

## Evaluación del modelo de Rusten en un filtro empacado aireado tratando vinaza cruda cubana

Miguel Ángel Díaz Marrero

e-mail: [migueld@quimica.cujae.edu.cu](mailto:migueld@quimica.cujae.edu.cu)

Centro de Estudio de Ingeniería de Procesos (CIPRO), Facultad de Ingeniería Química (\*),

Ania Cabrera Díaz

e-mail: [ania@quimica.cujae.edu.cu](mailto:ania@quimica.cujae.edu.cu)

Centro de Estudio de Ingeniería de Procesos (CIPRO), Facultad de Ingeniería Química (\*),

Claudia Regalon Ramos

Centro de Estudio de Ingeniería de Procesos (CIPRO), Facultad de Ingeniería Química (\*),

(\*) Univ. Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (Cujae). Habana. Cuba.

### RESUMEN

En el presente trabajo se realiza una investigación básica en el tratamiento de vinaza cruda con un filtro empacado aireado. Se realizan 3 corridas con diferentes cargas orgánicas en  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$  (empaquetadura)  $\cdot \text{d}^{-1} (Ba)$  y con un flujo de aire de  $400 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ . Se ajustó el modelo de Rusten con R-cuadrada ajustada de 98,9245 %, y se determinaron los valores de velocidad máxima de reducción de la carga orgánica ( $\Delta B_{amax}$ ) y carga orgánica cuando  $\Delta Ba = 1/2 \Delta B_{amax}(k.)$ . Se obtuvieron eficiencias de reducción de demanda química de oxígeno (DQO) entre 95 y 72 % para cargas entre 10 y  $20 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ . El pH se incrementó de 4,1 en la alimentación a valores cercanos a 8 en los efluentes sin adición de reactivo.

**Palabras clave:** filtro empacado aireado, tratamiento aerobio, vinaza.

## Evaluation of Rusten's model in an aerated packaged filter treating Cuban raw vinasse

### ABSTRACT

In the present work a basic research is carried out of the treatment of raw vinasse with an aerated packed filter. Three runs are made with different organic loads in  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$  (packing)  $\cdot \text{d}^{-1} (Ba)$  and with an air flow of  $400 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ . The Rusten model was adjusted with an adjusted R-square of 98,9245 %, and the values of maximum speed of reduction of the organic load ( $\Delta B_{amax}$ ) and organic load were determined when  $\Delta Ba = 1/2 \Delta B_{amax}(k.)$ . Efficiencies of reduction of chemical oxygen demand (COD) between 95 and 72% for loads between 10 and  $20 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  were obtained. The pH increased from 4,1 in the feed to values close to 8 in the effluents without addition of reagent.

**Keywords:** aerated packed filter, aerobic treatment, vinasse.

## INTRODUCCIÓN

En general las industrias desechan considerables volúmenes de aguas residuales como resultado de sus procesos. Entre ellas se encuentra la industria alcohólica que es una de las que generan residuales con mayor poder contaminante.

De la producción de etanol por fermentación-destilación se obtienen como residuo grandes volúmenes de vinaza cruda. Generalmente se producen entre 12 y 20 L de vinaza por cada litro de etanol destilado. La misma presenta una demanda química de oxígeno (DQO) cercana a 50 g/L y una demanda biológica de oxígeno (DBO<sub>5,20</sub>) entre 20 y 30 g/L; además, el pH es bajo con valores que se encuentran entre 3,5 y 5 unidades (España et al. 2011), (Arimi et al. 2014), (Fuess and García 2014).

Los grandes volúmenes de vinaza, la alta carga orgánica que esta presenta, los bajos pH, color oscuro y la cantidad de sólidos disueltos que posee, afectan de manera negativa a la biota acuática al ser vertida en cuerpos de agua sin el tratamiento previo necesario. En cuanto a los suelos se observa a mediano y largo plazo la salinización de los mismos, como también la lixiviación de sales, afectando así los cultivos (Cabrera et al. 2017). La estructura de los suelos se ve seriamente afectada al igual que la porosidad y la fertilidad, produciendo la movilización de metales pesados, obstrucción de poros, inhibición de la germinación de semillas y cultivos dañados (Campos et al. 2017). Las aguas subterráneas también se han visto afectadas por la mala disposición de la vinaza cruda detectándose un aumento en la conductividad eléctrica (CE), en los sólidos disueltos totales (SDT) y en la concentración de iones (Hati et al. 2007).

Se han realizado numerosos estudios en cuanto al tratamiento de la vinaza cruda con el fin de minimizar el impacto medioambiental que esta produce al ser desechada en cuerpos receptores. Uno de estos tratamientos consiste en alimentar la vinaza cruda en un biorreactor anaerobio para la producción de biogás como fuente de energía renovable.

Los mismos favorecen una reducción considerable de materia orgánica expresada como DBO<sub>5,20</sub> o DQO. Muchos son los autores que han reportado en su investigación resultados favorables empleando reactores biológicos anaerobios como son los casos de Cabrera y Díaz (2013), Cabrera et al. (2017) y Durán et al. (2015) entre otros.

Aunque se ha reportado el uso de procesos biológicos aerobios de lodo activados para el tratamiento de residuales de vinaza cruda, no se tienen resultados del uso de filtros empacados aireados en su tratamiento.

Los filtros empacados aireados se han utilizado en el tratamiento de otros tipos de residuales, con alta eficiencia (Díaz y de Armas 2006), (Díaz y Montesino 2003), por lo que tratar la vinaza con estos reactores permitiría aumentar los conocimientos en los tratamientos de la misma.

Teniendo en cuenta los aspectos anteriores, el objetivo de este trabajo es evaluar la aplicación del modelo de Rusten (Rusten 1984) a un filtro empacado aireado, así como determinar sus parámetros de funcionamiento cuando se trata en él vinaza cruda.

## DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA EMPLEADO PARA EXPERIMENTACIÓN

El sistema con que se trabajó estuvo formado por un reactor empacado cilíndrico de laboratorio, con las dimensiones que se muestran en la tabla 1.

**Tabla 1. Dimensiones del reactor empleado**

| Dimensiones                         | Unidades                           |
|-------------------------------------|------------------------------------|
| Altura de reactor                   | 41 cm                              |
| Diámetro                            | 15 cm                              |
| Volumen total del reactor           | 7,25 L                             |
| Área interior del cilindro          | 176,7 cm <sup>2</sup>              |
| Altura del empaque                  | 30 cm                              |
| Área específica de la empaquetadura | 175 m <sup>2</sup> m <sup>-3</sup> |
| Volumen del empaque                 | 5,3 L                              |
| Volumen de líquido en el reactor    | 4,7 L                              |

La empaquetadura que se empleó fueron cilindros plásticos de paredes corrugadas de 1,5 cm de diámetro y altura, con un área específica de 175 m<sup>2</sup> m<sup>-3</sup>. El llenado del reactor se realizó de forma aleatoria.

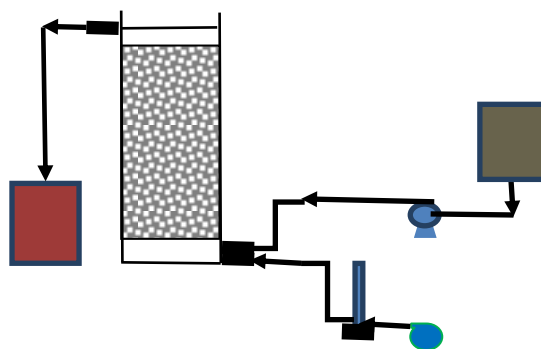
El sistema de aireación estuvo formado por dos bombas pequeñas y un compresor, que suministró un flujo de aire de 400 L h<sup>-1</sup> con el objetivo de aportar el oxígeno necesario para que los microorganismos degradaran la materia orgánica contenida en el residual. Su medición se realizó con un rotámetro.

La alimentación se realizó con una bomba peristáltica que proporcionaba el flujo necesario para las diferentes corridas. La figura 1 muestra con mayor detalle el esquema de la planta de tratamiento utilizada para la realización de la experimentación.

### Forma como se operó el sistema

Los microorganismos utilizados en los experimentos, a nivel de laboratorio, fueron obtenidos de un lodo anaerobio que estaba adaptado a digerir la vinaza cruda. Dicho lodo fue incorporado al filtro empacado y se comenzó a airear con un flujo de 400 L h<sup>-1</sup> de aire. La alimentación del reactor en etapa de adaptación se realizó con vinaza cruda a baja carga, en forma discontinua una vez al día y recirculando el líquido con una bomba peristáltica las 24 h del día, con la finalidad de que el lodo fuera adhiriéndose al soporte. El sistema se fue muestreando periódicamente, realizándole análisis de pH, DQO y oxígeno disuelto a la entrada y salida hasta lograr el estado estacionario del mismo.

Para cada una de las cargas con que se decidió trabajar, se realizó un procedimiento similar de tomar los datos de dicha carga. De esta forma se fueron obteniendo los diferentes puntos de operación que simulan la curva de velocidad de reducción de la carga orgánica contra carga orgánica aplicada, así como los porcentajes de reducción de las DQO.



**Figura 1. Filtro empacado aireado y sus accesorios**

Leyenda:

- 1-Filtro empacado
- 2-Empaquetadura
- 3-Sistema de aireación (bombas y compresor)
- 4-Tanque de efluente
- 5-Tanque de alimentación (vinaza cruda)
- 6-Bomba de alimentación
- 7-Rotámetro para medir flujo de aire
- 8-Entrada de aire al biorreactor
- 9-Entrada de alimentación al biorreactor

## ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### Caracterización de la vinaza cruda

Lo primero que se realizó fue la caracterización de la vinaza cruda que se iba a tratar por un proceso aerobio en el filtro empacado. En la tabla 2 se muestran los valores obtenidos.

**Tabla 2. Caracterización de la vinaza cruda que se alimentó al filtro empacado aireado**

| Parámetro                  | Valores |
|----------------------------|---------|
| pH                         | 4,14    |
| DQO (mg/L)                 | 40 232  |
| DBO <sub>5,20</sub> (mg/L) | 27 000  |
| Conductividad (μS/cm)      | 9 250   |
| Sólidos totales (mg/L)     | 39 873  |
| Sólidos volátiles (mg/L)   | 29 041  |
| Sólidos fijos (mg/L)       | 10 832  |
| Nitrógeno total (mg/L)     | 634     |
| Fósforo total (mg/L)       | 8,58    |

La caracterización de la vinaza cruda presenta valores similares a los reportados en la literatura (Cabrera y Díaz 2013).

En los procesos biológicos aireados la relación DBO: N: P teórica recomendable es 100: 5:1, y de la caracterización se obtuvo 100: 2,35: 0,032 por lo que el residual está bajo en nitrógeno y en fósforo, lo cual podría afectar el rendimiento del sistema.

### Tratamiento de la vinaza cruda en un filtro empacado aireado

Para determinar los parámetros operacionales en el tratamiento de la vinaza cruda en el filtro empacado aireado se aplicó el modelo planteado por Rusten (1984),

Este modelo está basado en la carga orgánica referida al área específica de la empaquetadura según las expresiones:

$$Ba = \frac{S_o * Q_o}{V * A_e} \quad (1)$$

$$\Delta Ba = \frac{\Delta S * Q_o}{V * A_e} \quad (2)$$

donde:

- $Ba$ : carga orgánica referida al área de la empaquetadura en g DQO alimentados \*  $m^{-2}$  (empaquetadura) \*  $d^{-1}$
- $\Delta Ba$ : velocidad de reducción de la carga orgánica en g DQO reducida \*  $m^{-2}$  (empaquetadura) \*  $d^{-1}$ .
- $S_o$ : concentración de DQO del residual afluente en  $mg * L^{-1}$
- $\Delta S$ : DQO reducida en el residual ( $S_o - S_e$ ) en  $mg * L^{-1}$
- $S_e$ : concentración del residual efluente en  $mg * L^{-1}$
- $V$ : volumen de empaquetadura en  $m^3$
- $A_e$ : área específica de empaquetadura en  $m^2 * m^{-3}$ .
- $Q_o$ : flujo de alimentación en  $m^3/d$

La relación entre la velocidad de reducción y la carga orgánica es descrita por Rusten a través de una expresión similar a la ecuación de Monod, como se muestra a continuación:

$$\Delta Ba = \Delta Ba_{\max} \frac{Ba}{Ba + k} \quad (3)$$

donde:

- $\Delta Ba_{\max}$ : velocidad máxima de reducción de la carga orgánica en g DQO reducidos \*  $m^{-2}$  (empaquetadura) \*  $d^{-1}$ .
- $k$ : carga orgánica cuando  $\Delta Ba = 1/2 \Delta Ba_{\max}$  en g de DQO \*  $m^{-2}$  (empaquetadura) \*  $d^{-1}$ .

Los valores de  $\Delta Ba_{\max}$  y  $k$  para un residual pueden obtenerse de la ecuación (3), resolviendo la misma a través de una modelación no lineal con datas de  $Ba$  y  $\Delta Ba$  calculadas a partir de datos experimentales.

Las corridas experimentales se realizaron con cargas de DQO por unidad de área de empaquetadura y por día de 9,9 , 20 y 30 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>

El nivel de aireación fue de 400 L h<sup>-1</sup>, que equivale a 85,1 L de aire \* h<sup>-1</sup> \* L<sup>-1</sup> del líquido en el reactor y a 431 L de aire \*h<sup>-1</sup> \*m<sup>-2</sup> empaquetadura.

En las tablas 3, 4 y 5 se muestran los valores obtenidos de los parámetros medidos una vez alcanzado el estado estacionario, que fueron pH, DQO y O<sub>2</sub> disuelto, tanto a la alimentación como al efluente. Además, se reporta la velocidad de reducción de la carga orgánica referida al área específica de la empaquetadura para cada corrida.

**Tabla 3. Resultados de las corridas para cargas de 9,9 g\*m<sup>-2</sup> \*d<sup>-1</sup>**

| Corridas           | pH    |          | DQO<br>(mg*L <sup>-1</sup> ) |          | O <sub>2</sub> disuelto<br>(mg*L <sup>-1</sup> ) |          | $\Delta Ba$<br>(g*m <sup>-2</sup> *d <sup>-1</sup> ) |
|--------------------|-------|----------|------------------------------|----------|--------------------------------------------------|----------|------------------------------------------------------|
|                    | Alim. | Efluente | Alim.                        | Efluente | Alim.                                            | Efluente |                                                      |
| 1                  | 4,1   | 8,8      | 40 232                       | 1 764    | 0,1                                              | 4,5      | 9,5                                                  |
| 2                  | 4,1   | 8,3      | 40 232                       | 1 960    | 0,1                                              | 4,3      | 9,4                                                  |
| 3                  | 4,1   | 8,8      | 40 232                       | 1 999    | 0,1                                              | 4,6      | 9,4                                                  |
| 4                  | 4,1   | 8,9      | 40 232                       | 1 960    | 0,1                                              | 4,3      | 9,4                                                  |
| 5                  | 4,1   | 8,3      | 40 232                       | 2 444    | 0,1                                              | 4,7      | 9,3                                                  |
| 6                  | 4,1   | 8,9      | 40 232                       | 2 033    | 0,1                                              | 4,2      | 9,4                                                  |
| Valor medio        |       |          | 40 232                       | 2 026,7  | 0,1                                              | 4,4      | 9,4                                                  |
| Valor máximo       | 4,1   | 8,9      | 40 232                       | 2 444    | 0,1                                              | 4,7      | 9,5                                                  |
| Valor mínimo       | 4,1   | 8,3      | 40 232                       | 1 764    | 0,1                                              | 4,2      | 9,3                                                  |
| Desv. estándar     | 0     | 0,26     | 0                            | 225      | 0                                                | 0,20     | 0,06                                                 |
| Coef. de variación | 0     | 2,98 %   | 0 %                          | 11,10 %  | 0 %                                              | 4,44 %   | 0,59 %                                               |

A cada columna de datos se le determinó, empleando el Excel, las desviaciones estándar y su coeficiente de variación, que es el porcentaje de la desviación estándar con respecto al valor medio de la variable, apreciándose que este último, salvo en un caso que dio 11,1 %, en todos los restantes están por debajo de 10 % lo que significa que en los datos no hay excesiva dispersión.

Puede apreciarse en las 3 corridas, que el proceso aerobio que ocurre en el filtro empacado, es capaz de neutralizar el pH que tiene la vinaza cruda y llevarlo a valores que se mueven entre 8,9 y 7,93 sin adición de productos químicos.

Para determinar si el modelo Rusten (1984) (ecuación 3) se ajustaba en el caso de la vinaza cruda y determinar los valores de  $k$  y  $\Delta B_{amax}$ , se procesaron los datos de  $Ba$  y  $\Delta Ba$  obtenidos y se ajustó a través de regresión no lineal con el programa Statgraphic Centurión XVII.

**Tabla 4. Resultados de las corridas para cargas de  $20 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$** 

| Corridas           | pH     |          | DQO ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) |          | O2 disuelto ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) |          | $\Delta Ba$ ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ) |
|--------------------|--------|----------|-----------------------------------------|----------|-------------------------------------------------|----------|--------------------------------------------------------------------|
|                    | Alim.  | Efluente | Alim.                                   | Efluente | Alim.                                           | Efluente |                                                                    |
| 1                  | 4,10   | 8,27     | 40 232                                  | 11 200   | 0,1                                             | 2,48     | 14,4                                                               |
| 2                  | 4,12   | 8,18     | 40 232                                  | 10 500   | 0,1                                             | 2,84     | 14,7                                                               |
| 3                  | 4,25   | 7,95     | 40 232                                  | 11 200   | 0,1                                             | 2,85     | 14,4                                                               |
| 4                  | 4,23   | 7,93     | 40 232                                  | 10 400   | 0,1                                             | 2,23     | 14,8                                                               |
| 5                  | 4,19   | 8,45     | 40 232                                  | 10 400   | 0,1                                             | 2,61     | 14,8                                                               |
| 6                  | 4,11   | 7,98     | 40 232                                  | 10 560   | 0,1                                             | 2,70     | 14,7                                                               |
| Valor medio        |        |          | 40 232                                  | 10 710   | 0,0                                             | 2,62     | 14,6                                                               |
| Valor máximo       | 4,25   | 8,45     | 40 232                                  | 11 200   | 0,1                                             | 2,85     | 14,8                                                               |
| Valor mínimo       | 4,10   | 7,93     | 40 232                                  | 10 400   | 0,1                                             | 2,23     | 14,4                                                               |
| Desv. estándar     | 0,07   | 0,21     | 0                                       | 384,45   | 0                                               | 0,24     | 0,19                                                               |
| Coef. de variación | 1,57 % | 2,58 %   | 0 %                                     | 3,59 %   | 0 %                                             | 9,03 %   | 1,30 %                                                             |

**Tabla 5. Resultados de las corridas para cargas de  $30 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$** 

| Corridas           | pH     |          | DQO ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) |          | O2 disuelto ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) |          | $\Delta Ba$ ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ) |
|--------------------|--------|----------|-----------------------------------------|----------|-------------------------------------------------|----------|--------------------------------------------------------------------|
|                    | Alim.  | Efluente | Alim.                                   | Efluente | Alim.                                           | Efluente |                                                                    |
| 1                  | 4,15   | 8,41     | 40 232                                  | 12 744   | 0,1                                             | 1,84     | 20,4                                                               |
| 2                  | 4,12   | 8,13     | 40 232                                  | 12 152   | 0,1                                             | 1,72     | 20,9                                                               |
| 3                  | 4,15   | 8,20     | 40 232                                  | 12 480   | 0,1                                             | 1,84     | 20,6                                                               |
| 4                  | 4,10   | 8,67     | 40 232                                  | 12 365   | 0,1                                             | 1,76     | 20,7                                                               |
| 5                  | 4,20   | 8,54     | 40 232                                  | 12 544   | 0,1                                             | 1,70     | 20,6                                                               |
| 6                  | 4,15   | 8,51     | 40 232                                  | 12 430   | 0,1                                             | 1,81     | 20,7                                                               |
| Valor medio        |        |          | 40 232                                  | 12 452   | 0,1                                             | 1,78     | 20,7                                                               |
| Valor máximo       | 4,20   | 8,67     | 40 232                                  | 12 744   | 0,1                                             | 1,84     | 20,9                                                               |
| Valor mínimo       | 4,10   | 8,13     | 40 232                                  | 12 152   | 0,1                                             | 1,70     | 20,4                                                               |
| Desv. estándar     | 0,03   | 0,21     | 0,0                                     | 196,2    | 0,0                                             | 0,06     | 0,1                                                                |
| Coef. de variación | 0,82 % | 2,48 %   | 0 %                                     | 1,58 %   | 0,0 %                                           | 3,42 %   | 0,71 %                                                             |

**Ajuste del modelo de regresión no lineal para el cálculo de  $\Delta Ba$** Variable dependiente:  $\Delta Ba$ Variable independiente:  $Ba$ 

Función a estimar:

$$\Delta Ba = \Delta Ba_{\max} \frac{Ba}{Ba + k} \quad (3)$$

Número de observaciones: se tomaron los valores de  $Ba$  y  $\Delta Ba$  de las 18 corridas y el punto (0,0) por donde debe pasar la curva, para un total de 19 puntos.

Método de estimación: Marquardt

En la tabla 6 y tabla 7 aparecen los resultados de la estimación y el análisis de la varianza que se reportan cuando se concluye el ajuste de la ecuación.

**Tabla 6. Resultados de la estimación**

| Parámetro         | Estimado | Error estándar<br>asintótico | Intervalo de confianza<br>asintótico con un 95,0 % |          |
|-------------------|----------|------------------------------|----------------------------------------------------|----------|
|                   |          |                              | Inferior                                           | Superior |
| $\Delta B_{amax}$ | 57,73    | 5,63                         | 45,85                                              | 69,61    |
| $k$               | 55,17    | 7,73                         | 38,86                                              | 71,47    |

**Tabla7. Análisis de varianza**

| Fuente        | Suma de Cuadrados | Gl | Cuadrado Medio |
|---------------|-------------------|----|----------------|
| Modelo        | 4 360,43          | 2  | 2 180,21       |
| Residuo       | 6,04              | 17 | 0,36           |
| Total         | 4 366,47          | 19 |                |
| Total (Corr.) | 594,71            | 18 |                |

R-Cuadrada = 98,98 %

R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 98,92 %

Error estándar del est. = 0,60

Error medio absoluto = 0,50

Estadístico Durbin-Watson = 0,71

Autocorrelación residual de retardo 1 = 0,63

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo de regresión no lineal para describir la relación entre  $\Delta Ba$  y una variable independiente La ecuación del modelo ajustado es:

$$\Delta Ba = 57,73 \frac{Ba}{Ba + 55,17} \quad (4)$$

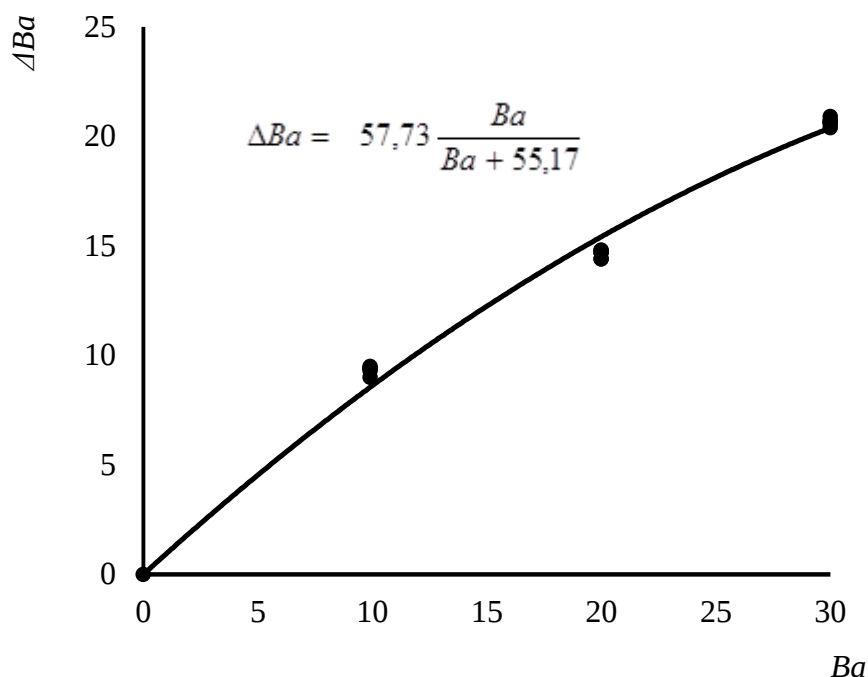
Al realizar el ajuste, el proceso de estimación terminó exitosamente después de 5 iteraciones, en este punto los coeficientes estimados convergieron con los estimados actuales.

El estadístico R-cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 98,98 % de la variabilidad en  $\Delta Ba$ . El estadístico R-Cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes es 98,92 %.

El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 0,60. Este valor puede utilizarse para construir límites de predicción para nuevas observaciones seleccionando la opción de Pronósticos del menú de texto. El error absoluto medio (MAE) de 0,50 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) prueba los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentaron en su archivo de datos.

La salida también muestra los intervalos asintóticos del intervalo de confianza del 95,0 % para cada uno de los parámetros desconocidos (tabla 6).

En la figura 2 se grafican todos los valores obtenidos de  $\Delta Ba$  contra  $Ba$  y puede verse la curva ajustada, así como la ecuación del modelo.



**Figura 2. Gráfico del modelo ajustado**

Como puede apreciarse en los aspectos analizados hasta ahora, se puede concluir que el modelo se ajusta con un coeficiente R-Cuadrada = 98,98 % y con valores de  $k = 55,17$  g (de DQO alimentados)  $\cdot m^{-2}$  (empaquetadura)  $\cdot d^{-1}$  y  $\Delta B_{amax} = 57,73$  g (de DQO reducidos)  $\cdot m^{-2}$  (empaquetadura)  $\cdot d^{-1}$ .

#### **Eficiencia de reducción de la DQO en relación con la carga aplicada para la vinaza cruda**

En la tabla 8 aparecen calculados los porcentajes de reducción de DQO para los diferentes valores de carga aplicada por unidad de la superficie de la empaquetadura por día.

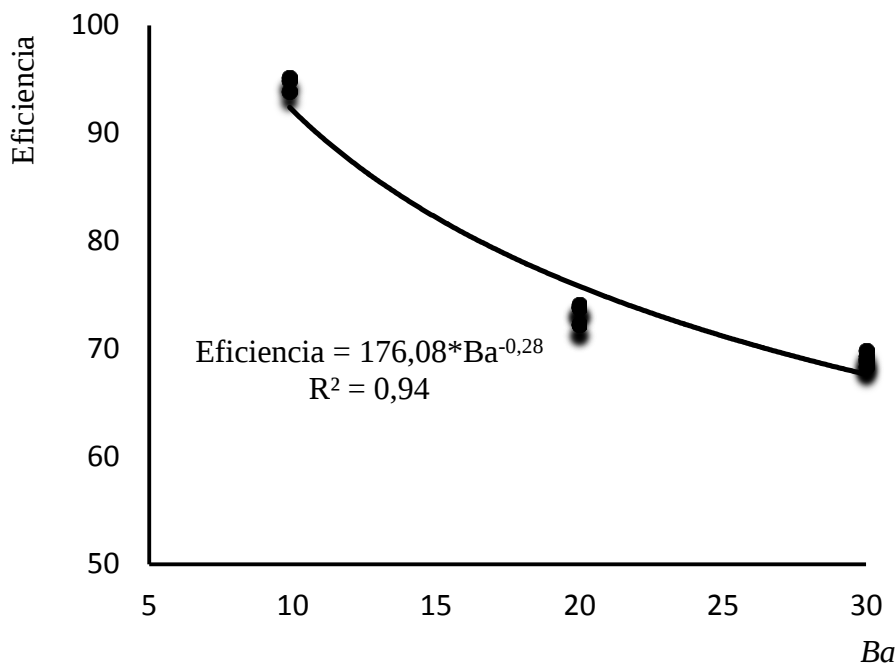
**Tabla 8. Valores de porcentaje de reducción de DQO contra cargas aplicadas**

|                                       |      |      |     |      |      |      |      |      |      |
|---------------------------------------|------|------|-----|------|------|------|------|------|------|
| $Ba$<br>$g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ | 9,9  | 9,9  | 9,9 | 9,9  | 9,9  | 9,9  | 20   | 20   | 20   |
| % Red de DQO                          | 95,6 | 95,1 | 95  | 95,1 | 93,9 | 94,9 | 72,2 | 73,9 | 72,2 |

|                                       |      |      |      |      |      |    |      |      |      |
|---------------------------------------|------|------|------|------|------|----|------|------|------|
| $Ba$<br>$g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ | 20   | 20   | 20   | 30   | 30   | 30 | 30   | 30   | 30   |
| % Red de DQO                          | 74,1 | 73,8 | 73,8 | 68,3 | 69,8 | 69 | 69,3 | 68,8 | 69,1 |

Los valores anteriores se grafican en la figura 3 a continuación.



**Figura 3. Eficiencia de reducción de la DQO contra la carga  $Ba$  aplicada en  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$**

De los datos y la figura 3 se puede considerar que para las condiciones en que se trabajó, los mejores valores de la eficiencia de reducción de la demanda química de oxígeno se logran para cargas por unidad de área de empaquetadura entre 10 y 20  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ . Por encima de este valor la eficiencia disminuye, lo cual se puede deber a que para lograr mayores cargas hay que incrementar el flujo y con ello disminuye el tiempo de retención hidráulica de la vinaza cruda y/o que la vinaza en el balance nutricional se encuentra por debajo de la relación teórica recomendada y se requerirá la adición de los nutrientes. Además, se puede observar en la tabla 5 que para la carga 30  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , la concentración de oxígeno disuelto en el efluente está por debajo de 2  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , lo que puede ser indicativo de que el flujo de oxígeno fue insuficiente para estas condiciones de trabajo.

## CONCLUSIONES

- Se puede concluir que el modelo de Rusten aplicado a un filtro empacado airado se ajusta con un coeficiente R-Cuadrada = 98,98 % y con valores de  $k = 55,17 \text{ g (de DQO alimentados)} \cdot \text{m}^{-2} \text{ (empaquetadura)} \cdot \text{d}^{-1}$  y  $\Delta B_{\text{amax}} = 57,73 \text{ g (de DQO reducidos)} \cdot \text{m}^{-2} \text{ (empaquetadura)} \cdot \text{d}^{-1}$  y que uno de los parámetros fundamentales para el diseño es la carga orgánica por unidad de área de empaquetadura.
- Los mejores valores de la eficiencia de reducción de la demanda química de oxígeno se obtuvieron para valores de carga orgánica por unidad de área de empaquetadura entre 10 y 20  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ .

## REFERENCIAS

- Arimi M. M., Zhang Y., Götz G. and Kiriamiti K.** (2014). "Antimicrobial colorants in molasses distillery wastewater and their removal technologies". *International Biodeterioration & Biodegradation*, vol. 87, pp 34-43, ISSN: 0964-8305, Elsevier, New York. USA.
- Cabrera A., Pereda I., Olivo D., Lebrero R. and Zaiat M.** (2017). "Anaerobic digestion of sugar cane vinasse through a methanogenic UASB reactor followed by a packed bed reactor". *Applied Biochemistry Biotechnology*, vol. 182. no 4. pp. 1127-1145, ISSN: 0273-2289, Springer, New York, USA.
- Cabrera A. y Díaz M.** (2013). "Tratamiento de vinaza cubana en un reactor anaerobio empacado de flujo ascendente". *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, vol XXXIV. no. 2, pp 41-49, ISSN: 1680-0338, CIH, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae). La Habana, Cuba.
- Campos K. E, Álvarez J. L., Lira M. L. and Bandala E. R.** (2017). "Coupled inverse fluidized bed biorreactor with advanced oxidation processes for treatment of vinasse". *Geosciences, AIMS*, vol.3, no. 4, pp. 538 – 551. ISSN 2471-2132. USA.
- Díaz M. y de Armas F.** (2006). "Modelación de filtros sumergidos y aireados". *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, vol. XXVII, no. 2- 3, pp. 24-32, ISSN: 1680-0338, CIH, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae), Habana, Cuba.
- Díaz M. y Montesino M. A.** (2003). "Filtros biológicos sumergidos y aerados". *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, vol. XXIV, no. 1, pp. 42-47, ISSN: 1680-0338, CIH, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae), La Habana, Cuba.
- Durán M. F., Sanabria I. y Gutiérrez N.** (2015). "Evaluación de la producción de metano en la digestión anaerobia de vinazas pretratadas con ozono", *Revista EIA*, vol. 12, no. 24, pp. 167-177, ISSN 1794-1237, Escuela de Ingeniería de Antioquia (EIA), Envigado, Colombia.
- España E., Mijangos J., Barahona L., Domínguez J., Hernández G. and Alzate L.** (2011). "Vinasses: characterization and treatment", *Waste Management & Research*, vol. 29, no. 12, pp. 1235-1250., ISSN: 0734-242X. Sage Publications, Newbury Park, California, USA.
- Fuess L. T. and García M. L.** (2014). "Review. Implications of stillage land disposal: a critical review on the impacts of fertirrigation". *Journal of Environmental Management*, vol. 145, pp. 210-229, ISSN: 0167-1987, Elsevier, New York, USA.
- Hati K. M., Biswask A. K., Bandyopadhyay K. K. and Misra K.** (2007). "Soil properties and crop yields on a vertisol in India with application of distillery effluent". *Soil & Tillage Research*, vol. 92, no 1-2, pp. 60-68, ISSN: 0167-1987, Elsevier, New York, USA.
- Rusten B.** (1984). "Wastewater treatment with aerated submerged biological filters", *Journal Water Pollution Control Federation*, vol. 56, no. 5, pp. 424 – 431, ISSN: 0043-1303, Water Environment Federation, USA.