

Artículo científico

Propuesta de tratamiento para el reúso de agua condensada resultante de la destilación de bioetanol

Jessy Mabel Alfaro Soto

Destilería Bioetanol, S.A

Dirección para recibir correspondencia: alfaro.jessy@hotmail.com

Recibido: 17 de julio 2020 Aprobado: 20 de agosto 2020

Resumen

El agua de condensados proveniente de la evaporación de vinaza es un subproducto altamente contaminante de la destilación de bioetanol, conocido como flemaza. Contiene acidez láctica y acética que impiden su total reutilización por afectar a la eficiencia de la fermentación. Al ser descargadas directamente a un cuerpo receptor puede alterar su pH e inhibir o afectar la vida acuática. Se realizaron pruebas preliminares con bentonita y carbón activado; este último resultó ser la mejor alternativa para la remoción de acidez láctica y acética en flemaza. Para el diseño a escala real, se realizó un prototipo, a través de un frasco de marlotte y tres filtros con alturas de 10, 14 y 18 cm. El sistema alimentó los lechos fijos con un caudal constante de 0.02 L/min para obtener curvas de saturación. El tratamiento óptimo para reutilizar la flemaza en el mismo proceso industrial de producción de bioetanol es a través de adsorción con carbón activado. Requiriendo 5 filtros, cada uno con un volumen de 9.40 m³, alimentados con un flujo de 12.00 m³/h y una velocidad superficial de 0.60 m/h.

Palabras clave: Flemaza, ácido láctico, ácido acético, carbón activado, lecho filtrante, adsorción, curvas de saturación.

Abstract

Condensed water obtained from vinasse evaporation, highly polluting Bioethanol distillation's subproduct, known as "bottoms flow to drain", contains lactic and acetic acid which avoid its effective reuse because it inhibits the fermentation efficiency. If it is discharged to a body of water, can disturb the original pH and inhibit or affect aquatic ecosystems. There were made preliminary tests with bentonite and activated carbon; the latter being the best alternative for the removal of lactic and acetic acid in the bottoms flow to drain. For the design, a prototype was made using a Mariotte bottle and three filters containing 10, 14 and 18 cm of activated carbon height. The system fed the three filters with a constant flow of 0.02 L/min to get the saturation curves. The adsorption treatment with activated carbon for the "bottoms flow to drain" which leads to a six-month saturation time (sugar cane harvest period) requires five granular activated carbon filters. Each filter needs a 9.40 m³ volume, feed with bottoms flow to drain in a rate of 12.00 m³/h, keeping a 0.60 m/h superficial velocity.

Keywords: Bottoms flow to drain, lactic acid, acetic acid, activated carbon, filter bed, adsorption, saturation curves.

Antecedentes

En el artículo 3 del acuerdo gubernativo 137-2016 se establece la definición y la forma en la que está conformado un plan de gestión ambiental (PGA). "Conjunto de operaciones técnicas y acciones propuestas, que tienen como objetivo asegurar la operación de un proyecto, obra, industria o actividad, dentro de las normas legales, técnicas y ambientales para prevenir, corregir o mitigar los impactos o riesgos

ambientales negativos y asegurar a los proponentes, la mejora continua y la compatibilidad con el ambiente." Esto originó una guía ambiental del sector de la caña de azúcar. Aprobada en el acuerdo ministerial número 274-2018 el 13 de julio de 2018.

En dicha guía se menciona que la destilería, proceso de elaboración de alcohol a partir de subproductos de la obtención de azúcar es una actividad interrelacionada. Tarea vinculada a los procesos industriales del sector de

la caña del azúcar. Se establecen medidas de evaluación, monitoreo y prevención respecto al impacto ambiental que este proceso pueda generar.

Consecuentemente, se menciona que esta actividad puede promover la reducción de los niveles de agua disponible en fuentes superficiales o subterráneas y/o emitir aguas residuales u otros compuestos. Por lo tanto, se establece, como medidas de prevención, la instalación y mantenimiento de equipos para el ahorro de agua, reducción del consumo de agua en la fabricación de alcohol a través de las opciones tecnológicas más convenientes a cada planta y prevención y manejo de derrames de vinaza.

En Cuba, en el año 2013 se realizaron diversos estudios enfocados en la reutilización de la vinaza. El objeto era reducir el excesivo consumo de agua para la producción de alcohol y, a su vez, reutilizar el subproducto para aprovechar los nutrientes que este poseía. Como resultado, se evidenció que la vinaza y la flemaza, agua condensada, producto de la evaporación de la vinaza, no pueden recircularse en su totalidad, pues afectan considerablemente la eficiencia del proceso fermentativo del alcohol.

Yenisleidy Martínez (2013), junto con sus colaboradores, definió que los mejores resultados se obtienen cuando solamente se utiliza agua o una mezcla en la que se tenga 70.00 % de agua, 15.00 % de vinazas y 15.00 % de flemazas. Igualmente, afirma que “los mejores resultados se logran a medida que se aumenta la composición del agua y la composición de la vinaza y flemaza se mantiene igual o exista un ligero aumento de la vinaza con respecto a la flemaza”.

Conjuntamente, Ana Cecilia de Armas Martínez (2013), en su trabajo Estrategia de tecnología limpia para una fábrica de alcohol extrafino, afirmó que la mezcla óptima es de 80.00 % de agua, 12.00 % de vinazas y 8.00% de flemazas para obtener una eficiencia de fermentación de 76,87 %. Esto permite un ahorro del 20.00% del agua que se emplea para la fermentación.

La cantidad de vinaza y flemaza añadida en el proceso de fermentación alcohólica se relaciona con el impacto de las condiciones óptimas de la levadura *Saccharomyces Cerevisiae*. Precisamente, Joaquín de Jesús Obregón (2017), en su trabajo Recirculación de vinazas al proceso de fermentación alcohólica para

reducir volúmenes generados e impacto ambiental indica que la recirculación es un proceder “no infalible”. El aumento de ácidos volátiles, particularmente el ácido acético, y fenoles, inhiben a la levadura. Asegura que “la recirculación de vinazas, por lo general sustituye entre el 30.00 y 50.00 % del agua, pero eso recae en cambiar la cepa de levadura, afectando los rendimientos y costos de producción”.

Consecuentemente, es necesario dar un tratamiento a la flemaza para que sea factible su reúso. En Praj Industries, una industria de la India que se dedica a ofrecer y producir tecnología e ingeniería guiada por la preocupación ambiental brinda el “sistema anaeróbico biológico ECOMET UF”. Este tratamiento promete tratar las flemazas por biometanaje y luego hacerlas pasar por membranas seguidas por ultrafiltración.

Metodología

El estudio se llevó a cabo en el área de Bioetanol, S.A. del Ingenio Pantaleón con agua de flemaza. Esta se recolectó en el tanque 1508, que recolecta la flemaza, condensada de la evaporación de la vinaza. Para determinar el tratamiento adecuado para el reúso, se consideró seguir cuatro fases distintas.

Fase 1

La primera fase consistió en un estudio de alcance exploratorio para caracterizar de forma fisicoquímica y microbiológica el agua de los condensados del proceso de evaporación de la vinaza. Para esto se utilizó un diseño no experimental. El objetivo era observar los parámetros que el agua de los condensados posee, sin modificar intencionalmente ninguna variable. Los parámetros que se determinaron fueron los siguientes, tomando como referencia el artículo 21 del Acuerdo Gubernativo 236-2006 y estudios previos realizados a la flemaza:

- Temperatura
- Potencial de hidrógeno
- Demanda bioquímica de oxígeno
- Demanda química de oxígeno
- Sólidos totales
- Ácido acético:
- Ácido láctico
- Coliformes totales
- Nitrógeno total
- Fósforo total

Los resultados de esta primera fase se encuentran en la Tabla 3 de la sección de resultados.

Fase 2

La segunda fase implicó una investigación explicativa con estudio experimental. En primer lugar, luego de la caracterización de la fase 1, se propuso un tratamiento A y un tratamiento B, a través del cual se monitorearon las variables antes y después de realizado el tratamiento A y B.

El tratamiento A consistió en la adsorción por la arcilla activada conocida como bentonita. El tipo de bentonita utilizada fue provista por la empresa Clariant en México, bajo el nombre de EX MEX 1575.

Se tomó una muestra de flemaza y se determinaron los valores iniciales de acidez láctica y acidez acética. Posteriormente, se realizó la verificación de la dosis óptima de bentonita activada y se agregaron diferentes dosis de bentonita a 200 mL de flemaza. Se agitó a 100 y 200 rpm durante 20 minutos. Se dejó reposar para promover la precipitación y al sobrenadante se le analizó la acidez láctica y acética final. Los resultados se presentan en la Tabla 4 y Figuras 2 y 3.

Para el tratamiento B se utilizó carbón activado de coco con lavado ácido y de forma granular, provista por la empresa CalgonCarbon, bajo el nombre de OLC AW 12x40. El carbón activado se colocó en forma de lecho fijo.

Se diseñó una columna de carbón activado de 5 cm de diámetro y 20 cm de altura. Según las consideraciones de diseño, provista por el proveedor de carbón activado, la velocidad de flujo a través de la columna se consideró de 1 gpm/pie². Se tomó una muestra de flemaza y se determinaron los valores iniciales de acidez láctica y acidez acética y los valores finales luego de salida de la columna. Los resultados se presentan en la Tabla 5.

Fase 3

Según los resultados de la fase 2, se determinó que la mejor opción para el tratamiento de la flemaza es el tratamiento B. Es decir, con carbón activado granular.

De esta forma, se diseñó un prototipo, con los criterios que se establecen en la Tabla 1, que consistió en tres filtros o columnas de carbón activado con alturas de 10, 14 y 18 cm. Se mantuvo una alimentación de 0,02 L/min

a través de un frasco de Mariotte y se midió la concentración de acidez láctica y acética al final de la columna en diversos periodos de tiempo. Esto permitió determinar la longitud de lecho y tiempo de ruptura, cuando la relación de la concentración de la salida y entrada sobrepasa el 20 %, para el sistema carbón activado – flemaza, en las condiciones de la destilería.

Tabla 1. Criterios de diseño

Parámetro	Valor			Unidad
	10	14	18	
Altura	10	14	18	cm
Velocidad de flujo	1			gpm/pie ²
Diámetro	10			cm
Caudal entrada	0.021			L/min

Muestra de cálculo fase 3

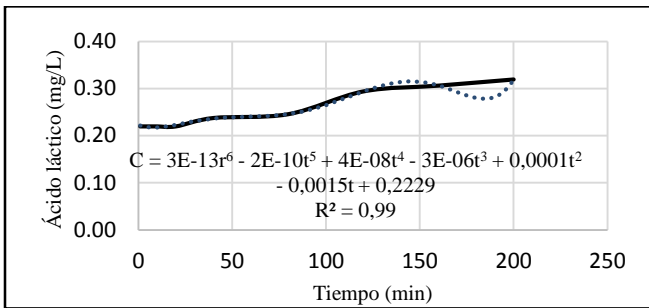
- Construcción de curva de ruptura:

A partir de los datos obtenidos del prototipo para el ácido láctico, se calcula C/Co y se obtienen los datos de la Tabla 2 y la Figura 1:

Tabla 2. Datos obtenidos de prototipo

t	Concentración		Relación concentración final vs inicial (C/Co)
0	32.5	mg/L	
1	7.1	mg/L	0.22
5	7.1	mg/L	0.22
10	7.1	mg/L	0.22
20	7.1	mg/L	0.22
40	7.7	mg/L	0.24
80	8.0	mg/L	0.25
120	9.5	mg/L	0.29
160	9.9	mg/L	0.31
200	10.4	mg/L	0.32

Figura 1. Curva de ruptura de ácido láctico obtenida del prototipo



Donde:

C: concentración de salida del filtro en función del tiempo, mg/L.

Las curvas de ruptura que se presentan en las Figuras 4 a la 9 en la sección de resultados resumen los datos obtenidos de los 3 filtros de carbón activado.

Co: Concentración de entrada al filtro, mg/L

- Estimación de tiempo de saturación, en punto de ruptura: gráficamente o con la ayuda de mecanismos de interpolación; es decir, cuando C/Co equivale a 0.2.

$$t_b = 18.20 \text{ min}$$

- Estimación de tiempo estequiométrico de saturación: gráficamente o con la ayuda de mecanismos de interpolación; es decir, cuando C/Co equivale a 1.0.

$$t^* = 2,289.51 \text{ min}$$

- Cálculo del tiempo de ruptura y tiempo estequiométrico por integración gráfica: con ayuda del programa wólfam alpha se obtienen las siguientes integrales:

$$t_u = \int_0^{t_b} \left(1 - \frac{C}{C_o}\right) dt. \quad (1)$$

$$t_d = \int_{t_b}^{t^*} \left(1 - \frac{C}{C_o}\right) dt \quad (2)$$

Donde:

tu: tiempo de ruptura del filtro de carbón activado, min

td: tiempo estequiométrico del filtro de carbón activado, min.

$$t_u = \int_0^{119.66} \left(1 - \frac{C}{C_o}\right) dt = 15.81 \text{ min}$$

$$t_d = \int_{119.66}^{333.04} \left(1 - \frac{C}{C_o}\right) dt = 3000.0 \text{ min}$$

- Cálculo de fracción útil de la columna:

$$f_{\text{útil}} = \frac{t_u}{t_u + t_d} \quad (3)$$

Donde:

f_{útil}: fracción útil adsorbente del filtro de carbón activado

$$f_{\text{útil}} = \frac{15.81 \text{ min}}{15.81 \text{ min} + 3000 \text{ min}} = 0.0052$$

- Cálculo de la longitud no utilizada del filtro:

$$LUB = (1 - f_{\text{útil}}) * L \quad (4)$$

Donde:

LUB: longitud del filtro no utilizada en punto de ruptura, cm

L: longitud del filtro de carbón activado, cm

$$LUB = (1 - 0.0052) * 14 \text{ cm} = 13.93 \text{ cm}$$

- Cálculo de velocidad superficial en el filtro: para el prototipo utilizado, se fabricó un frasco de mariote que permitía mantener un caudal de 0.021 L/min (1.26E-3 m³/h) hacia los filtros que tenían 5.08 cm de diámetro. La velocidad superficial se calcula de la siguiente forma:

$$u = \frac{Q}{s} \quad (5)$$

Donde:

u: velocidad superficial en el filtro del prototipo, m/h

Q: caudal de ingreso al filtro del prototipo, m³/h

s: área superficial del filtro del prototipo, m²

$$u = \frac{1.26E - 3 \frac{m^3}{h}}{2.03E - 3 m^2} = 0.62 \text{ m/h}$$

- Estimación de la razón de adsorción: la razón de adsorción es típica del sistema adsorbato-adsorbente que se utilice en las condiciones que tenga; por lo tanto, depende de la concentración inicial, la longitud del filtro, el tiempo estequiométrico y la velocidad superficial.

$$p_u q_{sat} = \frac{100 * u * C_o * (t_d + t_u)}{60 * L} \quad (6)$$

Donde:

p_uq_{sat}: razón de adsorción en el filtro, mg/L

td: tiempo estequiométrico del filtro de carbón activado, min

$$p_u q_{sat} = \frac{100 * 0.62 \frac{m}{h} * \frac{32.5 mg}{L} * (15.81 min + 3000 min)}{60 * 14 cm}$$

$$p_u q_{sat} = 7234.35 mg/L$$

Posterior al análisis según las etapas descritas de cálculo, se obtuvieron las variables de razón de adsorción y la longitud del filtro no utilizada que servirán para el diseño del tratamiento a escala industrial o real. Estos valores se presentan en la Tabla 6 de la sección de resultados.

Fase 4

La última fase implicó el diseño a escala real que se ajuste al periodo de zafra.

Muestra de cálculo fase 4

- Cálculo del volumen de filtro industrial: considerando que la zafra dura alrededor de 6 meses (4,320 horas), se plantea diseñar el tratamiento para que el o los filtros trabajen durante este tiempo y se reactiven durante el periodo de mantenimiento/reparación. El sistema se plantea para un caudal de flemaza de 60 m³/h, una concentración promedio de 19.38 mg/L de ácido láctico según la caracterización y una razón de adsorción promedio de 106,912 mg/L

$$V = \frac{Q^* * C_o * t_d^*}{p_u q_{sat}} \quad (7)$$

Donde:

V: Volumen de diseño del filtro industrial, m³

t_d^{*}: Tiempo estequiométrico de diseño, h

Q^{*}: Caudal de diseño, m³/h

$$V = \frac{60 \frac{m^3}{h} * 19.38 \frac{mg}{L} * 4320 h}{106,912 mg/L} = 47m^3$$

- Diseño de batería de filtros: a partir del volumen total de diseño del filtro industrial, se propone una batería de filtros. Cada filtro tendrá 2m de diámetro y 3m de alto.

$$N_{filtros} = \frac{V}{h_f * \frac{\pi}{4} * d_f^2} \quad (8)$$

Donde:

N_{filtros}: Número de filtros de carbón activado

h_f: Altura de cada filtro de carbón activado, m

d_f: Diámetro de cada filtro de carbón activado, m

$$N_{filtros} = \frac{47 m^3}{3 m * \frac{\pi}{4} * (2 m)^2} = 5 filtros$$

La batería de filtros, que representa el tratamiento propuesto para el reúso de la flemaza se detalla en la Tabla 7 y Figura 10 de la sección de resultados.

Resultados

Fase 1: caracterización

Tabla 3. Medias de muestras caracterización flemaza

Prueba	Unidad	Enero		Marzo-abril	
		Media	Desviación estándar	Media	Desviación estándar
Coliformes totales	UFC / mL	0	0	-	-
Nitrógeno total	mg/L	8	2	13	18
Fosfatos	mg/L	2	3	2	2
Ácido acético	mg/L	1559	472	861	100
Ácido láctico	mg/L	2629	6403	25	16
Sólidos totales	mg/L	-	-	1097	951
DQO	mg/L	-	-	1983	649
DBO ₅	mg/L	-	-	1927	223
Turbidez	NTU	-	-	35	41

Fase 2: pruebas preliminares

Tabla 4. Resultados de la prueba preliminar con bentonita

mezcla	Agua	Bent	Prueba 1		Prueba 2	
			A. acético	Ácido láctico	A. acético	Ácido láctico
ppm	mL	g	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
0		0	1045	15.1	1045	16.9
2000	200	0.4	817	13.2	757	14.3
4000	200	0.8	637	11.8	589	11.4

mezcla	Agua	Bent	Prueba 1		Prueba 2	
			A. acético	Ácido láctico	A. acético	Ácido láctico
ppm	mL	g	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
6000	200	1.2	396	11.0	312	13.6
8000	200	1.6	300	10.5	216	12.7
10000	200	2.0	180	10.2	1369	13.2
12000	200	2.4	180	10.2	24	13.7
14000	200	2.8	60	11.3	24	12.8
16000	200	3.2	60	11.7	24	14.1
18000	200	3.6	84	12.3	36	12.9
20000	200	4.0	60	12.3	24	15.4
22000	200	4.4	60	12.3	12	14.9
24000	200	4.8	36	12.0	12	14.4

Figura 2. Concentración de ácido acético resultante en función de bentonita activada agregada

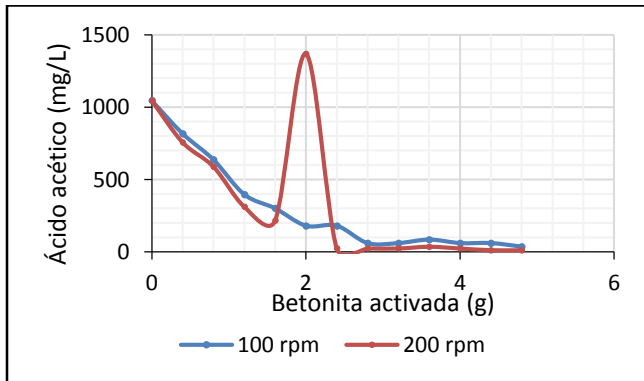


Figura 3. Concentración de ácido láctico resultante en función de bentonita activada agregada

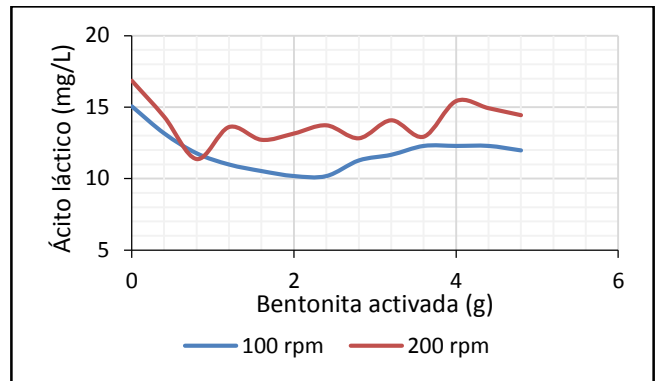


Tabla 5. Eficiencias remoción adsorbedor lecho fijo, columna 20 cm, carbón activado granular.

Parámetro	Ácido láctico (mg/L)	Ácido acético (mg/L)	Turbiedad (NTU)
Flemaza inicial	15	97	8
Flemaza post-tratamiento	< 3	12	0.5
Eficiencia remoción	> 80%	99%	94%

Fase 3: Generación de prototipo para el tratamiento de flemaza

Figura 4. Curva de ruptura ácido láctico, columna 10 cm

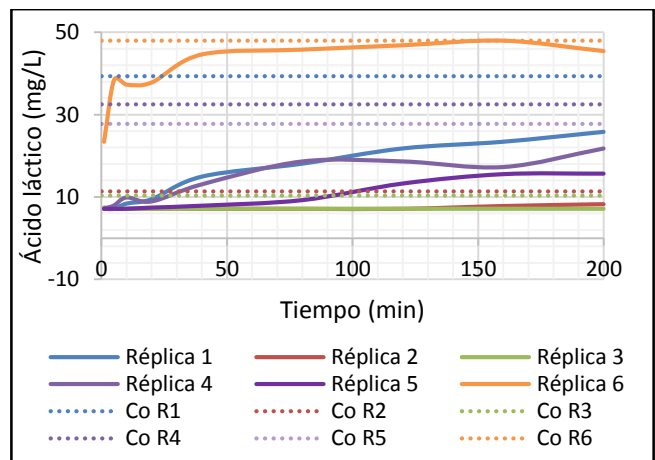


Figura 5. Curva de ruptura ácido láctico, columna 14 cm

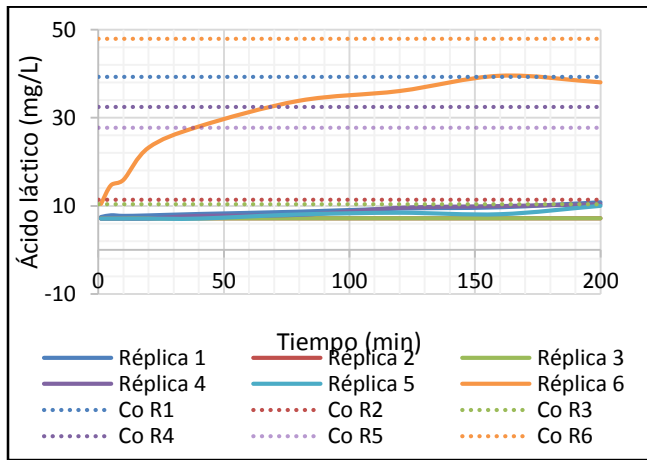


Figura 8. Curva de ruptura ácido acético, columna 14 cm

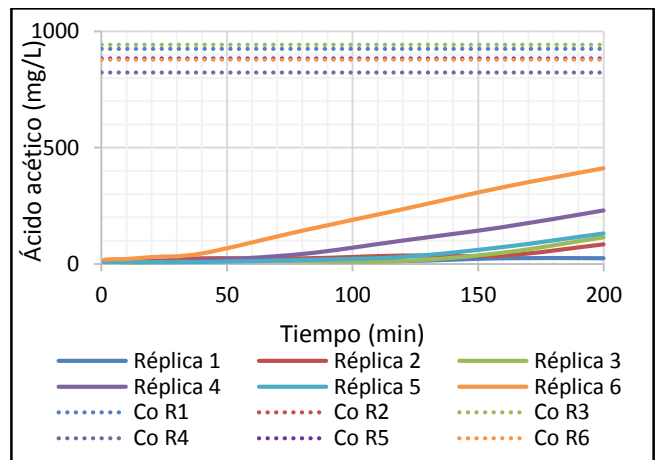


Figura 6. Curva de ruptura ácido láctico, columna 18 cm

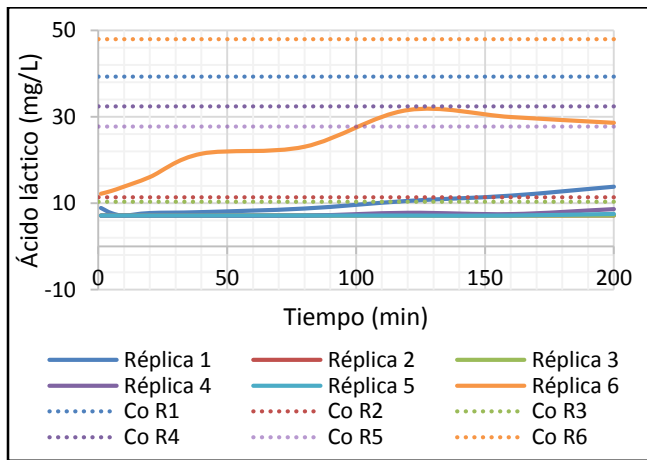


Figura 9. Curva de ruptura ácido acético, columna 18 cm

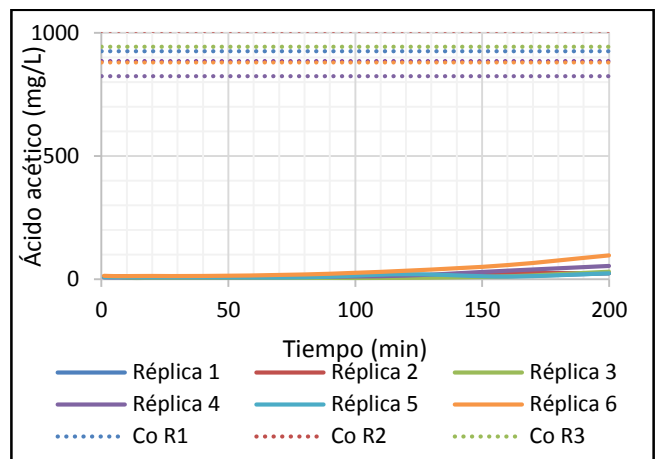


Figura 7. Curva de ruptura ácido acético, columna 10 cm

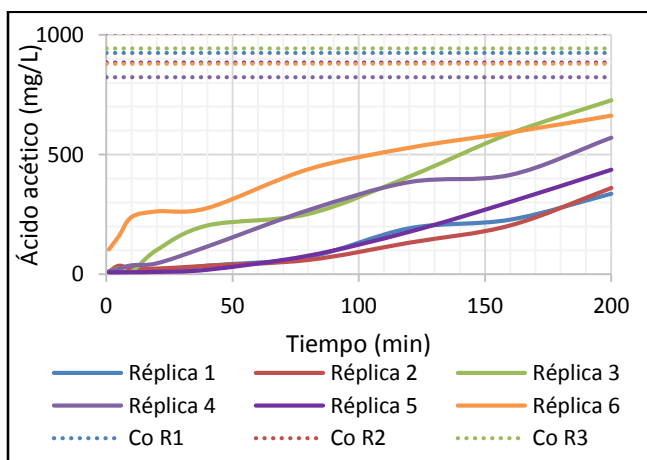


Tabla 6. Variables para diseño a escala industrial obtenidas del prototipo

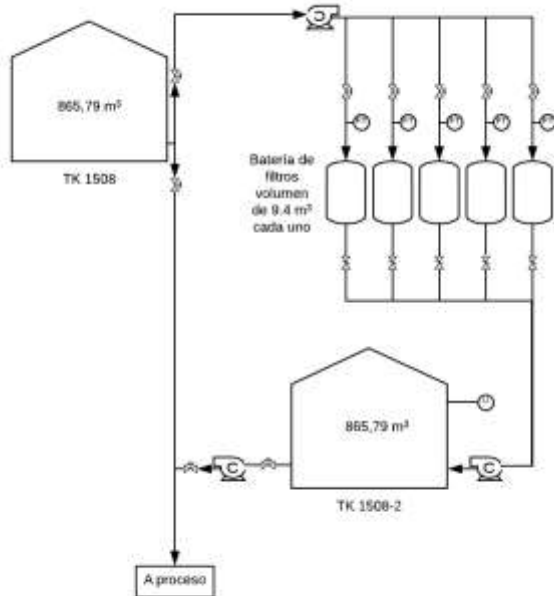
Variable	Ácido acético		Ácido láctico	
	Media	Desviación estándar	Méda	Desviación estándar
LUB (cm)	9.2	5.2	13.3	3.2
Puqsat (mg/L)	283,345	328,308.0	106,912	191,556.7

Fase 4: propuesta de tratamiento de escala industrial

Tabla 7. Propuesta de diseño batería de filtros

Caudal flemaza a tratar	60	m ³ /h
Tiempo duración filtro	6	meses
Volumen total	47	m ³
Diámetro por filtro	2	m
Alto cada filtro	3	m
Volumen de cada filtro	9	m ³
Batería	5	filtros

Figura 10. Diagrama de equipo de propuesta



Análisis de Resultados

El grupo de datos analizados en la caracterización de enero fueron en días consecutivos, sin realizar ninguna selección entre muestras atípicas, con arrastre en evaporación. Por el contrario, en las muestras analizadas en el período de marzo a abril, se seleccionaron muestras únicamente atípicas, con arrastre en evaporación, ya que, en los días normales, sin arrastre en evaporación, las concentraciones de la acidez láctica estaban por debajo del límite de detección del equipo y no contribuían al alcance de esta investigación.

Por lo tanto, en la Tabla 2 se observa que las medias obtenidas en el periodo de marzo a abril, para los cuatro parámetros estudiados, mantienen valores inferiores a las medias obtenidas en enero. Para los parámetros de fósforo total, ácido acético y ácido láctico se evidencia,

además, que la desviación estándar es menor en los días atípicos, en los meses marzo-abril. Por el contrario, con el nitrógeno total si ocurrió un aumento en la desviación estándar que indica mayor variación de este parámetro en los días atípicos.

Con esto se presume que la eficiencia de la planta mejoró en los últimos meses de la zafra; sin embargo, con la variación existente en los diferentes meses del año conlleva a considerar un tratamiento que tenga amplio rango para dichos parámetros; causado por la evidente inestabilidad en la calidad de la flemaza. Se determinó, por tanto, que el tratamiento óptimo para el tipo de agua debía ser por medio de adsorción.

El tratamiento A implicó utilizar arcilla activada, conocida como bentonita, como material adsorbente. En la Figura 2 se observa el comportamiento del ácido acético residual en función de la bentonita añadida. En general se observa una tendencia a disminuir conforme se aumenta la cantidad de adsorbente. Posiblemente al aumentar la cantidad de adsorbente la dosis óptima sería evidente. Los resultados fueron mejores con una velocidad de agitación de 100 rpm, en comparación con la de 200 rpm.

Este mismo comportamiento se observa en la Figura 3, respecto al ácido láctico. Sin embargo, en esta situación se determinó que la dosis que lograba una menor concentración de ácido láctico residual era entre 10,000 a 12,000 ppm de bentonita activada. A pesar de esta “dosis óptima”, la eficiencia de remoción se mantuvo en 32 %.

El tratamiento B, por otro lado, se enfocó en utilizar una columna de carbón activado de 5 cm de diámetro y 20 cm de altura; con una velocidad de flujo de 1gpm/pie², según información provista por el proveedor del carbón activado. Como se puede observar en la Tabla 4, la columna de carbón activado obtuvo una eficiencia de remoción de ácido láctico mayor al 80 % y de ácido acético de 99 %. Por lo que se determinó que era el tratamiento adecuado.

En función de los resultados obtenidos en la segunda fase, se elaboró un prototipo que incluía tres filtros o columnas de carbón activado con tres diferentes alturas: 10, 14 y 18 cm. Esto permitió determinar la longitud de lecho y tiempo de ruptura, cuando la relación de la concentración del salida y entrada sobrepasa el 20 %,

para el sistema carbón activado y flemaza, en las condiciones de la destilería.

Estos resultados se pueden observar en las Figuras 4 a la 9. En cada una de ellas se plasma el perfil de concentración efluente de la columna de carbón activado, a partir del cual se obtiene el tiempo de saturación en el punto de ruptura. Según la metodología del cambio de escala, para diseñar un lecho fijo mayor se obtuvo la longitud de lecho no utilizado (LUB) para cada uno de los filtros, además, se consideraron las seis réplicas que se plantearon según el tamaño de la muestra del estudio experimental. Se obtuvieron 18 datos para el ácido láctico y 18 datos para el ácido acético.

A través de la metodología de cambio de escala, se determinaron las variables de diseño que se presentan en la Tabla 6. En la Tabla 7 se muestran los parámetros del diseño para el tratamiento de la flemaza por adsorción con carbón activado. Estos datos resumen la propuesta de una batería de 5 filtros de carbón activado granular. Cada filtro tendrá un volumen de 9.4 m³ que será alimentado con agua de flemaza a 12 m³/h, con una velocidad superficial de 0.6 m/h. El diseño se planteó para mantener el tratamiento durante los seis meses de zafra, de forma que la reactivación del carbón activado se realice durante el periodo de reparación/mantenimiento.

Conclusiones

El mejor método de tratamiento para la flemaza es por adsorción con carbón activado en un lecho fijo. Elimina en un 80 % el contenido de ácido láctico y en un 99 % el contenido del ácido acético del agua de flemaza, lo que permite su reutilización óptima en el proceso de fermentación de melaza.

El tratamiento con bentonita activada tuvo un rendimiento de 32 % de remoción de ácido láctico en este estudio. Esto probablemente se debe a la saturación del adsorbente por macromoléculas, como arrastres de sacarosa u otros compuestos orgánicos de la flemaza.

El tratamiento de adsorción con carbón activado para agua de flemaza que permita un tiempo de saturación de seis meses implica una batería de 5 filtros de carbón activado granular. Cada filtro tendrá un volumen de 9.4 m³ que será alimentado con agua de flemaza a 12 m³/h, con una velocidad superficial de 0.62 m/h.

Al mejorar la eficiencia de la planta, únicamente la flemaza de los días atípicos se considera susceptible a ser tratada según concentraciones promedio de ácido láctico de 19 mg/L y ácido acético promedio de 867 mg/L.

La razón de adsorción media del sistema “carbón activado – ácido acético” es de 283,345 mg/L con una desviación estándar de 328,308 mg/L; y la razón de adsorción media del sistema “carbón activado – ácido láctico” es de 106,912 mg/L con una desviación estándar de 191,556 mg/L.

La aplicación del tratamiento de adsorción con carbón activado granular permite la reutilización de la flemaza en el mismo proceso productivo de bioetanol y mantener la eficiencia que se requiere en la fermentación.

Referencias

- Castañeda Paredes, Marleni. Evaluación de los procesos de tratamiento de las vinazas de destilerías. Trabajo de graduación de Ing. Químico. Facultad de Ingeniería Química, Universidad Nacional de Trujillo, Perú, 2011. 62 p.
- García, Álvaro; Rojas, Carlos. Posibilidades de uso de la vinaza en la agricultura de acuerdo con su modo de acción en los suelos. Guatemala: Revista Técnicaña. 2005. 40 p.
- González Pereira, Marisleivys. Propuestas de mejoras en la Ronera Havana Club. Trabajo de graduación de Ingeniero Químico. Facultad de Ingeniería Química, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, 2017. 71 p.
- Irisarri, Daniel. Usos industriales y agrícolas de la vinaza de caña de azúcar. Colombia: Técnicaña. 25 p.
- Marrugat, Jaume; et al. Calculadora de tamaño muestral granmo. Software [en línea] <<https://www.imim.cat/ofertadeserveis/software-public/granmo/>> [Consulta: 15 de octubre de 2018]
- McCabe, Warren; et al. Operaciones unitarias en ingeniería química. México: Séptima edición, McGraw Hill. 2007. 1189 p.

- Montoya, María Isabel; et. al. Evaluación del impacto ambiental del proceso de obtención de alcohol carburante utilizando el algoritmo de reducción de residuos. Colombia: Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia, núm. 36, 2006. 85-95 p.
- Obregón, J.J. Recirculación de vinazas de fermentación alcohólica para reducir volúmenes generados e impacto ambiental. Cuba: Revista Márgenes, Vol.5, No.3, 2017. 29-38 p.
- Perrera, Jorge Gustavo. Concentración y combustión de vinazas. Argentina: 2009. 43 p.
- Treybal, Robert. Operaciones de transferencia de masa. 2ª edición. México: McGraw Hill, 2007. 858 p.
- Zúñiga, Vanessa; Gandini, Mario. Caracterización ambiental de las vinazas de residuos de caña de azúcar resultantes de la producción de etanol. Colombia: Dyna, edición 177, 2013. 124-131 p.