

CONSIDERACIONES SOBRE LA INTERRELACIÓN ETANOL – LEVADURA TORULA EN UN COMPLEJO AGROINDUSTRIAL

CONSIDERATIONS ON THE INTERRELATIONSHIP BETWEEN ETANOL AND TORULA YEAST IN AN AGROINDUSTRIAL FACTORY

Manuel Díaz de los Ríos^{1}*

¹ Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA). Via Blanca 804
Esq. Carretera Central. San Miguel del Padrón. La Habana. Cuba.

Recibido: Febrero 3, 2017; Revisado: Marzo 3, 2017; Aceptado: Mayo 8, 2017

RESUMEN

En el presente trabajo se analizan, mediante modelación matemática y simulación, los vínculos existentes entre las producciones de etanol y levadura forrajera pertenecientes a un complejo agroindustrial en lo referente al aprovechamiento de las fuentes de carbono que aporta el jugo de caña para ambas producciones, así como las relaciones de estas con algunos parámetros de operación de la destilería y sus influencias en la producción de levadura forrajera. Para el desarrollo de este trabajo se ha elaborado un modelo de simulación en Microsoft Excel en el que, mediante balances de masa, se estima la DQO de la vinaza y su incidencia en la producción de levadura forrajera. Se evidencia la conveniencia del empleo de calentamiento indirecto en la columna de destilación de etanol como alternativa para la elevación de la concentración de carbono de las vinazas destinadas a la producción de levadura. También se analiza el efecto de la eficiencia en la fermentación alcohólica y del grado alcohólico del vino sobre la DQO de la vinaza y se refleja la conveniencia de trabajar con un elevado grado alcohólico para el beneficio de ambas producciones. La metodología empleada permite estimar la respuesta ambiental de este tipo de producciones.

Palabras clave: etanol, levadura, simulación, vinaza

Copyright © 2017. Este es un artículo de acceso abierto, lo que permite su uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.

* Autor para la correspondencia: Manuel Díaz, Email: manuel.diaz@icidca.azcuba.cu

ABSTRACT

The links between the ethanol and fodder yeast productions belonging to an agro-industrial complex, concerning the use of the carbon sources supplied by sugar cane juice for both productions, are analyzed through mathematical modeling and simulation in this work. The relations of these carbon sources with some operation parameters of the distillery and their influences on the production of fodder yeast are also considered. In order to conduct this research, a simulation model in Microsoft Excel has been elaborated in which, using mass balances, the COD of vinasse and its incidence in the production of fodder yeast are estimated. This work shows the convenience of the use of indirect heating in the ethanol distillation column as an alternative for the increase of the carbon concentration in the vinasse meant to yeast production. It also analyzes the effect of both, the efficiency of the alcoholic fermentation and of the alcoholic level of the wine on the COD of vinasse; and it shows the convenience of working with a high alcoholic level to benefit both productions. The methodology used allows to predict the environmental response of this type of productions.

Key words: ethanol, yeast, simulation, vinasse

1. INTRODUCCIÓN

La producción de etanol a partir de caña de azúcar ha sido ampliamente extendida a nivel mundial a partir del rol asumido por el etanol como sustituto parcial del combustible automotor, constituyendo Brasil el país con mayor experiencia en este campo. La experiencia brasilera reporta el empleo de tres fuentes de sustratos cañeros para este propósito: melaza, jugos de caña y mezclas de jugos con melaza.

La naturaleza del sustrato empleado para la producción de etanol, entre otros factores, condiciona las características de las vinazas resultantes de la destilación de etanol, las que son mayormente utilizadas en el fertirriego de los cultivos cañeros, dado el significativo contenido de potasio que generalmente las mismas poseen. Sin embargo, el contenido de materia orgánica presente en las vinazas, usualmente reportado como demanda química de oxígeno (DQO), ha propiciado el estudio de otras alternativas para el aprovechamiento de las mismas (Rodrigues y Hu, 2017; Sajbrt, y col., 2010; Barbosa y col., 2014), tales como la producción de biogás (Bezerra, 2006; Gomes De Barros, 2013; Santana, 2013), el empleo de este en la elevación del potencial de generación eléctrica (Fonzar, 2003) y la combustión de vinazas para la generación de vapor y electricidad (Díaz de los Ríos y Saura, 2013; Schopf y Erbino, 2010; Franck y col., 2016), entre otros. La producción de levadura forrajera a partir de las vinazas de las destilerías constituye una alternativa más (Garrido y col., 2010), con la particularidad de que la misma contribuye de forma significativa a atenuar la controvertida discrepancia alimentos / energía.

Un elemento común en la relación etanol / levadura forrajera (etanol / torula) radica en que ambas demandan de una fuente de carbono para su proceso, donde las melazas y jugos azucareros se erigen como materias primas idóneas, aunque la producción de levadura torula tiene como ventaja el aprovechamiento de aquellas fuentes de carbono que son rechazadas por la producción de etanol o generadas como residuos en este proceso (glicerol, ácidos orgánicos y polisacáridos, entre otros).

De aquí se infiere que la disponibilidad de carbono en las vinazas constituye un elemento fundamental en la producción de levadura torula, por lo que para vinazas con valores bajos de DQO se debe suplementar el mosto preparado para la producción de levadura con una cierta cantidad de jugo de caña hasta alcanzar la concentración requerida para la fermentación.

El contenido de carbono presente en las vinazas de destilerías que operan con jugo de caña depende de diversos factores, entre los que cabe señalar la calidad del jugo de caña, la eficiencia del proceso fermentativo de producción de etanol, la eficiencia de los sistemas de destilación y recuperación de levadura y el tipo de columna de destilación empleada (con o sin rehervidor), entre otras.

La información disponible sobre el contenido de DQO en las vinazas de destilerías que operan solo con jugo de caña es, en cierta medida dispersa, variable y no existen reportes directos de su relación con las características de diseño o condiciones de operación de la destilería que la genera, lo determina la necesidad de disponer de una herramienta que permita estimar sus características para la producción de levadura forrajera.

Bezerra (Bezerra, 2006) aborda el tema de la producción de biogás en un reactor de “flujo ascendente con manto de lodos” (conocido en inglés como upflow anaerobic sludge blanket o UASB). En su trabajo presenta una tabla donde se resumen los reportes de varios trabajos en los que se caracterizan las vinazas de destilerías que emplean jugo en la preparación del mosto, cuyos valores fluctúan entre 22 y 33 kg/m³; con mayor frecuencia en el entorno entre 22-26 kg/m³.

La degradación anaeróbica de las vinazas en un reactor de lecho fluidizado ha sido también estudiada en la universidad de San Carlos (Siqueira, 2008). En dicho estudio se reporta que la DQO media para destilerías que operan con jugo de caña es de 30,4 kg/m³ con una desviación estándar de 8,2 kg/m³.

Un trabajo elaborado por Fonzar (Fonzar, 2003) sobre la generación de energía a partir de biogás alude a varios reportes sobre caracterización de vinaza y brinda contenidos de carbono del 0,59 al 1,34% en peso, lo que representa un contenido de DQO aproximado de 16 a 35 kg/m³ de vinaza para el caso de producción de etanol con jugos.

Según la Agencia Nacional del Agua y Ministerio del Medio Ambiente, 2009 los valores de la DQO para la vinaza de jugos posee valores que están entre 15-33 kg/m³.

Resulta obvio que para predecir los potenciales productivos de levadura forrajera a partir de vinazas generadas en una destilería que opera solo con jugo de caña, es necesario conocer en qué medida la operación de la destilería incidirá en la composición de las vinazas y como estas, a su vez, demandarán de una mayor o menor disponibilidad de jugo de caña para la preparación del mosto a procesar en la planta de torula. En el presente trabajo se brinda, con la ayuda de la modelación matemática y la simulación de procesos, un análisis de la interrelación existente entre ambas instalaciones y la influencia de diversas condiciones de operación sobre la productividad de las mismas.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo del presente trabajo ha sido elaborado un simulador en Microsoft Excel, en el que se ejecutan los balances de masa asociados a la producción de etanol y levadura forrajera y se evalúan, mediante técnicas de análisis de sensibilidad, los

diversos parámetros de operación que más inciden en ambas producciones. El simulador soporta la solución del modelo en el empleo de la herramienta “Solver” de Excel y en la programación con VBA. En la figura 1 se brinda la representación esquemática del modelo implementado.

Los resultados ilustrados han sido determinados para una destilería de 700 mil litros por día de etanol que opera con jugo a 18,8 grados Brix, 85 % de pureza y que logra una concentración de 8% v/v en el vino a la destiladora. Sin embargo, como las condiciones a las que entra el jugo pueden ser variables se han considerado como variables independientes la eficiencia en la fermentación (86-92%), el grado alcohólico del vino (7-10 % v/v) y la pureza del jugo (89-90%), así como el empleo o no de rehervidor en la columna de destilación, dada su incidencia en el nivel de dilución de la vinaza, a los efectos de estimar la “calidad” de la vinaza que será empleada en una producción de levadura forrajera de 100 t/d.

Se valora el efecto de estas variables sobre la DQO de la vinaza y la necesidad de suplementar la misma con jugo de caña para la producción de levadura forrajera.

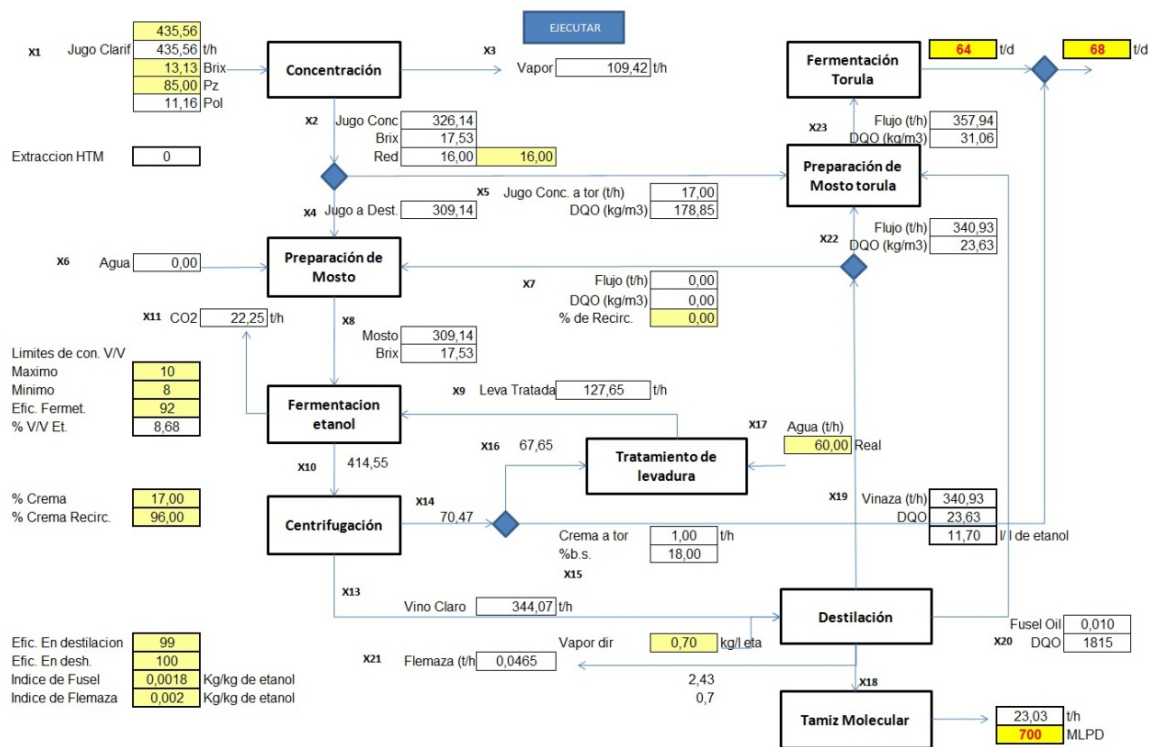


Figura 1. Representación esquemática del modelo elaborado en Microsoft Excel

El simulador permite ejecutar los balances de masa total del proceso por etapas, así como el balance por componente, particularmente los referentes a reductores, sólidos no fermentables, etanol, aceite fúsel, CO₂ y glicerol. También se determina el contenido de carbono de cada corriente a partir del porcentaje de carbono de cada componente en la misma, con el cual se estima su DQO. Ello permite evaluar la influencia de diversas condiciones operacionales de la destilería sobre la DQO de la vinaza.

El modelo es resuelto mediante el empleo de la herramienta “Solver” de Microsoft Excel donde se minimiza la suma de los cuadrados de los residuos en el balance de carbono mediante la aplicación del método de estimación cuadrática de las variables del

modelo y el método de gradiente conjugado como estrategia de optimización, dada la dimensión del modelo a resolver.

Para la elaboración de las superficies de respuesta que expresan la variación del flujo de jugo con la eficiencia en fermentación y el grado alcohólico se utilizó la herramienta *Statistica*, versión 5.5.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La simulación con Microsoft Excel ha sido dirigida, en primera instancia, estimar los valores de DQO esperados en una destilería que opera solo con jugos, por ser esta la materia prima fundamental en la producción de levadura torula, así como disponer de criterios de confiabilidad mediante la comparación de los resultados obtenidos por simulación con los reportes de literatura (tabla 1) y las características esperadas en las vinazas de destilerías que operan solo con jugo de caña, en lo concerniente a su DQO, como función del rendimiento en la fermentación alcohólica en destilerías que operan con y sin rehervidores en la columna destiladora. Los resultados de esta evaluación se ilustran en la figura 2.

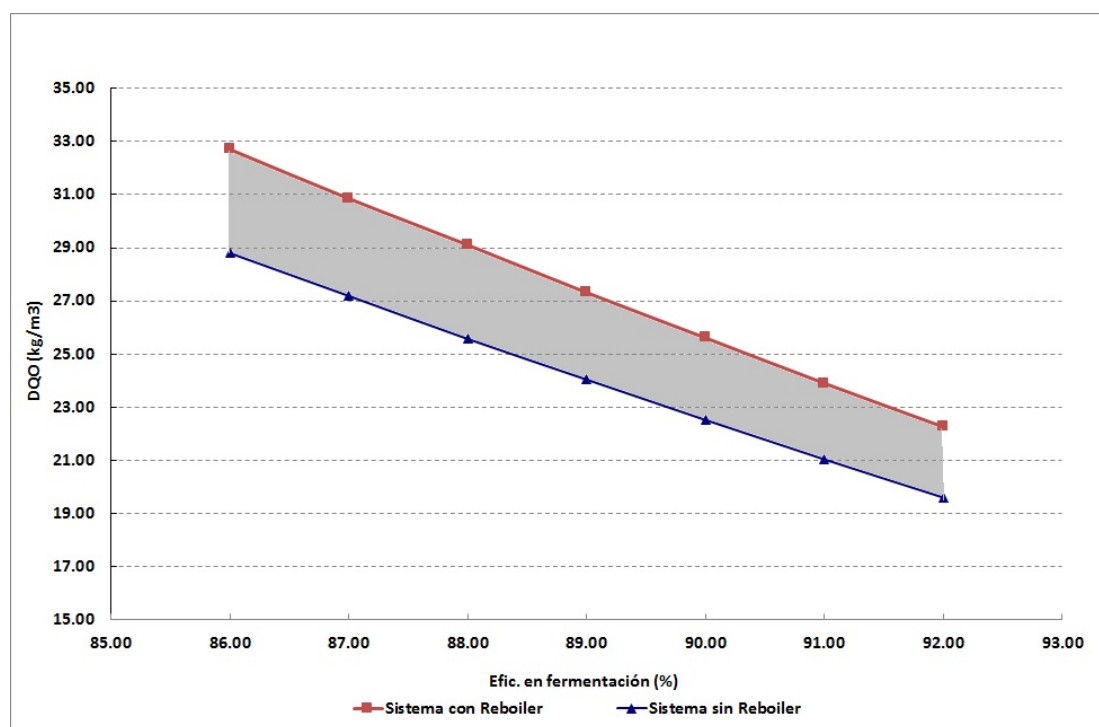


Figura 2. Variación de la DQO de las vinazas como función del rendimiento en la fermentación y el esquema de manejo del vapor en la columna destiladora

Se evidencia que con el incremento del rendimiento en la fermentación disminuye la DQO de la vinaza, siendo esta disminución superior para aquellos sistemas de destilación donde se emplea vapor directo en las columnas destiladoras. El intervalo reportado por la simulación (19 a 33 kg/m³) se corresponde en gran medida con la variabilidad registrada por la literatura de 15 a 33 kg/m³ (Agencia Nacional de Agua y Ministerio del Medio Ambiente, 2009). Para sistemas donde el grado alcohólico del vino resulte inferior se podrán obtener valores de DQO aún más bajos (cerca de 15 kg/m³), como resulta cuando el vino solo alcanza 6-6,5% v/v.

Esta relación entre la DQO de la vinaza y el grado alcohólico del vino se ilustra en la figura 3, donde se aprecia una relación directamente proporcional entre el incremento de la DQO y el aumento del grado alcohólico en el vino, resultando superior en aquellas instalaciones industriales donde se emplea rehervidores.

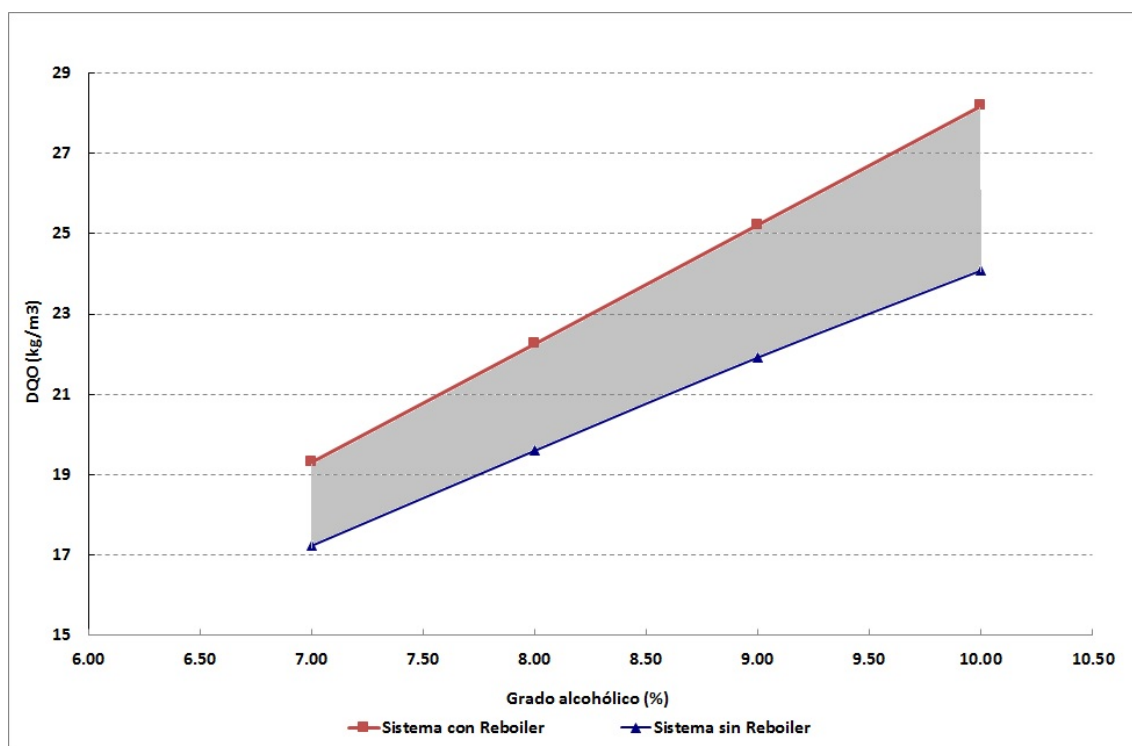


Figura 3. Variación de la DQO de las vinazas como función del grado alcohólico del vino y el esquema de manejo del vapor en la columna destiladora

Sin embargo, la pureza de los jugos también posee una influencia directa sobre los rendimientos en la producción de etanol. Como se conoce, la producción de etanol está directamente vinculada con el contenido de azúcares reductores presentes en los jugos. El contenido de azúcares reductores en los jugos (AR) guarda una relación inversamente proporcional con la pureza de los mismos y su magnitud va desde 0,2 a 0,9% (Mitiko y col., 2002). Sin embargo, entre un 0,5 y un 4% de los sólidos que componen el Brix del jugo mezclado representan sustancias orgánicas que no constituyen azúcares reductores y que están formados fundamentalmente por ácidos orgánicos, dextrana, cera y aminoácidos, entre otros (Walford, 1996), los que no contribuyen a la fermentación alcohólica, pero sí constituyen fuente de carbono para la producción de levadura forrajera. Aunque la estimación de la DQO de la vinaza con la variabilidad de la pureza de los jugos resulta más difícil de predecir, dada la diversidad de compuestos orgánicos, en la figura 4 se brinda una ilustración del posible comportamiento de la DQO como función de esta variable. A mayor pureza mayor contenido de azúcares reductores para su transformación en etanol y por tanto menor DQO en la vinaza residual.

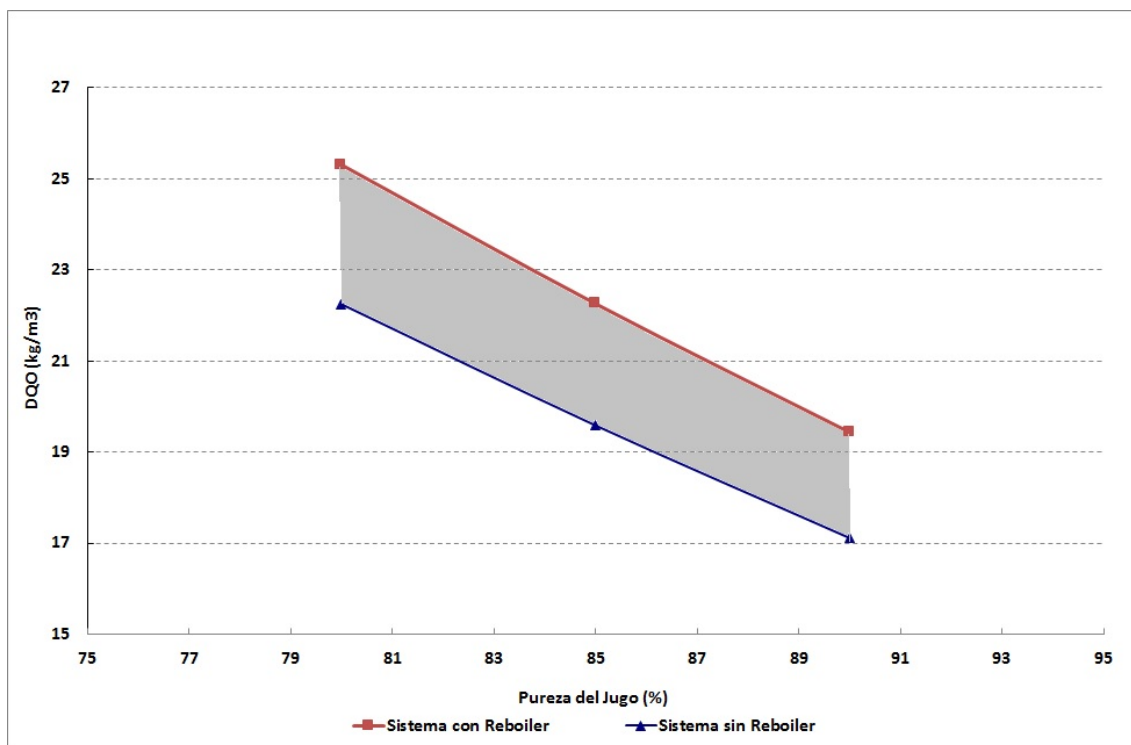


Figura 4. Variación de la DQO de las vinazas como función de la pureza de los jugos y el esquema de manejo del vapor en la columna destiladora

La interrelación entre todas estas variables analizadas (rendimiento en fermentación alcohólica, grado alcohólico y pureza del jugo) determinará el contenido de carbono en las vinazas y por tanto la necesidad de desviar una mayor o menor cantidad de jugo para el ajuste de las condiciones de fermentación para la producción de levadura torula; por lo que se evidencia, mediante la simulación, que la variabilidad en las condiciones de operación posibles a encontrar se corresponde con las variaciones experimentales reportadas por la literatura sobre la DQO de la vinaza a partir del empleo de jugos en las destilerías (Bezerra, 2006; Fonzar, 2003)

En la tabla 1 se resumen los intervalos de variación de la DQO de las vinazas resultantes de la fermentación de jugos de caña con los obtenidos por simulación. Desafortunadamente, al ser la vinaza un residual que es tratado por una u otra tecnología tal cual se obtiene, las informaciones sobre sus propiedades que se reportan no asocian sus características a las condiciones operacionales o de diseño de la fábrica que los genera y no existen datos experimentales sobre el cambio de sus propiedades en función de los parámetros aquí evaluados, por lo que solo es posible evaluar si la variabilidad que se reporta en la literatura se corresponde con las variables independientes analizadas en el presente trabajo y los rangos de variación son comparables a los registrados. De la tabla 1 se infiere que el modelo propuesto pudiera ser válido para una estimación preliminar, más una validación rigurosa del mismo requeriría del registro de datos industriales en destilerías que operen con jugo de caña.

Tabla 1. Comparación de los intervalos de variación de la DQO obtenidos por simulación con los reportados

<i>DQO (kg/m³)</i>		<i>Referencias</i>
<i>Mínimo</i>	<i>Máximo</i>	
15	33	Agencia Nacional de Agua y Ministerio del Medio Ambiente, 2009
22	26	Bezerra, 2006
16	35	Fonzar, 2003
17,67	31,33	Promedio de literatura
20	33	Este trabajo (Según eficiencia en Fermentación)
17	28	Este trabajo (Según grado alcohólico)
17	25	Este trabajo (Según pureza del jugo)
18,00	28,67	Promedio de simulación

Siempre será deseable trabajar con jugos de la mejor calidad posible, así como alcanzar los mayores rendimientos durante la fermentación alcohólica, por lo que la mejora de estas variables siempre apuntará hacia una reducción en la DQO de las vinazas. De aquí que la elevación del grado alcohólico en el vino constituye la mejor alternativa para favorecer el incremento en la concentración de carbono en las vinazas, lo que a su vez demandaría trabajar con concentraciones de jugo adecuadas para este propósito. Por supuesto, la elevación del grado alcohólico por encima de 10-11% v/v pudiera propiciar la inhibición del proceso fermentativo. De esta forma, la elevación de la concentración de jugo hasta 21°Bx (19% de azúcares reductores totales) permitiría reducir el flujo de jugo hacia la preparación del mosto para la producción de levadura torula desde 21,6 hasta 42,8 t/h.

La cantidad de jugo a emplear en la producción de levadura será una función de su concentración, de la DQO de la vinaza y la cantidad de vinaza. El jugo concentrado tiene como objetivo elevar la concentración de carbono en el fermentador para alcanzar una concentración de levadura equivalente a 10 g/l equivalente a una conversión del 60% de la carga. Los flujos de la mezcla jugo/vinaza y la concentración de carbono alcanzada determinarán los volúmenes de producción de levadura.

Las variaciones del flujo de jugo hacia la producción de levadura como función de la eficiencia en la fermentación y el grado alcohólico en el vino sin y con empleo de rehervidor son mostradas en las figuras 5 y 6 respectivamente, al representar los datos de en superficies de respuesta con el software Statistica (StatSoft, Inc, 1984). Se evidencia la conveniencia de trabajar con un elevado grado alcohólico en el vino para reducir el flujo de jugo, ya que niveles superiores de concentración de etanol en el vino propiciarían un incremento en la DQO de la vinaza.

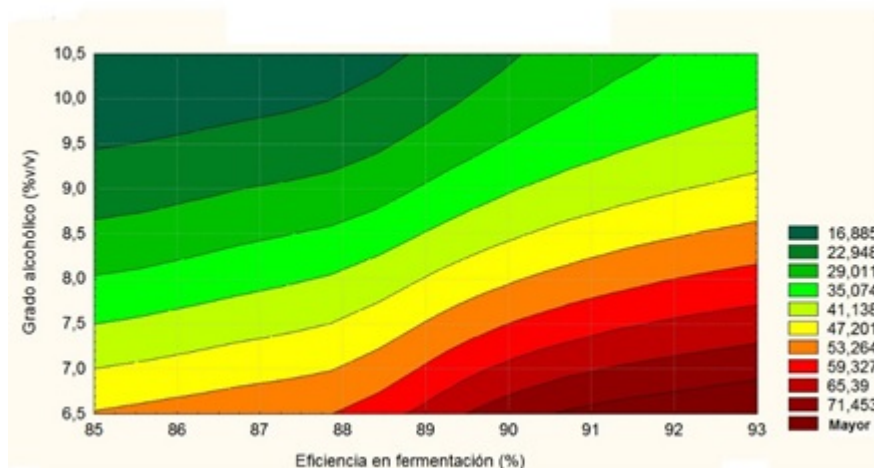


Figura 5. Variación del flujo de jugo en t/h como función de la eficiencia en la fermentación y el grado alcohólico del vino. Sistema sin rehervidor

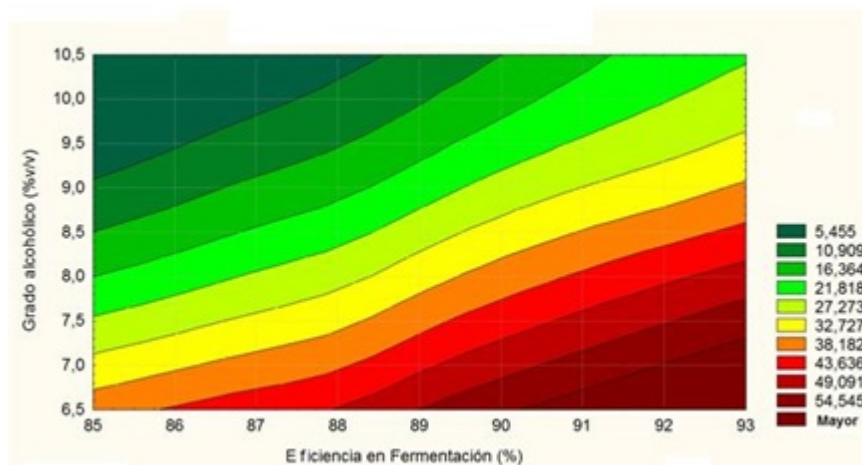


Figura 6. Variación del flujo de jugo en t/h como función de la eficiencia en la fermentación y el grado alcohólico del vino. Sistema con rehervidor

La obtención de altas concentraciones de alcohol en el vino requiere de la operación de los fermentadores con altas concentraciones de azúcares reductores.

Las producciones de etanol y levadura torula resultan complementarias en el aprovechamiento del carbono disponible en los jugos, por lo que aquellas fuentes de carbono que no son consumidas en la producción de etanol serán aprovechadas por la producción de levadura. De aquí que ambas producciones guarden una relación lineal entre sí, tal como se evidencia en la figura 7, e independiente de las condiciones en las que se ha efectuado la simulación. Es posible verificar que, cuando se emplea jugo de caña en los volúmenes y concentraciones definidos para este estudio, se alcanza una producción de 700 millones de l/d al operar con altas eficiencias en fermentación (91-92%) y que para estas condiciones la producción de levadura torula estará en el orden de las 80 t/d (sin considerar la levadura *Sccharomyces cerevisae* no recirculada en la destilería). Sin embargo, cuando la conversión en etanol es baja (86-88% de eficiencia

en la fermentación) los volúmenes productivos de este producto descienden, propiciando una mayor disponibilidad de materia prima para la producción de levadura, pudiendo esta rebasar las 100 t/d.

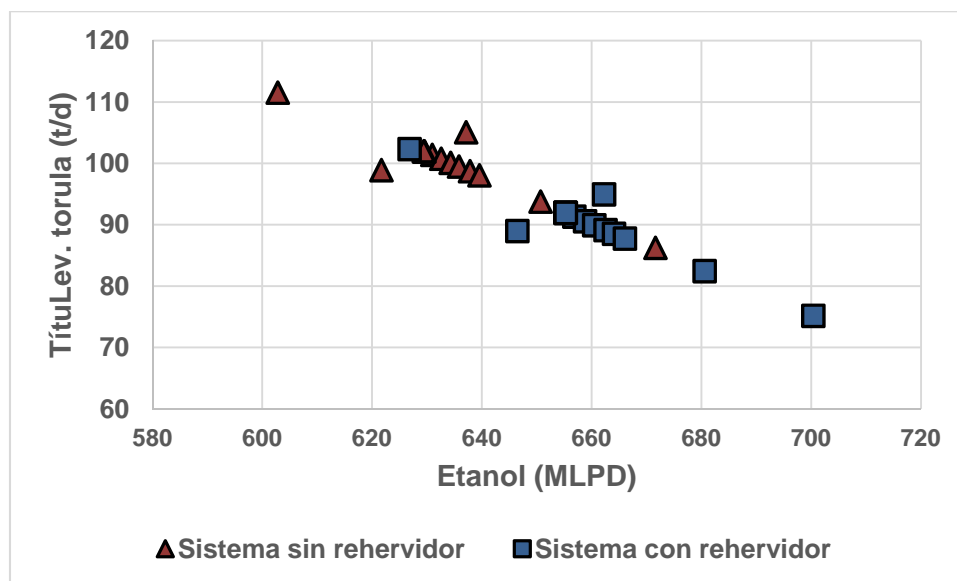


Figura 7. Relación entre las producciones de etanol y levadura torula. Resultados de simulación

4. CONCLUSIONES

1. El empleo de vinazas procedentes de destilerías autónomas tiene como inconveniente los relativamente bajos valores de DQO de las mismas (entre 15-35 kg/m³), tal y como reporta la experiencia industrial brasilera. En el presente trabajo se evidencia la relación existente entre la DQO de las vinazas y las diversas condiciones de diseño y operación de la destilería.
2. El empleo de vinazas para la producción de levadura forrajera recomienda la conveniencia de emplear columnas destiladoras con el empleo de rehervidores y lograr altas concentraciones de etanol en el vino, lo que a su vez demanda de la elevación de la concentración del jugo clarificado por encima de 18° Brix.

REFERENCIAS

- Agencia Nacional de Água, Ministério do Meio Ambiente, Manual de conservacao e reuso de água na indústria sucoenergética., Brasilia, 2009, pp. 176-179.
- Barbosa, L.A., Vaz, C.E., Aparecido Jordan, Lima, M.R. and Silva, E.E., R&D needs in the industrial production of vinasse., São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2014, pp. 619-636. URL disponible en: <http://dx.doi.org/10.5151/BlucherOA-Sugarcane-SUGARCANE BIOETHANOL 55>.
- Bezerra, V.A., Tratamento anaeróbico de vinhaça em reator UASB operado em temperatura na faixa termofílica e submetido ao aumento progressivo de carga., Dissertação de mestrado em Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Carlos, Brasil, 2006.
- Díaz de los Ríos, M., y Saura, G., Informe de Misión a la República Popular China., ICIDCA, 2013, pp. 1-9.
- Franck, F.J., Golato, M.A., Feijóo, E., Morales, W.D., Paz, D., y Octaviano, M., Combustión de vinaza con materiales celulósicos en calderas bagaceras de ingenios

- de la provincia de Tucumán (R. Argentina), Rev. ind. agric. Tucumán, Vol. 93, No.1, 2016, pp. 9-18.
- Fonzar, G.E., Geração de energia através da biodigestão anaeróbica da Vinhaça., Dissertação de mestrado em Engenharia Industrial, UNESP - Campus de Bauru, Brasil, 2003.
- Garrido, N., Navarro, H., Díaz de los Ríos, M. y Pérez, I., Evaluación de alternativas de producción de levadura forrajera mediante SuperPro Designer., ICIDCA Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar, Vol. 44, No. 4, 2010, pp. 34-40.
- Gomes de Barros, V., Conversão anaeróbica de vinhaça e melaço em reatores UASB inoculados com lodo granulado., Dissertação apresentada para a obtenção do Título de Mestre em Microbiologia Agropecuária, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP, Câmpus de Jaboticabal, Brasil, 2013.
- Mitiko, I.E., Brunoro, J.A. y de Souza, D.I., Método de determinação de açúcares reductores aplicável no sistema de pagamento de cana de açúcar., Pesq. Aropec. Brás., Brasília, Vol.37, No.5, 2002, pp. 729-734.
- Rodrigues, C.E. and Hu, B., Vinasse from sugar cane ethanol production: Better treatment or better utilization?, *Frontiers in Energy Research*, Vol. 5, Article 7, 2017, pp. 1-7.
- Santana, A.E., Produção de metano a partir de vinhaça e melaço em reatores UASB termofílicos, em dois estágios., Dissertação apresentada para a obtenção do Título de Mestre em Microbiologia Agropecuária, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP, Câmpus de Jaboticabal, Brasil, 2013.
- Sajbrt, V., Rosol, M. and Ditl, P., 2010, A comparison of distillery stillage disposal methods, *Acta Polytechnica*, Vol. 50, No. 2, 2010, pp. 63-69.
- Schopf, N., and Erbino, P., Thermal utilization of vinasse as alternative fuel., *Proc. Int. Soc. Sugar Cane Technol.*, Vol. 27, 2010, pp. 1-7.
- Siqueira, L.M., Influencia da taxa de carregamento orgânico na degradação anaeróbica da Vinhaça em reator de leito fluidizado. Dissertação de mestrado em Engenharia Química, Universidade de São Carlos, Brasil, 2008.
- StatSoft, Inc., *Software Statistica 5.5*, 1984.
- Walford, S.N., Composition of sugar cane juice., *Proc. S. Afr. Sug. Technol. Ass.* Vol. 70, 1996, pp. 265-266.