



Revista Industrial
y Agrícola de
Tucumán

ISSN 0370-5404

En línea
1851-3018

Tomo 99 (1):
43-52; 2022



ESTACION EXPERIMENTAL
AGROINDUSTRIAL
OBISPO COLOMBRES
Tucumán | Argentina

Av. William Cross 3150
T4101XAC - Las Talitas.
Tucumán, Argentina.

Concentración de vinaza a escala piloto

Oscar A. Diez*, Marcos N. Russo* y Roberto Marcelo Ruiz*

*Sección Ingeniería y Proyectos Agroindustriales - Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC) - Tucumán. Email: oadiez@eeaac.org.ar

RESUMEN

La vinaza generada en el proceso de producción de bioetanol en Tucumán se dispone principalmente en campos, por lo que el costo de transporte y almacenamiento se ve sensiblemente impactado por la disminución del volumen de ese subproducto mediante la concentración.

Utilizando una planta piloto con evaporador de películas descendente, se trabajó simulando individualmente cada etapa de un sistema de quintuple efecto. Los experimentos fueron diseñados de manera que los resultados permitieran evaluar la factibilidad del proceso de concentración de vinaza y las principales variables a controlar, a los fines de simular un sistema de evaporación de múltiple efecto y determinar los coeficientes globales de transferencia de calor.

Los ensayos se completaron satisfactoriamente, aumentando la concentración total de la vinaza de 10° Bx hasta 35° Bx. La viscosidad no presentó problemas en los intervalos de concentración estudiados, siguiendo su valor un comportamiento polinómico según el efecto, de la forma $\mu = 0,145 (ef)^3 - 0,8823 (ef)^2 + 1,3855 (ef) + 1,9219$ [cP].

Se estableció un conjunto de condiciones térmicas para un sistema de cinco efectos, con un intervalo global de temperatura de evaporación que va desde los 105°C para el primer efecto y de 60°C para el último efecto, que posibilitan concentrar vinaza hasta 35° Bx. Para un importante conjunto de componentes químicos de la vinaza, se muestra la evolución en sus concentraciones de acuerdo al Bx y a la etapa del sistema de evaporación. Así, para el caso del potasio, este toma la forma: $1,9118 (ef) + 129,98$ [gr/L/°Bx]; mientras para el calcio: $-1,22 (ef) + 21,8$ [gr/L/°Bx]. El coeficiente global de transferencia de calor varía en función del efecto, dando un comportamiento cuadrático: $-27,497(ef)^2 - 147,91(ef) + 2499$ [W/°C/m²].

Palabras clave: quintuple efecto, evaporador falling film, incrustaciones.

ABSTRACT

Vinasse concentration at pilot scale

In Tucumán, the vinasse generated in the production of bioethanol is used mainly in the fields, so the cost of transportation and storage is significantly affected by the decrease in its volume through its concentration. Using a pilot plant falling film evaporator, each stage of a quintuple system was simulated individually. The tests were designed in such a way that the results made it possible to evaluate the viability of the stillage concentration process and the main variables to control. The tests were successfully completed as stipulated, increasing the total stillage concentration from approximately 10 ° Bx to approximately 35 ° Bx. Viscosity does not present any problem in the concentration ranges studied, its value follows a polynomial behavior according to the effect; $\mu = 0.145 (ef)^3 - 0.8823 (ef)^2 + 1.3855 (ef) + 1.9219$ [cP], where ef is the effect number. A set of thermal conditions was established for a multiple effects system, with an evaporation temperature of 105 ° C for the first effect and 60 ° C for the laser effect. The changes in the concentrations of a significant number of chemical components of the vinasse were determined by analyzing the brix in each evaporation stage and chemical group. In the case of potassium, the concentration is as follows: $1.9118 (ef) + 129.98$ [g / L / °Bx]; while for calcium: $-1.22 (ef) + 21.8$ [g / L / °Bx]. the global heat transfer coefficient changes with the effect number, showing a quadratic form: $-27.497 (ef)^2 - 147.91 (ef) + 2499$ [W / °C / m²]

Key words: vinasse concentration, falling film evaporator, fouling.

Fecha de
recepción:
21/10/2019

Fecha de
aceptación:
09/04/2021

INTRODUCCION

En mayo de 2006 se promulgó en Argentina la Ley 26.093 de Biocombustibles, la cual estableció en su artículo 8 un corte mínimo de 5% de bioetanol en los combustibles para motores Otto. A partir del éxito de esta medida, en 2014 el corte mínimo en las naftas con bioetanol fue elevado al 10%; y en 2016 llegó al 12%. Estas medidas impulsaron la producción de bioetanol de 18.349 m³ en 2009 a 96.034 m³ en 2010; y a 533.978 m³ en 2014 (IPEC, 2015).

En 2016, la producción de bioetanol marcó un nuevo recordal llegando a los 800.000 m³, de los cuales 320.000 m³ fueron producidos por los ingenios del noroeste (Molina, 2016), generando ingresos por 250 millones de dólares.

Este escenario favorable promovió inversiones que enmarcaron a los ingenios en una franca ampliación de la capacidad productiva de sus destilerías, dando como resultado el advenimiento del uso de jugo y mieles ricas para la preparación de los mostos, con caldos de mayor riqueza en azúcares fermentables y, por consiguiente, vinazas con menor carga contaminante. Sin embargo, los volúmenes de vinaza a manejar corresponden a valores que van de 10 y 15 L vinaza/L bioetanol (Cortez and Brosard Pérez, 1997; Moraes *et al.*, 2014), siendo evidente que el aumento de la producción de bioetanol traerá aparejados mayores volúmenes de vinaza, suscitando así grandes esfuerzos para mitigar los problemas ambientales que ello implica (Franck Colombres *et al.*, 2016; Carvalho and Silva, 2011; Larsson and Tengberg, 2014).

En este panorama, la concentración -como parte de un sistema de tratamiento de vinaza- ofrece una amplia gama de posibilidades. La vinaza concentrada puede disponerse para riego, para aportar humedad en el compostaje de la ceniza y cachaza, para la obtención, mediante secado, de fertilizante en polvo y también como combustible en calderas bagaceras tradicionales con material de soporte (RAC, bagazo) (Morandini y Quaiá, 2013). El agua condensada de las etapas de evaporación queda disponible para usos industriales, mientras que la disminución de costos de manejo por transporte y almacenamiento de vinaza es otra bondad a tener en cuenta (Christofolletti *et al.*, 2013).

A pesar de las ventajas arriba citadas, el ámbito académico y científico ha divulgado pocos estudios enfocados puntualmente sobre la concentración de vinaza (Larsson and Tengberg, 2014; Carvalho and Silva, 2011), debido quizás a que las características de las vinazas son intrínsecas y específicas en sí mismas, no solo para cada fábrica, sino como consecuencia del modo de preparar el mosto, los tiempos de fermentación, la procedencia de la caña y hasta la época del año en la cual fue cosechada, haciendo que la información técnica más relevante, sobre todo la referida a coeficientes de transferencia, sea poco representativa, puntual e imposible de extrapolar. Por otro lado, la información disponible sobre evaporadores conocidos como "falling film" (horizontales o verticales) es más abundante, y si bien estos son los de mayor potencial para la concentración de vinaza, los ensayos publicados fueron realizados con fluidos artificiales (Prost *et al.*, 2005; Adib *et al.*, 2009; Mura *et al.*, 2014).

La importancia del bioetanol, tanto en la actuali-

dad como en los próximos años, lo convierte en la fuerza impulsora para la industria de la caña de azúcar, lo que a la vez hace indispensable ahondar en estudios sobre la factibilidad técnica y pormenores de la concentración de la vinaza. De esta forma se dispondrá de información técnica fidedigna que permitirá estudiar con objetividad la estrategia más adecuada de gestión de la vinaza.

Visto esto, durante setiembre, octubre y noviembre de 2016 se llevaron adelante ensayos de concentración de vinaza en una planta piloto con evaporador tipo "falling film", situada en un ingenio del este de la provincia de Tucumán, con el objetivo de simular un sistema de evaporación de múltiple efecto y determinar los coeficientes globales de transferencia de calor en cada efecto.

MATERIALES Y MÉTODOS

Una destilería que procesa mostos azucarados de mieles y melazas de la industrialización de la caña de azúcar, localizada en el este de la provincia de Tucumán, dispuso de los servicios necesarios para el montaje y operación de una planta piloto, con evaporador tipo "falling film", fabricado en la provincia de Santa Fe, República Argentina, por una industria metalúrgica especializada.

Planta piloto

La concepción del equipo permite simular diferentes efectos de un sistema de evaporación múltiple, como así también obtener altas concentraciones en un único paso. Entre las características más sobresalientes del equipo puede citarse el sistema de limpieza CIP ("cleaning in place") y su tablero de control con PLC, display y pantalla táctil; mientras que todas las unidades de la planta piloto y el sistema de cañerías se encuentran construidos íntegramente en acero inoxidable.

La vinaza a concentrar se dispone en un tanque pulmón de 1500 litros de capacidad, el cual asegura un flujo continuo y constante al evaporador, amortiguando las perturbaciones en el caudal de vinaza. El tanque posee una termorresistencia (PT - 100) para el monitoreo de la temperatura del fluido a concentrar.

Por la naturaleza de su operación, el evaporador sufre de incrustaciones que aumentan la resistencia de la transferencia de calor. Por esto, un pequeño tanque balanceador de 100 litros fue provisto especialmente para la limpieza CIP; desde allí se bombean soluciones de hidróxido de sodio para eliminar restos de materia orgánica, y ácido nítrico para tratar las incrustaciones salinas.

La planta piloto posee un evaporador de película descendente de tubos verticales ("falling film"), conformado con 19 tubos de 38 mm y 4 metros de longitud, y un separador ciclónico donde las burbujas de vapor formadas en el seno del líquido son forzadas a dejar el mismo, pasando ya como estado gaseoso al condensador. El ingreso del fluido a concentrar se realiza por la parte superior del evaporador, y con la ayuda de un difusor divergente el fluido se expande en una cámara cónica, para asegurar que la distribución de la vinaza en los tubos sea homogénea.

La vinaza en el fondo del evaporador, que no

pasó por el separador ciclónico, es recirculada por una bomba centrífuga de 1,5 hp a la entrada del evaporador. En el ducto de recirculación se produce la entrada de vinaza desde el tanque pulmón (alimentación), impulsada por una bomba centrífuga. Este sistema de alimentación cuenta con un caudalímetro magnético, un controlador PID y un variador de frecuencia al motor de la bomba, lográndose así obtener el caudal deseado.

El calor necesario para la concentración de la vinaza es provisto por vapor de 3 bar (m) de presión, con un consumo máximo de 300 kg/h. Esta línea de vapor cuenta con filtro y regulador de presión, válvula de control y transmisor de temperatura, mientras que dos manómetros analógicos ubicados aguas arriba y abajo de la válvula control permiten monitorear la presión del vapor de escape y la presión de vapor dentro del encamisado del evaporador.

El vapor vegetal y el condensado de escape fluyen hacia un condensador y ambos condensados son expulsados del sistema por una bomba centrífuga de extracción. La cañería que transporta los vahos provenientes del separador ciclónico hacia el condensador tiene instalada una válvula mariposa que permite regular la temperatura de evaporación de la vinaza según las condiciones de ensayo. Desde el cuerpo de evaporación, dos cañerías, una de media y otra de tres cuartos de pulgada, unen los condensados de escapes al condensador.

En la Figura 1 se muestra el diagrama PI&D que esquematiza la planta piloto y sus componentes. El vacío necesario en las diferentes condiciones de trabajo se obtiene con una bomba de vacío, conectada al condensador mediante una cañería de 1,5”.

Fluido a concentrar (vinaza)

La vinaza a concentrar proviene de la destilación de vinos obtenidos de la fermentación de la *Saccharomyces cerevisiae* en medios azucarados con mieles y melazas originadas en la fabricación de azúcar de caña, lo que origina que los valores analíticos que caracterizan a estas vinazas sean elevados, a comparación de vinos generados a partir de jugo y mieles de mayor pureza. Este no es un dato menor, dado que la concentración habitual de sales de calcio y magnesio originan importantes incrustaciones que bajan la eficiencia térmica del evaporador, dando lugar a limpiezas en periodos más cortos (Cárdenas y Ruiz, 1986).

Variables de control y determinaciones analíticas

Las variables monitoreadas fueron: temperaturas de entrada de vinaza, de vapor calefactor y vapor de evaporación (vapor vegetal). Se midió caudal de condensados por método volumétrico, mientras que el caudal de alimentación es un dato de entrada controlado con la instrumentación arriba descrita.

Las muestras fueron tomadas con frecuencia horaria, en recipientes herméticos de vidrio, totalizando ocho muestras por ensayo, que fueron trasladadas el mismo día y procesadas en los laboratorios de la Sección Química de la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres, certificados con normas ISO 9001:2015.

Las determinaciones analíticas demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno

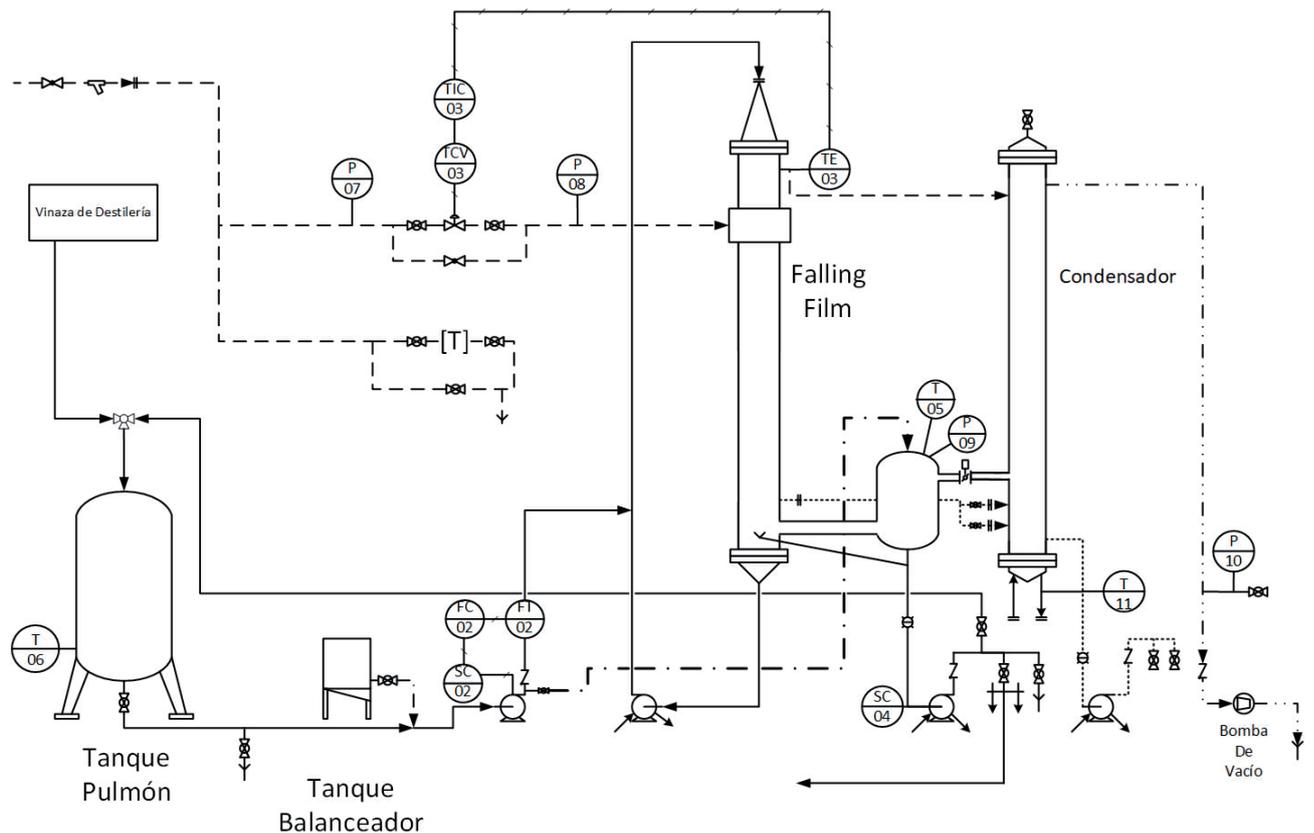


Figura 1. Diagrama PI&D de la planta piloto utilizada en los ensayos.

geno (DBO), sólidos totales (ST), sólidos fijos (SF) y sólidos volátiles (SV), pH, sulfatos totales, conductividad y nitratos totales fueron realizadas según lo recomendado en Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 1999). La DQO se realizó en viales con solución de sulfato de plata y dicromato de potasio, con posterior digestión a 150°C durante dos horas y se midió la absorbancia en un espectrofotómetro JASCO V630. Los sólidos totales fueron determinados por diferencia de peso luego de secado a 105°C, mientras que para los sólidos fijos se llevaron las muestras durante cinco horas a 550°C en mufla. Para los sulfatos totales se utilizó el método gravimétrico mediante adición de cloruro de bario y precipitación de sulfato de bario. La determinación de DBO se realizó por incubación en cinco días, utilizándose para medir oxígeno disuelto un equipo Thermo Scientific Orion 3 Star, empleado también para medir pH y conductividad. El Brix fue medido con un refractómetro automático marca Rudolph J157, mientras que para la determinación de viscosidad se utilizó un viscosímetro marca BROOK-FIELD con ejes LV a 50°C.

Las cuantificaciones de los metales presentes en vinaza fueron realizadas con un espectrómetro de absorción atómica, marca PERKIN – ELMER modelo AANALYST 100, y la técnica utilizada está detallada en Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 1999)

Condiciones de los ensayos

La serie de ensayos realizados estaban enmarcados dentro de un plan de trabajo donde se planteó como objetivo adquirir información experimental sobre la factibilidad técnica para concentrar vinaza con un evaporador como el que cuenta la planta piloto, y determinar su capacidad de transferencia de calor. Para ello, el trabajo consistió en simular una evaporación de quintuple efecto, ensayando un efecto individualmente, y en cada caso se tuvieron las condiciones de operación correspondientes a cada efecto trabajando en el múltiple, ejecutando un ensayo por efecto a lo largo de 8 a 10 horas de estado estacionario.

Dichas condiciones pueden observarse en la Tabla 1, notándose que los correspondientes saltos de Brix implican un aumento global en la concentración de 25° Brix. Por último, se realizó un ensayo de ensuciamiento correspondiente al primer efecto, en el cual -tomando las condiciones correspondientes de este- se sometió el equipo a 160 horas ininterrumpidas de trabajo.

Tabla 1. Condiciones de ensayo de efecto simulado.

Efecto	Temperatura Vapor Calefactor [°C]	Temperatura vapor vegetal [°C]	Δ °Bx
I	116	105	1,3
II	106	98	2,0
III	97	87	3,0
IV	87	74	5,6
V	76	60	13,1

Determinación del coeficiente global de transferencia de calor (U)

Se hizo uso de los balances de masa y energía, calculando el coeficiente global de transferencia de calor “U” a través de la ecuación de calor.

Balance total de materia en el efecto i:

Ecuación 1

$$F_i \rho_i = F_{i+1} \rho_{i+1} + V_{i+1}$$

Balance sólidos en el efecto i:

Ecuación 2

$$F_i \rho_i Bx_i = F_{i+1} \rho_{i+1} Bx_{i+1}$$

Recordando que el condensado vegetal y el condensado de escape salen por el mismo ducto:

Ecuación 3

$$W = \text{Condensado} - V$$

El calor transferido para vaporizar la vinaza viene dado por el calor entregado por el vapor de calefacción:

Ecuación 4

$$Q_i = W_i \lambda v (T_{wi})$$

Con el uso de las ecuaciones planteadas es posible determinar los parámetros necesarios para calcular el coeficiente global de transferencia de calor de cada efecto:

Ecuación 5

$$U_i = \frac{Q_i}{A \Delta T_i}$$

En donde $\Delta T_i = T_w - T_{i+1}$ y T_w es la temperatura del vapor saturado calefactor.

Donde:

- F: flujos de vinaza para el elemento i [m³/h]
- ρ: densidad de la vinaza en el elemento i [kg/m³]
- W: flujo de vapor de escape alimentado [kg/h]
- λv: calor latente de vaporización [kcal/kg]
- A: área de transferencia o intercambio de calor [m²]
- V: flujo de vapor vegetal [kg/h]

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 2 muestra los valores promedio de las determinaciones analíticas realizadas para caracterizar las vinazas utilizadas en los ensayos.

En la Figura 2 se plasma la evolución de la concentración de sólidos en cada efecto. Los sólidos volátiles representan el mayor aportante dentro de los sólidos, marcando una disminución a lo largo de los primeros tres efectos, producto de la desnaturalización térmica de algunos compuestos orgánicos, con la deposición de estos

en las paredes de los tubos. Un fenómeno similar, aunque menos marcado, sucede en el caso de los sólidos fijos, aunque lo que ocurre es el fenómeno de precipitación. Hacia los últimos efectos, puede notarse un leve aumento de los valores tratados en este párrafo a causa del desprendimiento de las incrustaciones como consecuencia del aumento de la viscosidad.

Por otra parte, el comportamiento del nitrato, el fósforo total (como fosfato) y el fósforo total se esquematiza en la Figura 3, viéndose un fenómeno de disminución de los valores de estos, desde los primeros efectos hacia los últimos, como consecuencia de la formación de sus sales. A través de este gráfico puede comprobarse en cuál efecto se produjeron las incrustaciones más intensas.

En el caso de los cloruros y sulfatos, presentan un comportamiento similar al de los sólidos; es decir, hay una primera etapa de disminución de su concentración,

Tabla 2. Valores promedio de las vinazas utilizadas.

Determinación Analítica	Valor	Unidad
Brix Refractométrico	14,95	%
Sólidos Totales	136,46	g/L
Sólidos Volátiles	94,95	g/L
Sólidos Fijos	41,51	g/L
Conductividad	36,00	mS/cm
DBO	40,98	g/L
DQO	154,96	g/L
Potasio	20,11	g/L
pH	4,98	u. de pH
Viscosidad	1,42	cp

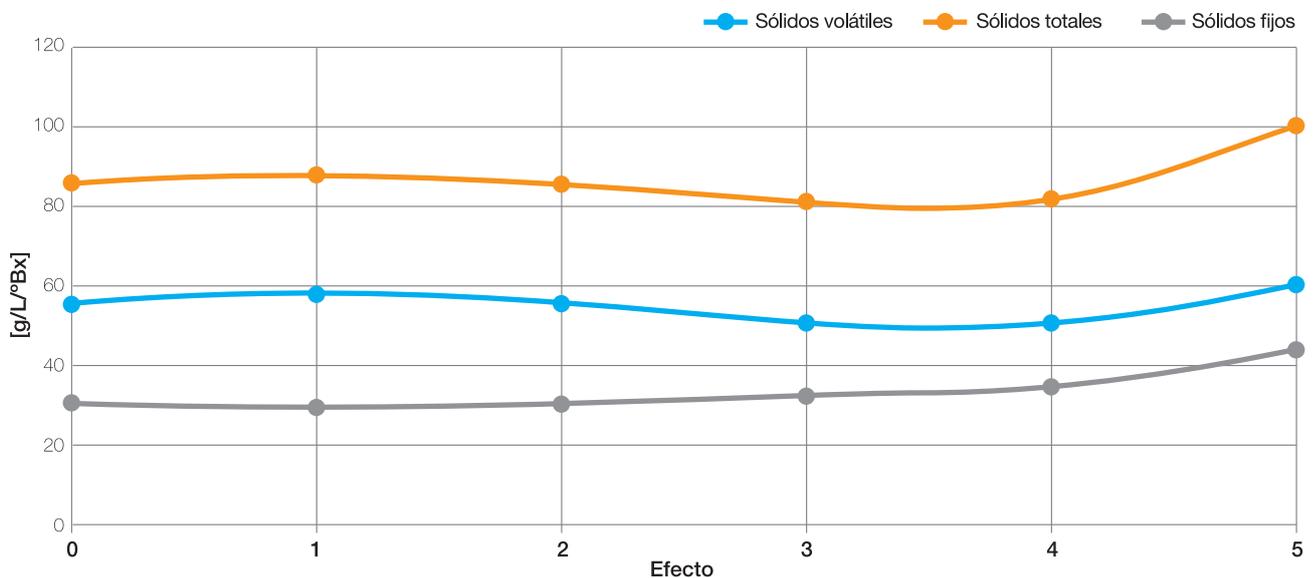


Figura 2. Evolución de las concentraciones de sólidos.

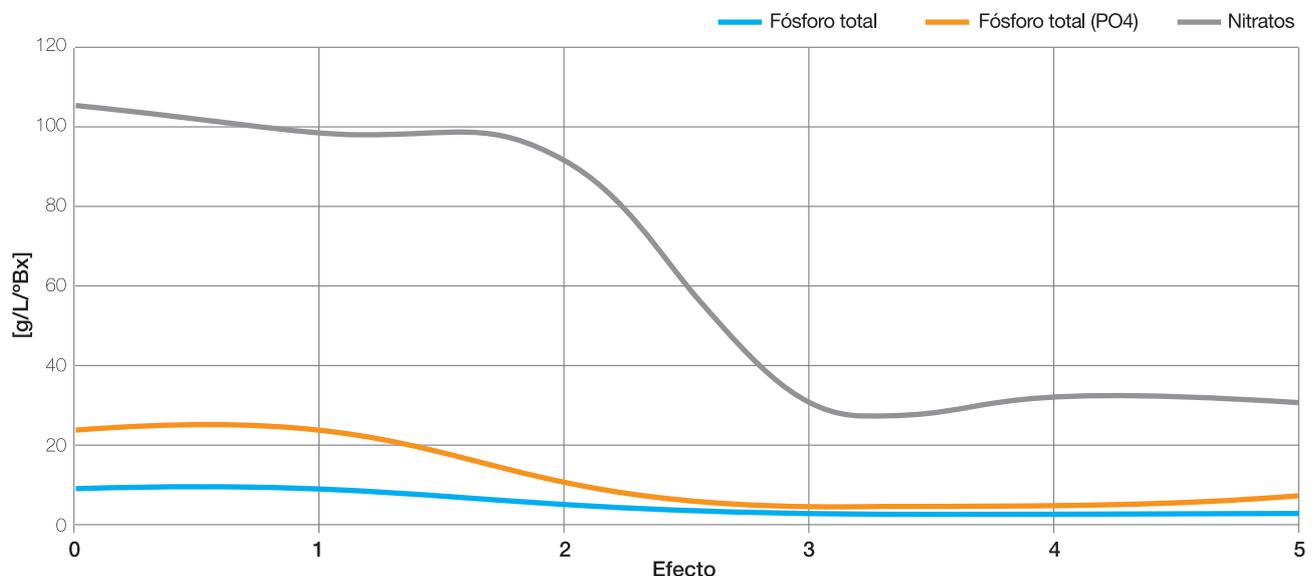


Figura 3. Evolución de las concentraciones de fósforo (total y como fosfato) y nitratos.

producto de la precipitación, aumentando en mayor o menor medida hacia los efectos finales, como consecuencia de los arrastres por aumento de la viscosidad. En estos dos aniones, la evolución es de alguna forma más afinada, mostrando un ajuste cuadrático (Figura 4).

En la Figura 5 se presenta el comportamiento del calcio y el magnesio; pueden observarse las proporciones típicas para nuestras vinazas (Ca/Mg = 4 a 5) y la disminución marcada del calcio en los primeros efectos, a fin de conformar las incrustaciones en sus diferentes sales. Queda claro, además, que este fenómeno disminuye con la temperatura por la condición de solubilidad inversa de las sales de este catión.

De los cationes considerados en la Figura 6, el sodio y el potasio (expresados en g/L/°Bx), por la solubilidad de sus sales, mantienen concentraciones más o menos estables a lo largo del proceso de evaporación. Al analizar el níquel y el cobre (expresados en mg/L/°Bx), vemos que fluctúan entre 8,35 y 6,76 mg/L/°Bx para el níquel; mientras que en el caso del cobre, los valores extremos se encuentran entre 12,47 y 8,62 mg/L/°Bx.

En la Figura 7 se observa cómo el pH no cambia apreciablemente durante la concentración de vinaza, mientras que la viscosidad muestra claramente el gran salto para los valores altos de Bx, ajustando una expresión polinómica cúbica.

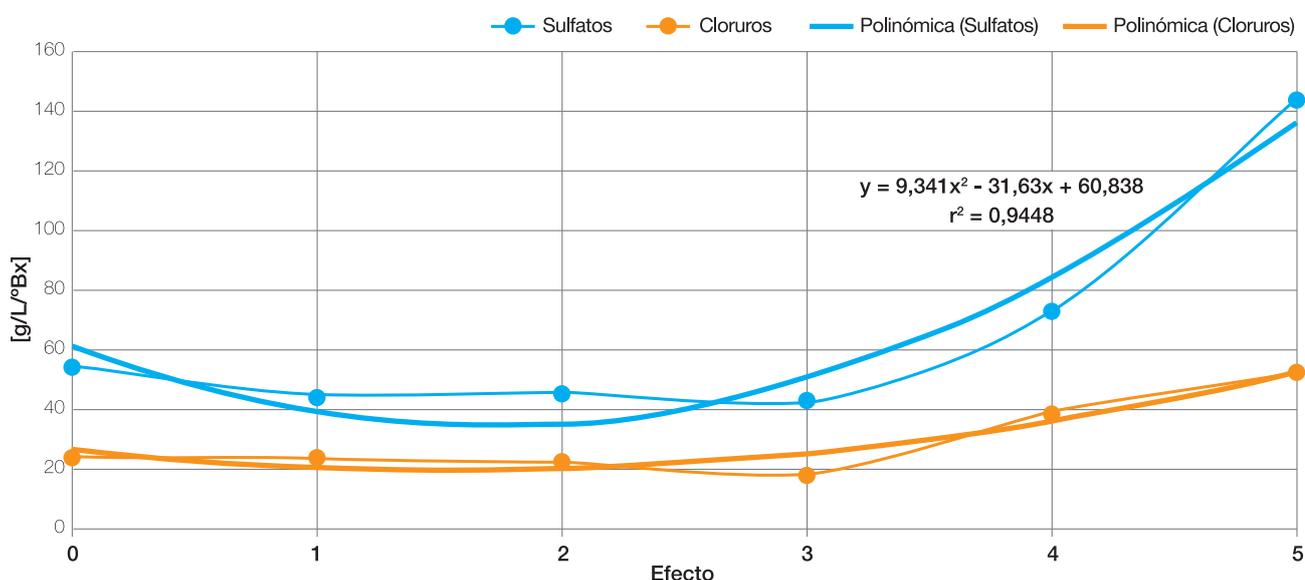


Figura 4. Evolución de las concentraciones de sulfatos y cloruros.

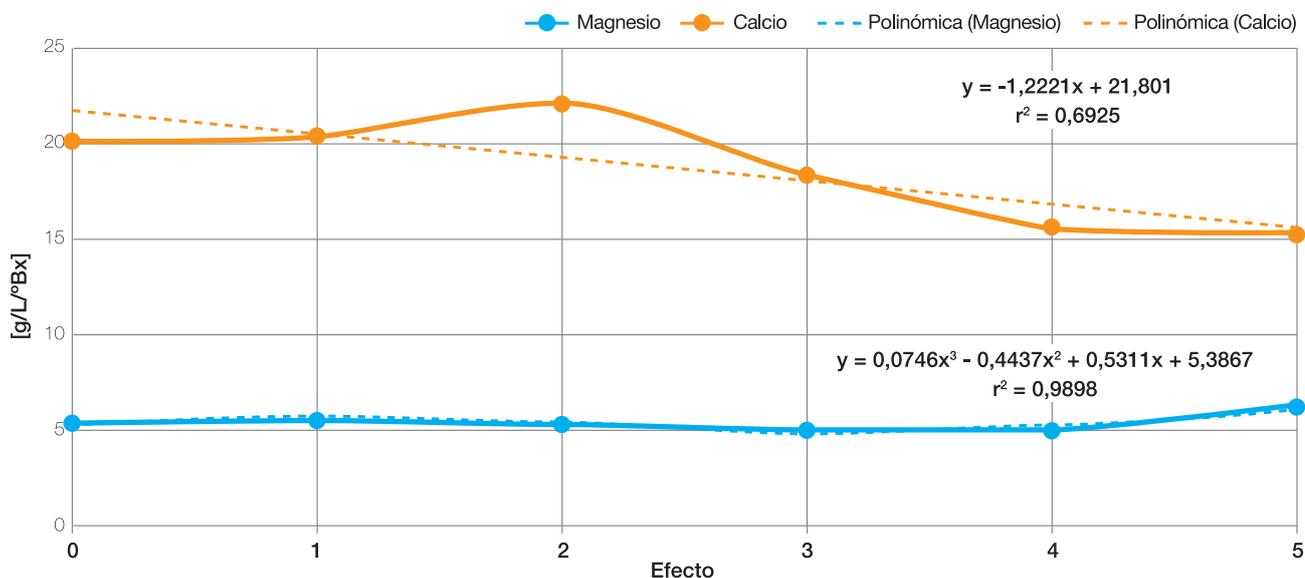


Figura 5. Evolución de las concentraciones de calcio y magnesio.

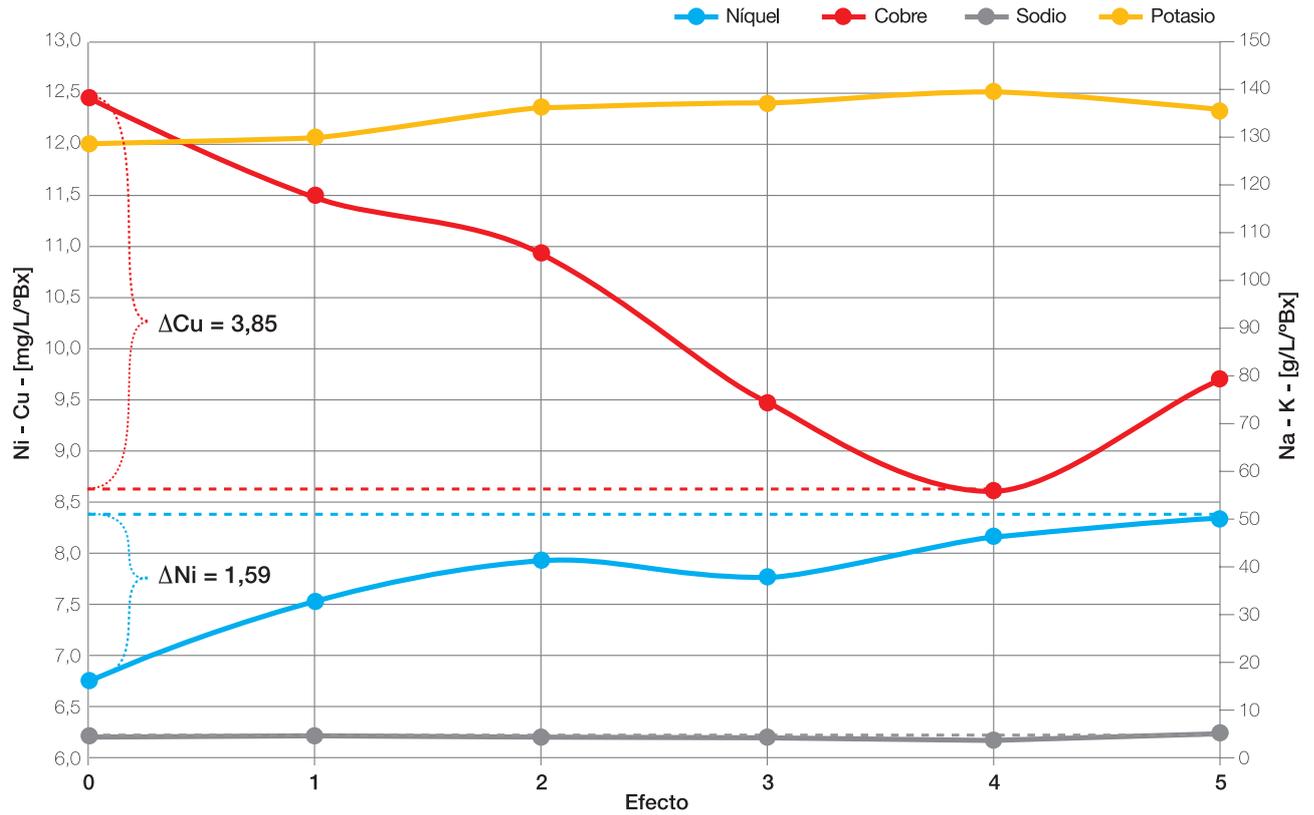


Figura 6. Evolución de las concentraciones de níquel, cobre, sodio y potasio.

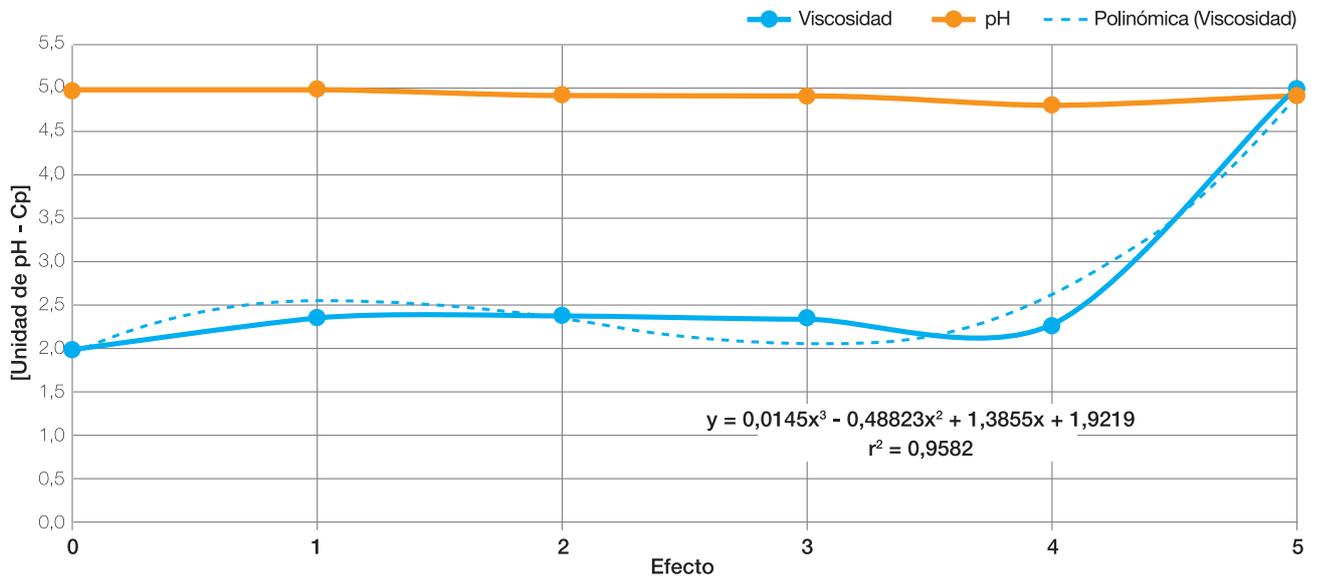


Figura 7. Evolución de los valores de pH y viscosidad.

La DQO debería tener una evolución similar a la que presentaron los sólidos. Ahora bien, observando la Figura 8 se ve que estos valores tienen un comportamiento cuadrático, descendiendo su valor para Bx altos, posiblemente por algún tipo de oxidación de algunos compuestos a causa de exposición al calor.

El gráfico de barras de la Figura 9 representa los valores promedio obtenidos del coeficiente global de transferencia de calor (U) para cada efecto. Al momento de comparar estos resultados con los de trabajos anteriores, nos encontramos con la limitante de que estos últimos realizaron sus respectivos ensayos con soluciones

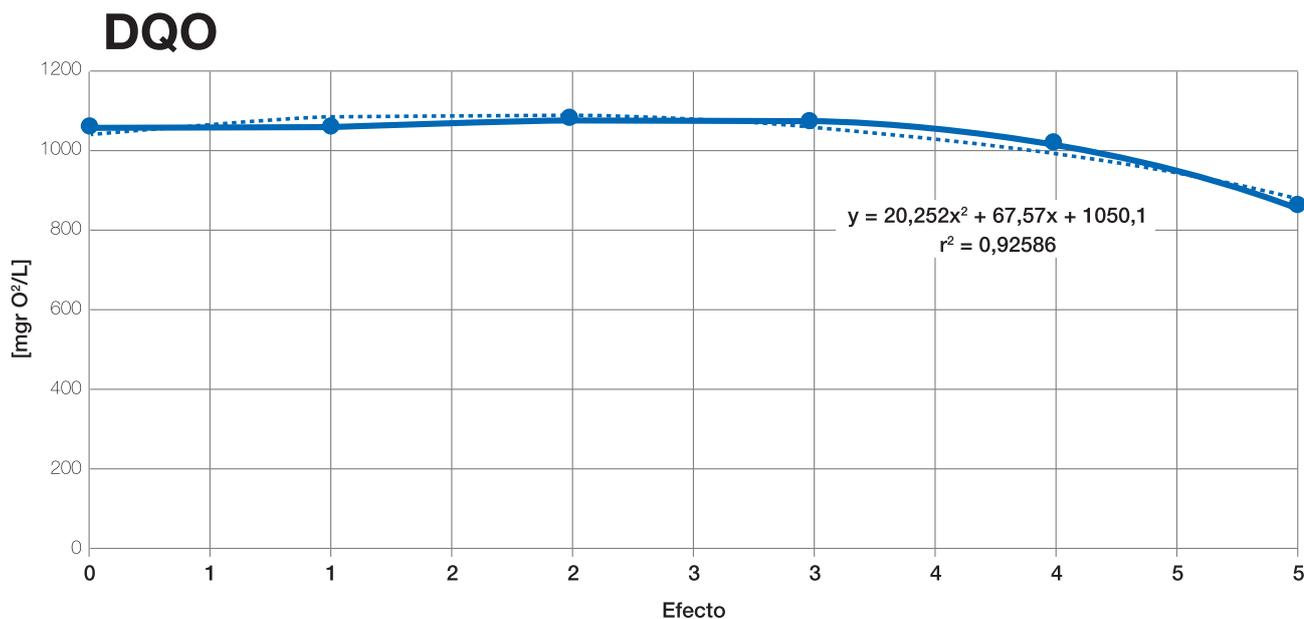


Figura 8. Evolución de los valores de DQO.

de sacarosa pura y agua (Chen y Jebson, 1997; Prost *et al.*, 2005); o como los de Karlsson *et al.* (2013) con licor negro, aunque las condiciones de cada efecto, en general, son muy diferentes a las planteadas aquí. Larsson and Tengberg (2014), en su tesis de maestría, realizaron trabajos en lo que obtuvieron el U para un evaporador usando vinaza, de un solo tubo, en el que el fluido calefactor circula por el interior del tubo, haciendo imposible comparar los resultados de ellos con los nuestros. Un trabajo en el cual se tienen algunos efectos con condiciones similares es el de Cyklis (2017), quien realizó ensayos con jugo de manzana en un evaporador de quintuple efecto.

Por último, se plasman en la Figura 10 los resultados de las determinaciones de coeficientes de transferencia de calor para el caso del primer efecto sometido a un período prolongado de funcionamiento, a los fines de observar la influencia de las incrustaciones. En dicha figura se tomaron los datos a partir de las 65 horas de funcionamiento, donde comenzó a hacerse notable el fenómeno en cuestión.

Los resultados muestran que durante las primeras 65 horas de trabajo el equipo operó con un coeficiente de transferencia próximo a los 1900 W/m²/°C y a partir de ese momento experimentó una disminución en los valores de U de aproximadamente 1,64 W/m²/°C por cada hora de funcionamiento.

Estableciendo como indicador de parada para limpieza una pérdida del 30% del coeficiente de transferencia, puede determinarse que el ciclo de limpieza debería cumplirse cada 15 días aproximadamente.

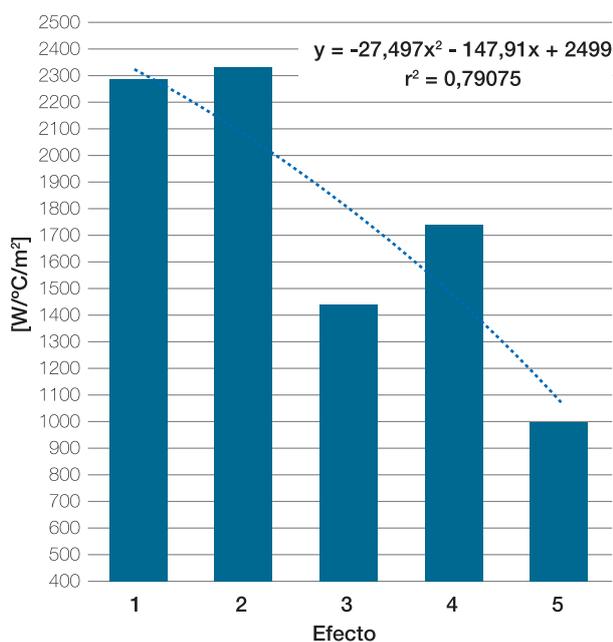


Figura 9. Valores de U obtenidos para cada ensayo.

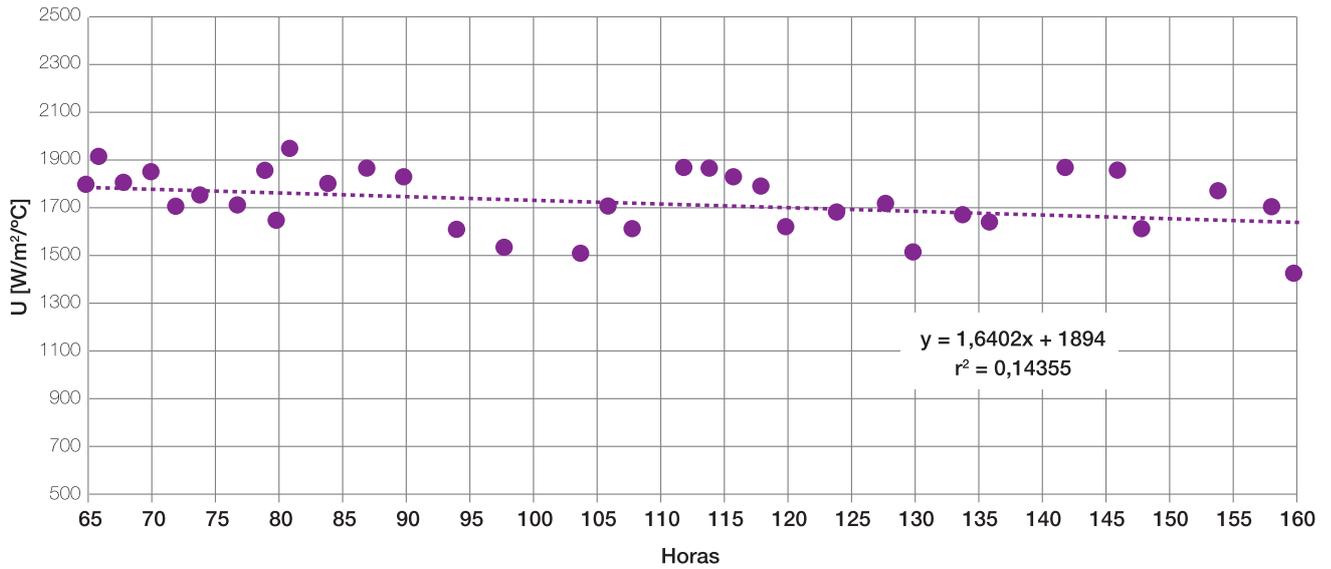


Figura 10. Valores de U obtenidos para el ensayo de ensuciamiento.

CONCLUSIONES

Se realizaron con éxito los ensayos para la determinación del coeficiente global de transferencia de calor para un evaporador de película descendiente para la concentración de vinaza.

Los primeros efectos evidenciaron incrustaciones al concluir cada ensayo, comprobándose con la caída

de las concentraciones de los principales cationes responsables de este fenómeno, y lográndose además establecer el período de limpieza del múltiple.

Para el total de las variables estudiadas fue posible establecer un comportamiento en función del número de efecto del múltiple, y los valores esperados se resumen en la Tabla 3.

Por la arquitectura del equipo piloto no es posible

Tabla 3. Ecuaciones de las tendencias de cada variable estudiada en función del número de efecto.

Variable	Tendencia en función del número de efecto (ef)	r ²	Variable independiente
Sólidos Totales [g/L ^o Bx]	1,7151(ef) ² - 7,2152(ef) + 89,1	0,5755	Nº de efecto
Sólidos Volátiles [g/L ^o Bx]	0,8724(ef) ² - 4,572(ef) + 58,305	0,3338	Nº de efecto
Sólidos Fijos [g/L ^o Bx]	1,0231(ef) ² - 2,6585(ef) + 30,715	0,9444	Nº de efecto
Fósforo Total [mg/L ^o Bx]	0,6041(ef) ² - 5,2549(ef) + 13,434	0,8643	Nº de efecto
Fósforo Total [mg PO ₄ /L ^o Bx]	1,8915(ef) ² - 16,722(ef) + 42,307	0,8714	Nº de efecto
Nitratos [mg/L ^o Bx]	-30,715(ef) + 183,83	0,8337	Nº de efecto
Sulfatos [g/L ^o Bx]	9,341(ef) ² - 31,63(ef) + 60,838	0,9448	Nº de efecto
Cloruros [g/L ^o Bx]	2,7657(ef) ² - 8,6603(ef) + 26,201	0,9167	Nº de efecto
Calcio [g/L ^o Bx]	-1,22(ef) + 21,8	0,6925	Nº de efecto
Magnesio [g/L ^o Bx]	0,0746(ef) ³ - 0,4437(ef) ² + 0,5311(ef) + 5,3867	0,9898	Nº de efecto
Níquel [mg/L ^o Bx]	0,277(ef) + 7,0619	0,843	Nº de efecto
Cobre [mg/L ^o Bx]	-0,6836(ef) + 12,165	0,7991	Nº de efecto
Sodio [g/L ^o Bx]	0,0883(ef) ³ - 0,5978(ef) ² + 0,9295(ef) + 4,4852	0,773	Nº de efecto
Potasio [g/L ^o Bx]	1,9118(ef) + 129,98	0,6896	Nº de efecto
pH	-0,0257(ef) + 4,9976	0,5554	Nº de efecto
Viscosidad [cP]	0,145(ef) ³ - 0,8823(ef) ² + 1,3855(ef) + 1,9219	0,9582	Nº de efecto
DQO [g/L ^o Bx]	-20,252(ef) ² + 67,576(ef) + 1050,1	0,9259	Nº de efecto
Caída del U [W/°C/m ²]	-1,6407x + 1894,6	0,1436	Horas
U [W/°C/m ²]	-27,497(ef) ² - 147,91(ef) + 2499	0,7907	Nº de efecto

separar los condensados del vapor escape utilizado del condensado del vapor vegetal producido; sin embargo, durante todos los ensayos se realizó una caracterización básica de este fluido constatándose ausencia de coloración, y en promedio se obtuvieron valores de conductividad próximos a 100 $\mu\text{s}/\text{cm}$ y 4,95 unidades de pH. Lo expuesto permite inferir la posibilidad de reutilización de los condensados del proceso de evaporación en las operaciones de dilución en la planta de fermentación de azúcares.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Adib, T. A.; B. Heydand and J. Vasseur. 2009.** Experimental results and modeling of boiling heat transfer coefficients in falling film evaporator usable for evaporator design. *Chem. Eng. and Proc.* 48(4):961-968.
- APHA. 1999.** Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. American Public Health Association, Washington DC.
- Cárdenas, G. y M. Ruiz. 1986.** Balance Energético de la producción de alcohol combustible a partir de caña de azúcar para las condiciones de Tucumán. *Publicación Especial EEAOC* 9.
- Carvalho, T. C. and C. L. Silva. 2011.** Reduction of vinasse by the evaporation process. En: 21° Brazilian congress of mechanical engineering, Natal, Brasil.
- Chen, H. and R. S. Jebson. 1997.** Factors affecting heat transfer in falling film evaporation. *Food and Bioprocess Technology* 75 (2): 111 - 116
- Christofoletti, C. A.; J. P. Escher; J. E. Correia; J. F. U. Marinho and C. S. Fontanetti. 2013.** Sugarcane vinasse: Environmental implications of its use. *Waste Management* 33(12): 2752-2761
- Cortez, L. A. B. and L.E. Brossard Pérez. 1997.** Experiences on vinasse disposal part III: combustion of vinasse. *Braz. J. Chem. Eng.* 14(1).
- Cyklis, P. 2017.** Industrial scale engineering estimation of the heat transfer in falling film juice evaporators. *Applied Thermal Engineering.* 123:1365-1373
- Franck Colombres, F. J.; M. A. Golato; E. Feijoó; W. D. Morales; D. Paz y M. Octaviano. 2016.** Combustión de vinaza con materiales celulósicos en calderas bagaceras de ingenios de la provincia de Tucumán (R. Argentina). *Rev. Ind. y Agríc. de Tucumán* 93 (1): 9-18
- Instituto provincial de estadística y censos de la provincia de Santa Fe. 2015.** Biocombustibles en Argentina: contexto y perspectivas. [En línea] Disponible en: <https://www.santafe.gov.ar/index.php/web/content/download/216143/1122514/version/2/file/Informe+Biocombustible.pdf> (consultado 3 octubre 2019).
- Karlsson, E.; M. Gourdon; L. Alousson and L. Vamling. 2013.** Heat transfer for falling film evaporation of black liquor up to very high Prandtl numbers. *Int. J. of Heat and Mass Tran.* 65: 907-918.
- Larsson, E. and T. Tengberg. 2014.** Evaporation of Vinasse. Master's Thesis. ChalmersUniversity of Technology, Göteborg, Sweden.
- Molina, C. 2016.** Los Biocombustibles en Argentina. Situación Actual y perspectivas. *Inf. sem. B. de Co. de Rosario.* Año XXXIV 1781 [En línea] Disponible en: https://www.bcr.com.ar/sites/default/files/2019-05/bcr2016_10_21.pdf (consultado 3 octubre 2019).
- Moraes, B. S.; T. L. Junqueira; L. G. Pavanello; O. Cavaletta; P. E. Mantelatto; A. Bonomia and M. Zaiatb. 2014.** Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane biorefineries in Brazil from energy, environmental, and economic perspectives: Profit or expense? *Applied Energy* 113 (1): 825-835.
- Morandini, M. y E. Quaiá. 2013.** Dossier: Alternativas para el aprovechamiento de la vinaza como subproducto de la actividad sucroalcolera. *Avance Agroindustrial* 34(2):2-12
- Mura, E.; A. Åkesjö; A. Jongsma; F. Innings; M. Gourdon and L. Vamling. 2014.** Experimental study of the heat transfer in a falling film evaporator: influence of the co-flowing vapor. En: 10th Int. Conf. on Heat Tran. Orlando, Florida.
- Prost, J. S.; M. T. González and M. J. Urbicain. 2005.** Determination and correlation of heat transfer coefficients in a falling film evaporator. *J. Food Eng.* 73(4):320 - 326

