes.

### Análisis de la influencia de las variables independientes en el sólido obtenido en el líquido

En el gráfico 5 se observa que la intensidad de corriente no aparece, aún cuando esta variable es importante en el proceso de electrocoagulación, pues no fue estadísticamente significativa en el rango analizado, esto tiene una explicación

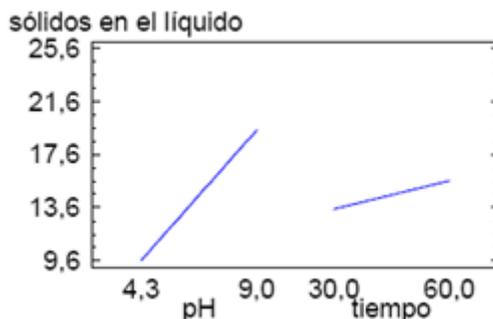
fenomenológica ya que ocurre al trabajar con valores de intensidad de corriente entre 10 y 15 A, pues al aumentar la misma, aunque se incrementa el rendimiento de sólidos, esto no corresponde al aumento obtenido en trabajos anteriores entre 5 y 10 A. Este resultado puede deberse a que para un incremento de la intensidad de corriente, los procesos de electrodo aumentan proporcionalmente a la misma, acelerándose el proceso de desprendimiento de gases, lo cual favorece el ascenso de los sólidos a la espuma y dificulta el proceso de coagulación-floculación.

Las variables pH y tiempo fueron significativas estadísticamente, siendo el pH el que más significación presentó, ya que el pH es la variable más importante a tener en cuenta en un proceso de electrocoagulación, pues el pH está muy vinculado a la constante del producto de solubilidad (Kps) la cual debe disminuir al elevarse el mismo, lo que significa que los sólidos son más insolubles y por tanto se obtiene un mayor rendimiento.

El tiempo es una variable que también tiene influencia en el proceso correspondiendo al máximo

valor una mayor cantidad de sólidos, debido a que la velocidad de aglomeración de las partículas es proporcional al tiempo, por lo que se promueve el crecimiento de los flóculos y su posterior precipitación. Las interacciones entre las variables no

fueron significativas, esto se debe a que en el rango escogido para el análisis de las variables estudiadas el proceso tiene un comportamiento lineal no llegando a obtenerse una zona de curvatura u óptimo.



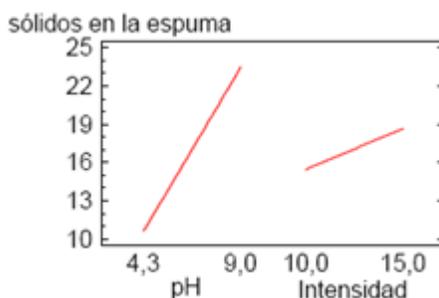
Gráf. 5 Efectos principales para los sólidos en el líquido.

### Análisis de la influencia de las variables independientes en el sólido obtenido en la espuma

En el gráfico 6 se observa que el pH es la variable de mayor significación, al igual que ocurrió con el sólido obtenido en el líquido, ya que el pH es una de las variables de importancia en un proceso de electrocoagulación, pues el pH está muy relacionado a la constante de producto de solubilidad (Kps) la cual debe de disminuir al elevarse el mismo, lo que significa

que los sólidos son más insolubles y por tanto se obtiene un mayor rendimiento.

Esto va muy vinculado a la intensidad de la corriente, la cual también resultó significativa, pues al incrementar los valores de ésta, los procesos de electrodo, aumentan proporcionalmente a la misma, acelerándose el proceso de desprendimiento de gases lo cual favorece el ascenso de los sólidos a la espuma y dificulta el proceso de coagulación-floculación.



Gráf. 6 Efectos principales para los sólidos en la espuma.

En los procesos de electrodo, los iones hidronio migran hacia el cátodo, ocurriendo la reacción de reducción del mismo y se desprende hidrógeno, lo cual provoca un intenso burbujeo a medida que aumenta la intensidad de corriente. Los iones hidroxilo presentes en la solución migran al ánodo experimentando una reacción de oxidación y des-

prendiendo oxígeno lo cual incrementa el burbujeo y la mayor formación de espuma en el sistema.

Como se observó el tiempo no es significativo desde el punto de vista estadístico para la obtención de los sólidos en la espuma, aún cuando esta es una variable importante en el proceso de electrocoagulación, este fenómeno se debe a dos

aspectos fundamentales, el primero al rango escogido para el estudio de esta variable, y en segundo lugar a que al utilizar una mayor intensidad de corriente, se hacen más rápidos todos los procesos de electrodos mencionados anteriormente, y esto es lo que define la mayor cantidad de espuma y de sólidos obtenidos en la espuma.

Las interacciones entre las variables no fueron significativas, esto se debe a que en el rango escogido para el análisis de las variables estudiadas el proceso tiene un comportamiento lineal no llegando a obtenerse una zona de curvatura u óptimo.

### Análisis de los resultados del proceso de coagulación-floculación

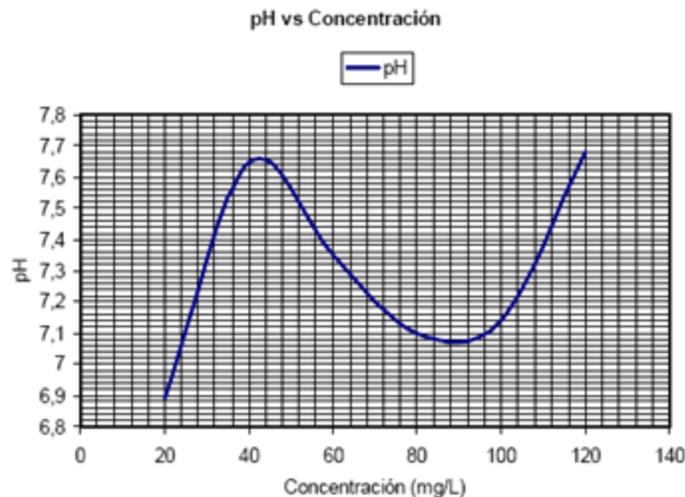
El líquido residual de la electrocoagulación fue sometido a un proceso de coagulación-floculación, y para el mejor control de este proceso se utilizó el método de las pruebas de jarras.

Este método de las pruebas de jarras fue el empleado, en este trabajo, para determinar la mejor dosis del coagulante PERCOL 734, utilizando el líquido residual de la electrocoagulación.

Los parámetros medidos en todos los casos fueron: pH, conductividad eléctrica, sólidos totales y DQO, los resultados obtenidos se muestran en las gráficas 7-10, obteniéndose las siguientes observaciones.

En la gráfica 7 se observa que:

- Inicialmente a medida que se añade el coagulante aumenta el pH debido a que como este coagulante es catiónico, reacciona con los iones hidroxilo (OH<sup>-</sup>) de la solución para formar compuestos de carácter alcalino.
- Después de pasar por el máximo valor de pH (7,68), donde todo el coagulante ha reaccionado con los iones hidroxilo, el pH comienza a disminuir a medida que aumenta la dosis de coagulante hasta llegar a un mínimo valor de pH (6,89), en el cual el coagulante está en exceso y como presenta carácter ácido el pH baja. Cuando el coagulante está en exceso, comienza la reestabilización de la carga de las partículas; esto puede explicarse debido a que el exceso de coagulante es adsorbido en la superficie de la partícula, produciendo una carga invertida a la carga original, por lo que el coagulante vuelve a reaccionar con los iones hidroxilo (OH<sup>-</sup>) de la solución para formar compuestos de carácter alcalino elevando el pH.



Gráf. 7 Curva que demuestra el comportamiento del pH con respecto a la concentración de coagulante.

En los gráficos 8-10 se observa que:

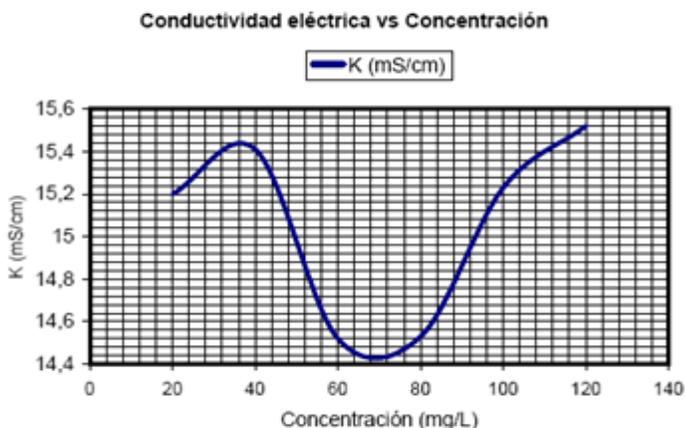
- Ocurre una remoción de la DQO, lográndose una disminución de la materia orgánica de un 59 % de remoción para una concentración de 60 mg/L, lo que

permite confirmar que a partir de la acción de este producto en el proceso de coagulación-floculación, se logra que una buena parte de estos contaminantes sean arrastrados por los flóculos formados.

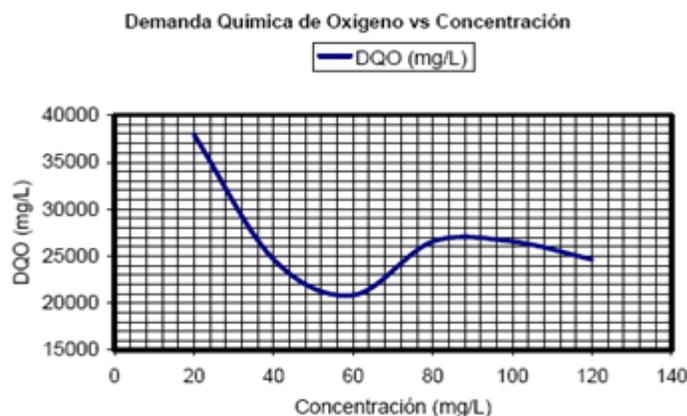
- Como se observa existe un efecto favorable del proceso, en un rango de concentración entre 60 y 80 mg/L, en cuanto a la remoción de los sólidos totales y la conductividad presentes inicialmente. Aunque estos resultados no se acercan a los reportados por las Normas Cubanas, sí repercuten positivamente en la disminución de la agresividad de este líquido residual.
- También se muestra que para la mayoría de las dosis utilizadas existió remoción de los sólidos totales y la DQO, y disminución de la conductividad para el coagulante estudiado; aunque la mejor dosis de coagulante obtenida, por el método de control de las Pruebas de Jarras, se encuentra entre 60 y 80 mg/L.
- Cuando se adiciona un exceso de coagulante al agua a tratar (por encima de 80 mg/L), se

produce la reestabilización de la carga de las partículas; esto se puede explicar debido a que el exceso de coagulante es adsorbido en la superficie de la partícula, produciendo una carga invertida a la carga original. Todo este análisis explica el incremento de todos los parámetros físico-químicos analizados por encima de la dosis óptima.

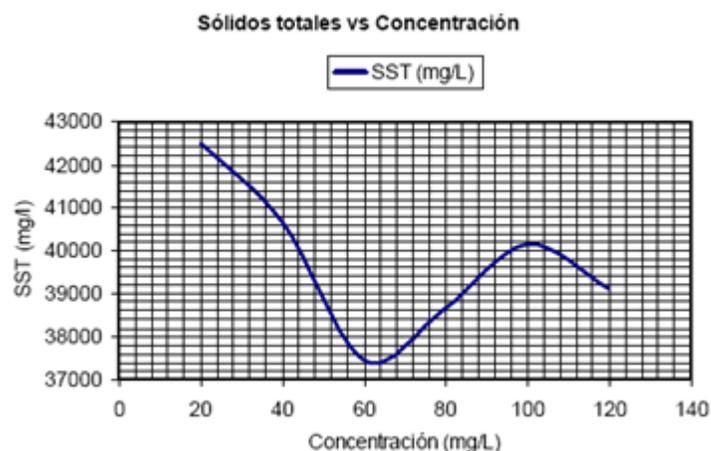
- Al continuar incrementando la concentración del coagulante por encima de 100 mg/L, como se observa en los gráficos 9 y 10, se produce una sobresaturación provocando una rápida precipitación de los coagulantes, los cuales arrastran en su descenso a las partículas que conforman la DQO y los sólidos totales (Efecto de barrido), comenzando a disminuir estos valores.



**Gráf. 8** Curva que demuestra el comportamiento de la conductividad eléctrica con respecto a la concentración de coagulante.



**Gráf. 9** Curva que demuestra el comportamiento de la DQO con respecto a la concentración de coagulante.



**Gráf. 10** Curva que demuestra el comportamiento de los sólidos totales con respecto a la concentración de coagulante.

## Conclusiones

1. Para los sólidos obtenidos en el líquido, el pH fue la variable que mayor influencia tuvo en la cantidad de sólidos, aunque el tiempo también mostró un efecto significativo, alcanzándose la mayor cantidad de sólidos al mayor valor de pH y de tiempo. La intensidad de corriente no resultó significativa estadísticamente en el rango utilizado.
2. Para los sólidos obtenidos en el líquido y en la espuma, ninguna interacción entre las variables resultó significativa.
3. Para los sólidos obtenidos en la espuma, las variables pH e Intensidad de corriente fueron significativas, siendo el pH la variable de mayor importancia, alcanzándose la mayor cantidad de sólidos al mayor valor de pH y de intensidad de corriente. El tiempo no fue significativo estadísticamente en el rango utilizado.
4. Los sólidos totales (sst) y la demanda química de oxígeno del líquido residual proveniente de la electrocoagulación disminuye con respecto al valor que presenta la vinaza original.
5. El pH y la conductividad del líquido residual proveniente de la electrocoagulación, aumenta con respecto al valor que presenta la vinaza original en el nivel inferior.

6. El rango óptimo de concentración de coagulante se encuentra entre 60 y 80 mg/L. En este rango óptimo de concentración de coagulante, las variables SST, DQO y conductividad del líquido residual, disminuyen.
7. Cuando se sobrepasa la dosis óptima de coagulante, el pH comienza a disminuir.

## Recomendaciones

1. Estudiar como la variable influyente en el proceso de electrocoagulación, y la distancia entre los electrodos.
2. Utilizar en el proceso de electrocoagulación electrodos alternos de hierro y aluminio.
3. Hallar el punto isoeléctrico en el proceso de electrocoagulación y de coagulación-floculación.
4. Estudiar la influencia de otros tipos de coagulantes y comparar el comportamiento con el PERCOL 734.
5. Determinar el rango de concentración óptima para el mejor coagulante.

## Bibliografía

1. Almeida, Maria del Pilar, *Estudio de algunas vías de aprovechamiento de los efluentes de destilería*,

- 
- Revistas ICIDCA sobre los derivados de la caña de azúcar, pág. 4, No. 2, vol. XXI, 1987.
2. *Alternativas para tratamiento y purificación del agua por el método de electrocoagulación*, Búsqueda el 15 de Marzo, 2008, Disponible en: <http://www.geocities.com/seofeo555/Q003.html?200612>
  3. Amirtharajah, A., *The mechanisms of coagulation. Seminario Nacional sobre Coagulación y Filtración Directa*, Universidad de São Paulo, Escuela de Ingeniería de San Carlos, 1989.
  4. Andía Cárdenas, Yolanda; de Vargas, Lidia y Barrenechea Martel, Ada, *Tratamiento de agua: coagulación floculación*, Evaluación de Plantas y Desarrollo Tecnológico, SEDAPAL. Lima, Abril del 2000.
  5. Arias Lafargue, Telvia, *Consideraciones de MIZC para mitigar los impactos costeros producidos por el complejo industrial Cervecería-Destilería Hatuey*, Tesis de Maestría en MIZC, 2006.
  7. Bourzac Suárez, Verónica y Mesa Mesa, Liliana, *Obtención de inhibidores ecológicos de la corrosión por electrocoagulación a partir de la vinaza*, Trabajo de Diploma, Facultad de Ing. Química, 2006.
  8. CITMA, *Aguas y saneamiento*, 2005.
  9. \_\_\_\_\_, *Contaminación y gestión de residuos*, 1998.
  10. \_\_\_\_\_, *Introducción de la PML en la gestión ambiental*, La Habana. Septiembre, pág. 6-38, 2002.
  11. Colectivo de autores, *Características de la vinaza de destilería (mosto). Realizada por el Grupo de tratamiento y aprovechamiento de residuales de la Facultad de Ciencias Naturales*, Universidad de Oriente, 2004.
  12. Crespo Sariol, Harold, *Proyecto de Planta para "RECICLAR" el mosto de la Destilería*, Trabajo de Diploma, Facultad de Ing. Química, 2005.
  13. Durán Reyes, Osmay, *Diseño de una Propuesta de Procedimiento para la Gestión de la Minimización de Residuos en el Sector Empresarial de la Provincia de Santiago de Cuba*, Tesis presentada en opción al título académico de Master en Gerencia de la Ciencia y la Innovación, Instituto Superior de Ciencias y Tecnologías Aplicadas, Mayo, 2004.
  14. Johnson, P. N.; Amirtharajah, A., *Ferric chloride and alum as single and dual coagulants*, Journal of the American Water Works Association, vol. 75, 1983.
  15. Kirchmer, C.; Pérez Carrión, J., *Coagulación. Programa Regional OPS/HPE/CEPIS de Mejoramiento de la Calidad del Agua para Consumo Humano*, Versión preliminar, 1981.
  16. *La coagulación – floculación en el proceso de tratamiento*, Búsqueda el 25 de Marzo, 2008, Disponible en: <http://potablewater.iespana.es/coagulacion-floculacion.htm>.
  17. Meriño Nápoles, Thais-Len, *Caracterización del residual líquido producto del mosto de la destilería Hatuey*, Trabajo de Diploma, Facultad de Ing. Química, 2007.
  18. Morante, Gonzalo, *Electrocoagulación de aguas residuales*, Revista colombiana de física, vol. 34, No. 2, 2002, Búsqueda el 6 de Marzo, 2008, Disponible en: [http://calima.univalle.edu.co/revista/vol34\\_2/articulos/pdf/3402484.pdf](http://calima.univalle.edu.co/revista/vol34_2/articulos/pdf/3402484.pdf)
  19. NC: 360:2004, *Vertimiento de aguas residuales a la zona costera y aguas marinas-especificaciones*, Oficina Nacional de Normalización, Ciudad de La Habana, 1ra edición, 2004.
  20. Pereira Cabrera, Sonia, *Estudio del estado actual de contaminación de la bahía santiaguera en la zona portuaria*, Trabajo de Diploma, Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas, 2001.
  21. *Producción más limpia: Qué es y cómo promoverla*, Búsqueda el 15 de Marzo, 2008, Disponible en: [www.medioambienteonline.com/site/root/resources/feature\\_article/2198.html](http://www.medioambienteonline.com/site/root/resources/feature_article/2198.html)
  22. Piñirí Guilarte, Norleis; Díaz González Alexander. *Tratamiento de la vinaza por electrocoagulación*, Trabajo de Diploma, Facultad de Ing. Química. 2007.
  23. Richter, C. A., *Floculación. Manual de Instrucción del Programa Regional OPS/HEP/CEPIS de Mejoramiento de la Calidad del Agua para Consumo Humano*, Versión preliminar, 1981.
  24. Richter, C. A., *Sistemas de floculación acelerada*, Curitiba, SANEPAR, 1982.
  25. Richter, C. A., *Sistemas simplificados de floculación*, Compañía de Saneamiento de Paraná (SANEPAR), Brasil, 1987.
  26. *Soluciones ambientales desde el origen. Hidrobiotecnología*, Búsqueda el 3 de Marzo, 2008. Disponible en: <http://www.hidrobiotecnologia.com>
  27. *Una solución factible para la clarificación de aguas para consumo humano*, Revista BETSIME, La revista del empresario cubano. Búsqueda el 3 de Marzo, 2008, Disponible en: [www.betsime.disaicu/secciones/tec\\_1\\_01.htm](http://www.betsime.disaicu/secciones/tec_1_01.htm)
  28. Wallen Rencurrell, Arianna, *La electrocoagulación como método de tratamiento para la depuración del residual de las destilerías de alcohol*, Trabajo de Diploma, Facultad de Ing. Química, 2006.