



Vol. 54, No. 1 - enero-abril - 2020

Coeficientes de respuesta al agua de variedades de caña de azúcar. Estudio de caso en la unidad empresarial básica (UEB) Jesús Rabí

Answer coefficients to water of sugarcane varieties. A case study in the basic enterprise unit (UEB) Jesús Rabí

Carlos Lamelas-Felipe, Salvador García-Guerra, Jesús Fonseca-Arteaga, Manuel L. Vidal-Díaz y Rolando M. González-Acosta

Potencial de las variedades cubanas de caña energética para la producción de etanol celulósico

Potential of Cuban varieties of energy cane for the production of cellulosic ethanol

Ricardo Campo-Zabala, Alejandro Abril-González y Marlen Ramil-Mesa

El valor indicador en la determinación de los tipos de materiales colorantes presentes en el azúcar crudo

The indicator value in the determination of the types of coloring materials present in raw sugar

Raúl Cruz-Millán

Inventario nacional de contaminantes de la calidad del aire que proceden de la quema de bagazo

National inventory of air quality pollutants from the bagazo burning

Anel Hernández-Garces, Jessica Trujillo-Frometa, Mirtha Reinos-Valladares, Janet Canciano-Fernandez y Francisco Hernández-Bilbao

Reducción de la carga contaminante de la vinaza por producción de proteína unicelular

Reduction of vinasse's polluting load by production of unicellular protein

Patricia M. Albarracín, María F. Lencina, Ada J. Robinson, Samanta Rearte y M.M. Elsa Ferreyra

Desarrollo y validación de un modelo en Aspen Hysys v10.0 para el proceso de fermentación alcohólica

Development and validation of a model in Aspen Hysys v10.0 for the alcoholic fermentation process

Arletis Cruz-Llerena, Osney Pérez-Ones, Lourdes Zumalacárregui-de Cárdenas, José Luis Pérez-de los Ríos

Evaluación del sistema de lagunas de oxidación en la industria productora de azúcar Urbano Noris

Evaluation of the oxidation lagoon system in the sugar industry Urbano Noris

Rosalía de la Caridad Esquivel-Figueredo, Odalis Isabel Figueredo-Sánchez, Yaimet Victoria Téllez-Pol y Rafael Rodríguez-Macfarlane

Determinación de compuestos sensoriales en destilados obtenidos de fermentación alcohólica utilizando sistemas nanoestructurados magnéticos

Determination of sensorial compounds in distillates obtained from alcoholic fermentation using magnetic nanostructured systems

Arianna Núñez-Caraballo, Anna Iliná, Rodolfo Ramos-González, Carolina Flores-Gallegos, Magdalena Lorenzo-Izquierdo, Cristóbal Aguilar-González, Georgina Michelena-Álvarez, Abelardo Flores-Vela y José Luis Martínez-Hernández

Estudio de los efectos del BioJas® en los indicadores morfológicos, fisiológicos y bioquímicos de las vitroplantas de piña MD-2 en la transición *in vitro-ex vitro*, en condiciones de aclimatización

Effects of BioJas ® on morphological, physiological and biochemical indicators of piña MD-2 vitroplantas in the transition *in vitro-ex vitro* and in conditions of acclimatization

Justo L. González-Olmedo, Andrew Mbogholi, René Carlos Rodríguez-Escriba, Romelio Rodríguez-Sánchez y Georgina Michelena-Álvarez

La estruvita: el problema que puede convertirse en solución

The struvite: the problem that can become a solution

Antonio Bell-García y Caridad Suárez-Machín

Determinación de alcoholes superiores por cromatografía de gases y espectrofotometría

Determination of higher alcohols by gas chromatography and spectrophotometry

Dacelis Borroto-Mato, Magdalena Lorenzo-Izquierdo, Nancy Herrera-Marrero, Arlyn Reyes-Linares y Silvia Mato-Pérez

Coeficientes de respuesta al agua de variedades de caña de azúcar. Estudio de caso en la unidad empresarial básica (UEB) Jesús Rabí

Carlos Lamelas-Felipe*, Salvador García-Guerra, Jesús Fonseca-Arteaga, Manuel L. Vidal-Díaz y Rolando M. González-Acosta
Instituto de Investigaciones de la Caña de Azúcar INICA, Carretera CUJAE km 1½, Boyeros, La Habana, Cuba.

*carlos.lamela@inica.azcuba.cu

RESUMEN

El trabajo muestra los coeficientes de respuesta al agua de un grupo de variedades de caña de azúcar obtenido en diferentes condiciones de suelo y clima. Estos fueron categorizados de alta, medio-alta, medio-baja y baja sensibilidad al agua. Se desarrolló un estudio de caso en la unidad empresarial básica (UEB) Jesús Rabí, en la provincia de Matanzas, que aportó, con sistemas de riego de pivote, relaciones agua-rendimiento, en condiciones comerciales altamente significativas ($P < 0.01$); como complemento de este estudio se desarrollaron áreas de investigación de referencia en el mismo lugar, con las variedades C85-102 y C87-51 en cepas de retoño quedado y retoño, respectivamente, que brindaron resultados de déficit de evapotranspiración aproximados a un 5 %, con coincidencia, tanto para los balances ingreso-egreso como para el obtenido por intermedio del uso de la expresión de los coeficientes de respuesta para ambas variedades.

Palabras clave: rendimiento, agua, caña de azúcar.

ABSTRACT

The work shows the answer coefficients to the water of a group of varieties of cane of sugar obtained in different soil condition and climate. The same ones were categorized as of high, half-high, half-low and low sensibility to the water. A case study was developed in the Basic Enterprise Unit (UEB) Jesus Rabí in Matanzas province, which contributed with irrigation systems of pivot relationship water-yield under highly significant commercial conditions ($P < 0.01$); like complement of this study was developed areas of reference investigations in the same place with the varieties C85-102 and C87-51 in stumps of sprout and I sprout respectively, which offered results of deficit of approximate evapotranspiration to 5 %, with coincidence so much for the balances entrance-expenditure like through the use of the expression of the answer coefficients for both varieties.

Key words: yield, water, sugarcane.

INTRODUCCIÓN

La respuesta agroproductiva de la caña, al agua, difiere de acuerdo con el manejo, la región edafoclimática y la variedad, entre otros factores, según Yang (1). De ahí la importancia de estudiar estos elementos, con el objetivo de establecer estrategias de regionalización de variedades, en correspondencia con las tecnologías de riego empleadas.

Nye (1992) y Stewart *et al.* (1977) (2), citados por Tarjuelo (3), usaron los resultados de múltiples trabajos experimentales para establecer un modelo empírico simple o función de producción generalizada. Doorenbos y Kassam (4) establecieron una función de tipo lineal entre el consumo de la caña de

azúcar y los rendimientos, y lo complementaron, al utilizar el modelo de Stewart y recomendaron coeficientes de respuesta al agua constante para cada cultivo, aunque variables por fases de desarrollo.

El problema radica en la necesidad de determinar la respuesta al agua, de variedades de caña de azúcar, la hipótesis señala que cuando se tienen en un área variedades de alta sensibilidad de respuesta al agua y se pretende obtener la máxima producción por unidad de volumen aplicado, estas tendrán prioridad en el suministro de agua.

El objetivo del trabajo es exponer los coeficientes de respuesta al agua, de algunas variedades comerciales de caña de azúcar y presentar un estudio de caso en la UEB Jesús Rabí.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para cuantificar el efecto de la limitación del agua, fue necesario deducir la relación entre la disminución del rendimiento relativo y el déficit de evapotranspiración relativa, dado por el efecto sobre el rendimiento (K_y), para ello se utilizó la siguiente expresión: $(1 - Y_a/Y_m) = K_y (1 - E_{ta}/E_{tm})$. Donde: Y_a = Rendimiento real cosechado, Y_m = Rendimiento máximo cosechado, K_y = Factor de efecto sobre el rendimiento, E_{ta} = Evapotranspiración real, E_{tm} = Evapotranspiración máxima. Las investigaciones para determinar los coeficientes de respuesta al agua, por variedades, fueron realizadas en dos momentos diferentes y bajo distintos tipos de suelo, clima y métodos de riego. En la tabla 1 se brinda la caracterización de los estudios realizados, dentro de un primer proyecto, desarrollado en

Tabla 1. Caracterización del primer y segundo grupos de estudio para la determinación de los coeficientes de respuesta al agua de diferentes variedades

Provincias	UEB	Suelos	Método de riego	Lluvia (mm)
Artemisa	Eduardo García Lavandero	Ferralitizado cálcico (Ferralsol)	Localizado	1398
Matanzas	Cuba Libre	Ferralitizado cálcico (Ferralsol)	Localizado	1550
Ciego de Ávila	Ciro Redondo	Ferralitizado cálcico (Ferralsol)	Localizado	1243
Las Tunas	Jesús Menéndez	Vertisuelos (Vertisol)	Localizado	963
Granma	Arquímides Colina	Aluviales (Fluvisol)	Localizado	1174
Santiago de Cuba	América Libre	Sialitizados cálcicos (Cambisol)	Localizado	1296

Provincias	Lugares	Suelos	Método de riego	Lluvia (mm)
Artemisa	Bauta	Ferralitizado cálcico (Ferralsol)	Aspersión	1388
Matanzas	Jovellanos	Ferralitizado cálcico (Ferralsol)	Aspersión	1524
Villa Clara	Sagua la Grande	Gleysado sialitizado (Gleysol)	Superficial	1139
Ciego de Ávila	Venezuela	Ferralitizado cálcico (Ferralsol)	Aspersión	1226
Holguín	Urbano Noris	Vertisuelos (Vertisol)	Superficial	1128
Guantánamo	Guantánamo	Aluviales (Fluvisol)	Aspersión	838

el período 2001-2004, en el cual se evaluó el método de riego localizado con el empleo de la técnica de riego por goteo subterráneo (5).

Con posterioridad, durante el período 2003-2006, se realizó un segundo proyecto (6) que abarcó la evaluación de variedades comerciales, con el empleo de diferentes métodos (aspersión, superficial y localizado). La caracterización de esos estudios se muestra en la tabla 1.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la tabla 2 se muestran los resultados integrales derivados de este estudio, para las variedades evaluadas, en cuanto a rendimientos máximos, coeficientes de respuesta (K_y) y sensibilidad al agua. La clasificación adoptada se realizó en correspondencia con los criterios de Doorenbos y Kassam (4), quienes categorizaron la caña de azúcar con un coeficiente de respuesta al agua, superior a 1.

El empleo del método de riego localizado permitió identificar cinco variedades con alto coeficiente de respuesta (superior a 1.30) y, por consiguiente, clasificados con alta sensibilidad al agua, cuatro de ellas son variedades principales en la actualidad (C87-51, C86-12, C85-102 y C120-78). Por otra parte, la también variedad principal C1051-73, fue identificada con sensibilidad media-alta.

Tabla 2. Resultados integrales de respuesta al agua de las variedades evaluadas en los períodos 2002-2004 y 2003-2006

Variedades	K_y	Rendimiento máximo (tha ⁻¹)	Sensibilidad al agua
C87-51	1.53	215	Alta
C266-70	1.45	220	Alta
C86-12	1.44	-	Alta
C85-102	1.4	-	Alta
C120-78	1.35	225	Alta
C1051-73	1.25	215	Media - Alta

Variedades	K_y	Rendimiento máximo (tha ⁻¹)	Sensibilidad al agua
B7274	1.4	220	Alta
CI38-77	1.27	-	Media - Alta
C1616-75	1.27	185	Media - Alta
C2115-73	1.24	180	Media - Alta
Ja64-19	1.23	190	Media - Alta
L55-5	1.23	210	Media - Alta
C1324-74	1.22	180	Media - Alta
Ja60-5	1.2	180	Media - Alta
CP52-43	1.2	180	Media - Alta
Ty70-17	1.12	190	Media - Baia
My5514	1.09	230	Media - Baia
B77418	1	170	Media - Baia
C568-75	0.95	185	Baja
C111-79	0.96	200	Baja

Respuesta: Alta >1.30; Media-Alta 1.20-1.29; Media-Baja 1.00-1.19; Baja < 1.00.

En un segundo grupo, con varios métodos de riego, hay otras variedades, entre las que se encuentran las que tienen actualidad (CP52-43 y My5514), con sensibilidad de media-alta y media-baja, respectivamente. Los cultivares restantes, con la excepción de B7274 y Ja64-19, carecen de interés comercial en la actualidad.

Estudio de caso en la UEB Jesús Rabí

La figura 1 refleja la relación entre la norma neta total aplicada y el rendimiento agrícola obtenido para las variedades C87-51, C86-125 y C85-102, durante los años 2009-2018, en la UEB Jesús Rabí, en condiciones comerciales. Las relaciones responden a modelos lineales y potenciales, las correlaciones resultan altamente significativas. ($P < 0.01$) para las tres variedades estudiadas.

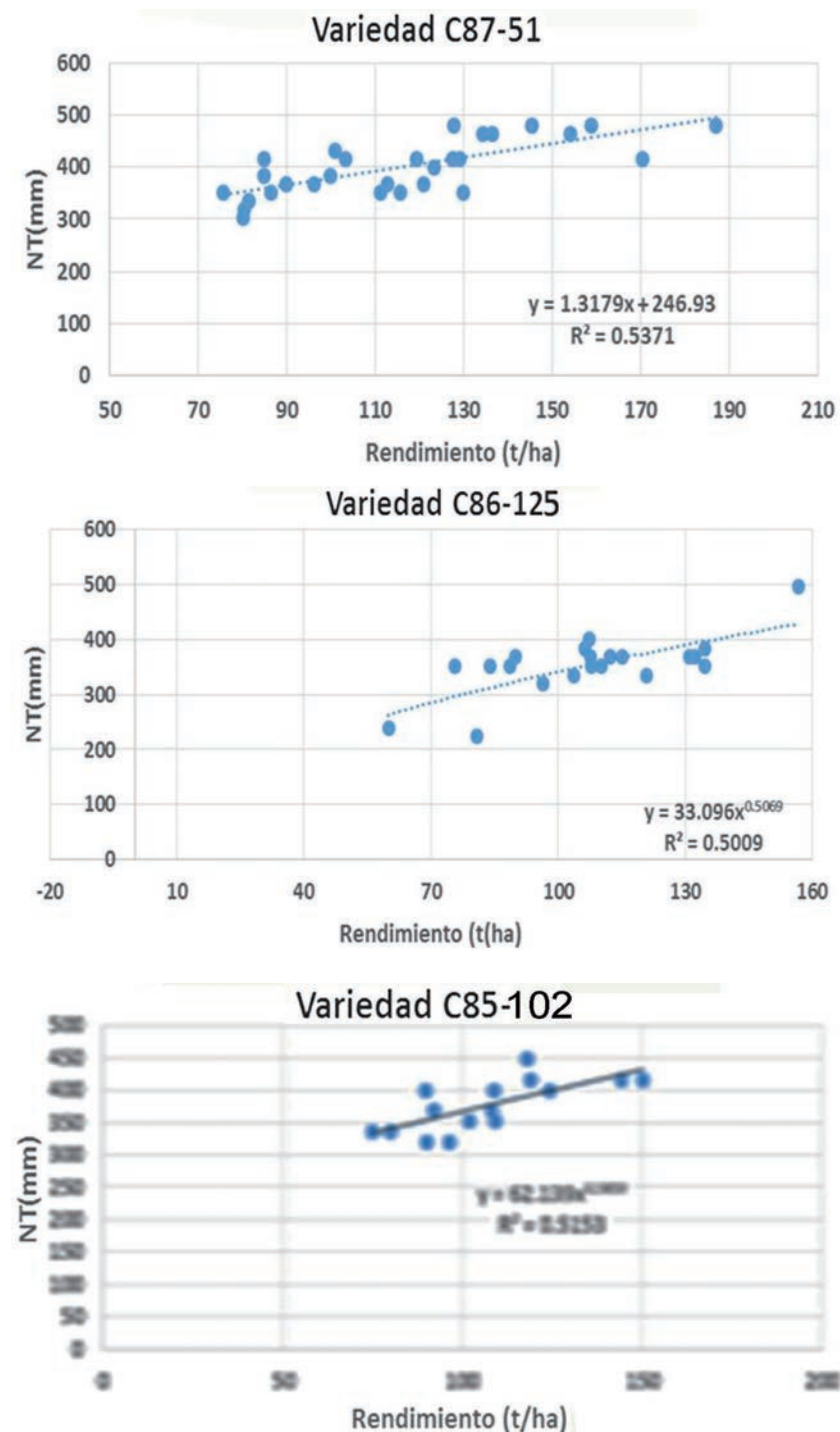


Figura 1. Relación norma neta total aplicada y rendimientos agrícolas en condiciones comerciales.

La tabla 3, expone el balance de ingresos-egresos de dos áreas de referencia satisfactoriamente regadas, las variedades fueron C85-102 y C87-51, los ingresos (lluvia aprovechable y norma neta de riego), cubrieron entre un 95-100 % de la evapotranspiración. (0-5 % de déficit).

Tabla 3. Balance de ingresos-egresos. Áreas de referencias en la UEB Jesús Rabí

Máquina	Variedades	Cepa	Edad	ET (mm)	n (mm)	%	Lla(mm)	%	% ET	% Déficit
1	C85-102	RQ	18	1797	416	23	1299	72	95	5
3	C87-51	R	13	1168	366	31	850	69	100	0

ET: Evapotranspiración, n: Norma neta total, LLa: Lluvia aprovechable, RQ: Retoño quedado, R: Retoño.

La relación entre la disminución, el rendimiento relativo y el déficit de evapotranspiración relativa, en las propias áreas de referencia, indicaron déficits de evapotranspiración hasta, aproximadamente un 5 %, lo que corrobora lo planteado en el balance de ingreso-egreso (tabla 4).

En todos los casos, la productividad del agua aplicada para las dos variedades, estuvo entre 25 y 30 kg/m³; y la productividad del agua consumida, para las áreas de referencia entre 6.8 y 8.5 kg/m³, que coincide con lo planteado por Doorenbos y Kassam (4).

Tabla 4. Relación entre la disminución del rendimiento relativo y el déficit de evapotranspiración relativa. Áreas de referencias en la UEB Jesús Rabí

Variedades	Rr (tha)	Rp (tha)	Ky	Rr/Rp	1-Rr/Rp	1-Etr/Etp	Etr/Etp	% Déficit
C85-102	RQ	18	1797	416	23	1299	72	5
C87-51	R	13	1168	366	31	850	69	0

Rr: Rendimiento real, Rp: Rendimiento potencial, Etr: Evapotranspiración real, Etp: Evapotranspiración potencial.

CONCLUSIONES

- Los coeficientes de respuesta al agua de las variedades de caña de azúcar, pueden ser una herramienta que permita pronosticar la afectación de rendimiento, a partir de una determinada reducción en el consumo de agua.
- Existe una estrecha relación entre las normas netas aplicadas y los rendimientos agrícolas de las variedades C87-51, C86-12 y C85-102, en condiciones comerciales en la UEB Jesús Rabí,
- Los balances de ingreso-egreso en áreas de referencia en la UEB Jesús Rabí, dieron un déficit de consumo inferior a un 5 %, para las variedades C85-102 y C87-51 en cepas de retoño quedado y retoño respectivamente. Este resultado fue coincidente al obtenido por intermedio de la prueba de los coeficientes de respuesta al agua en ambas variedades.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Yang, S. J. (1997). The water use efficiency of sugar cane crop-e review. ISSCT. Irrigation Workshop. Townsville, Australia, Sep. 15-19: 22 pp.
2. Nye (1992) y Stewart, *et al.* (1977), apud Tarjuelo (2005- 581 pp.).
3. Tarjuelo, J. M. (2005). El riego por aspersión y su tecnología. Ediciones Mundi-Prensa: 581 pp.
4. Doorenbos, J. y Kassam A.H. (1986). Efectos de agua sobre los rendimientos de los cultivos. Estudio FAO Riego y Drenaje No 33. (Segunda versión): 212 pp.
5. INICA. (2004). Fundamentos tecnológicos y económicos para la extensión del riego por goteo subterráneo en caña de azúcar. Informe Final de Proyecto de Innovación Tecnológica: 32 pp.
6. INICA. (2006). Planificación de la Operación de los sistemas de Riego y Drenaje y los Recursos Hídricos en Caña de Azúcar. Informe Final de Proyecto Científico-Técnicos del MINAZ: 33 pp.

Potencial de las variedades cubanas de caña energética para la producción de etanol celulósico

Ricardo Campo-Zabala^{1*}, Alejandro Abril-González² y Marlen Ramil-Mesa²

1. Asociación de Técnicos Azucareros de Cuba (ATAC), Filial La Habana. Calle 19, No. 9, entre N y O, Vedado, La Habana 4, Código Postal 10400, Cuba.

*campozaabala@gmail.com

2. Universidad Nacional Evangélica (UNEV), Santo Domingo, República Dominicana.

RESUMEN

Se presentan las características principales de las variedades cubanas de caña energética, de alto contenido de biomasa lignocelulósica, que poseen el doble de fibras (bagazo) que las variedades azucareras y, más de cinco veces materia seca que el Eucaliptus en $t\cdot ha^{-1}\cdot año^{-1}$. Presentan rendimientos potenciales de más de 200 a 300 t de materia verde, en cosechas de 12 meses. Se analiza la producción de etanol celulósico de diferentes materias primas conocidas y se ofrecen las cifras potenciales de obtención de este biocombustible, a partir de la caña energética. Una de las dificultades de los diferentes materiales lignocelulósicos es su composición física heterogénea, lo que dificulta su transformación a etanol en el proceso enzimático, mientras el bagazo de caña energética ofrece una materia prima uniforme, en el proceso de hidrólisis y fermentación, que puede contribuir a seleccionar o utilizar las enzimas en cuestión, aspecto pendiente para la obtención de alcohol celulósico económicamente rentable.

Palabras clave: biocombustible, caña energética, etanol celulósico, *Saccharum* spp.

ABSTRACT

The main characteristics of Cuban varieties of energy cane, with a high content of lignocellulosic biomass, are that they have double fibbers content (bagasse) than the sugar varieties and more than five times dry matter than Eucalyptus in $t\cdot ha^{-1}\cdot year^{-1}$. They present a potential yield of more than 200 to 300 t of green material in 12-month crops. The production of cellulosic ethanol from different cellulosic raw materials is analysed, and the estimated quantities that could be obtained from energy cane are presented. One of the difficulties of the different lignocellulosic materials are their heterogeneous physical composition, what hinders its ethanol transformation in the enzymatic process, while the bagasse of energy cane with its uniform raw material composition throughout the process of hydrolysis and fermentation, which could contribute in the selection or using the enzymes, pending subject to obtain economically viable cellulosic ethanol.

Key words: biofuel, energy cane, cellulosic ethanol, *Saccharum* spp.

INTRODUCCIÓN

Hasta ahora, la producción de etanol ha sido sobre la base de jugos o licores, a partir de las frutas y, más recientemente, con el uso de granos comestibles, que compiten con la producción de alimentos. En la actualidad, el desarrollo de nuevas tecnologías para la producción de etanol, a partir de materiales lignocelulósicos ya es un hecho, aunque todavía su rentabilidad económica necesita de ajustes que hagan más productivo el proceso de obtención; en especial, en los momentos actuales de relativamente bajos precios del petróleo, pero no cabe duda que, en pocos años, este tendrá su máxima expresión tecnológica, con grandes avances en rendimiento y eficiencia económica. Estabilizar la producción de etanol celulósico, a nivel mundial, sería un gran paso de avance, tanto por

no utilizar granos y otros alimentos, o disminuirlos, en la producción de este preciado combustible natural y renovable, así como disminuir, en gran medida, la utilización de combustibles fósiles, en actividades productivas y de transporte cotidiano de la sociedad, tanto en países desarrollados y en desarrollo, lo que contribuiría positivamente, en mitigar las consecuencias del cambio climático y favorecer el cuidado de la capa de ozono. El principal objetivo de este trabajo, es ofrecer una panorámica de las principales características del cultivo de variedades de caña energética cubana (CEC) y sus posibles bondades y potencialidades, en la producción de etanol celulósico.

MATERIALES Y MÉTODOS

Fueron comparados diferentes materiales lignocelulósicos, de diferentes cultivos, restos vegetales de cosechas, bagazo tradicional de caña de azúcar y las fibras de caña energética. Se caracterizó la composición de fibras de las variedades energéticas, C90-176 y C90-178 según Campo Zabala, *et al* (1), así como su potencial para la producción de etanol celulósico, sobre la base de las producciones actuales y perspectivas, con tecnologías desarrolladas y en desarrollo, con énfasis en EE UU y Brasil.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las variedades de caña energética potencialmente pueden producir entre 200 y 300 t.ha⁻¹.año⁻¹ de biomasa, incluso en suelos de baja a mediana fertilidad, pueden llegar a producir alrededor de 100 t. Producen más del doble de rendimiento en biomasa y materia seca (MS) que las variedades de caña azucarera, y más de cinco veces MS t.ha⁻¹.año⁻¹, que los bosques de Eucaliptus y árboles similares. Se distingue la CEC por amplio y profundo sistema radical, que aporta materia orgánica al suelo, por mantener su cultivo en varios retoños sucesivos; además presenta resistencia a las principales enfermedades de la caña de azúcar. Resiste la sequía y efectos de salinidad, por lo que este cultivo puede desarrollarse aun en condiciones del cambio climático. La sustitución de combustibles fósiles en la producción de energía, así como el uso de la CEC en otras producciones, a partir de la celulosa, las convierte en un sumidero de CO₂ que protege, además, los bosques. Específicamente, en la producción de etanol celulósico, puede brindar una gran solución, tanto por la abundancia y calidad de sus fibras, como en la uniformidad y limpieza de la materia prima inicial del proceso de obtención en todas sus fases, en contraposición con diferentes cultivos energéticos de bajo rendimiento y los restos de cosechas vegetales que ofrecen una materia prima inicial muy heterogénea, desde punto de vista físico. Inclusive el bagazo de variedades tradicionales o azucareras, que procede de diferentes variedades comerciales y de diferentes ingenios; además, de ser un residuo del proceso fabril, así como sus grandes volúmenes, dificultan en gran medida su utilización y almacenamiento, lo que conspira con el costo del producto final; además de la consabida disputa que posee el bagazo tradicional para la producción de energía, ya sea para el proceso fabril azucarero, como para su empleo en las actuales bioeléctricas desarrolladas para estos fines. Sin lugar a dudas, el bagazo tradicional es una de las materias primas más estudiadas y, por su abundancia y composición química, es una de las materias primas de mayor uso en la obtención de alcohol celulósico; pero, a pesar de ello, todavía las tecnologías actuales no son rentables en este sentido. Brasil y EE UU marchan a la cabeza en el proceso de fermentación, con grandes avances en el desarrollo de enzimas con alto rendimiento en dicho proceso. El bagazo de caña energética tiene similar composición química que el bagazo tradicional, como se demuestra en la tabla 1 (2), pero lo supera como materia prima por su homogeneidad, pureza y limpieza y facilita la selección y uso de complejos enzimáticos de mayor rendimiento fermentativo o la adaptación y uso de los ya existentes. La caña

energética es una materia prima de mayor estabilidad, además de la ventaja en su almacenamiento, ya que esta, por sus características agrobotánicas, se almacena en el propio campo, se cosecha y lleva a la fábrica en el momento de su uso, en las cantidades y condiciones que ella requiera. Esta característica puede tener un componente económico muy provechoso para rebajar los costos de producción del etanol. Se refleja, además, (tabla 1) la flexibilidad de la caña energética en su edad y época de cosecha ya que, a partir de los 9 y hasta los 18 meses o más, presenta una composición química estable, tanto en el uso individual de las dos variedades estudiadas, como en el uso del bagazo mezclado de ambas, según Triana, *et al* (2). Resultados similares obtuvo Campo Zabala (3), con relación a la composición química del bagazo de caña energética en Cuba, y Arturo Arev (4) en Perú, en el bagazo tradicional. Otra gran ventaja de CEC es que en condiciones propicias de cultivo puede cosecharse a los 9 meses, con un buen rendimiento de biomasa y con más del 70 % de fibras celulósicas, lo que a tan temprana edad puede contribuir a una mejor separación de la lignina y; además, facilitar, por el estado juvenil de tallos y follajes, los procesos de hidrólisis y fermentación de los elementos celulósicos, que los haría económicamente competitivos.

Tabla 1. Caracterización química de variedades energéticas

Variedad	Celulosa (%)	Hemicelulosas (%)	Lignina (%)	Cenizas (%)
C90-176 (9, 14 y 18 meses)	45 ± 2	28 ± 3	22 ± 2	1 ± 0.3
C90-178 (9, 14 y 18 meses)	46 ± 2	28 ± 3	22 ± 2	1 ± 0.3
Bagazo caña energética (*)	46 ± 2	26 ± 3	23 ± 2	1 ± 0.3
Bagazo caña azucarera	46 ± 2	27 ± 3	23 ± 2	1 ± 0.3

(*) Variedades C90-176 y C90-178, 14 meses de edad.

Según Triana *et al*, (2).

Se estima que el uso de azúcar, bagazo y miel produce un promedio de 130 litros de etanol por tonelada de caña procesada, según Abril y Navarro (5). La caña de azúcar es, con mucho, la mejor materia prima para la obtención de etanol de primera generación. Esto es debido a que produce azúcar en lugar de almidón (tales como maíz, mandioca, etc.) y celulosa (etanol celulósico). De hecho, varios estudios apuntan al bagazo de caña como la mejor materia prima para el etanol de segunda generación. Se espera que una hectárea de caña de azúcar puede saltar de la producción de 7 000 litros de etanol, a una cifra 30 000, si el bagazo también se utiliza para obtener etanol de segunda generación, de acuerdo con Romero (6), en Wall Street Journal. En lo que se refiere a la productividad de etanol celulósico, es posible observar tres niveles de producción: a corto plazo, alrededor de 240 litros por tonelada de material lignocelulósico seco; 300 litros para el medio; y cerca de 350 a largo plazo. Estos valores reflejan avances tecnológicos, como el aumento de rendimiento en las etapas de conversión y mayor recuperación de los productos en las etapas de separación sólido-líquido, (7 y 8). Al tomar el maíz con rendimiento alto de 10 t.ha⁻¹ con dos cosechas anuales en la misma área, con rendimiento promedio de 370 litros de etanol por t de granos, estaríamos frente a un rendimiento por ha-año de 7 400 litros, mientras que de efectuar tres cosechas al año se pudieran obtener poco más de 11 000, que equivale a un cultivo altamente intensivo. El uso de CEC para la producción de etanol en suelos de mediana fertilidad, con un rendimiento de 100 t de caña integral, proporcionaría alrededor 10 000 L.ha⁻¹.año⁻¹, con los rendimientos de etanol a producir a mediano plazo por Brasil, a partir del bagazo de caña de azucarera. Al llevarse la CEC a suelos similares y cultivo intensivo, donde se produce maíz, estos rendimientos se triplicarían.

CONCLUSIONES

La CEC presenta una alta producción de biomasa (25 al 30 % de fibras), con potencialidades de más de 300 t.ha⁻¹.año⁻¹; su cultivo es altamente sostenible, puede adaptarse a suelos de baja y mediana fertilidad y a condiciones adversas, como sequía y salinidad, características que proyectan su desarrollo ante las variaciones del cambio climático.

Por la similitud estructural de las fibras, así como la composición química del bagazo de caña energética con el bagazo de caña azucarera, su uniformidad, limpieza y estabilidad, puede convertirse, a mediano y largo plazos, en una de las mejores materias primas para la producción de etanol celulósico.

Sus potencialidades superan, en la producción de etanol, a cultivos de granos como el maíz, bosques técnicos y bagazo de caña azucarera, que se dedican actualmente para este objetivo, a mediano y largo plazos.

La CEC elimina el dilema de la producción de etanol y los alimentos al tener mayor rendimiento que los cultivos de granos en condiciones de suelos de baja y media fertilidad, además de triplicar el rendimiento en suelos similares y cultivo intensivo donde se produce el maíz.

Rompe el mito de que el maíz es de mayor utilidad que la caña de azúcar, en la producción de etanol, por tener el primero mejor facilidad de almacenamiento y disposición de uso, ya que el maíz solo está disponible en época de cosecha, mientras que la CEC se almacena en el propio campo donde crece, sin deterioro de su biomasa y puede cosecharse en cualquier época del año que la industria alcoholera lo requiera.

La CEC puede contribuir a mantener los precios y disponibilidad de etanol en el mercado, al no estar sujeta a las variaciones de los precios del azúcar y aumentar este los jugos de la caña azucarera son derivados a la producción del edulcorante.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Campo Zabala, R.R, Mayra Guerra, F. Cuadras, Norma Hervís y J. Freeman (1998). "Variedades energéticas de caña de azúcar: una solución del presente y el futuro". Cuba & Caña, No. 1, enero-abril, 10-13 pp.
2. Triana, Omar, Alejandro Abril, Alfred Wong (2008). Energy varieties of sugar cane as a novel source of fibre for the cellulose and paper industry. *Appita Journal* 61(5):402-407.
3. Campo Zabala, R.R. (2000). Informe INICA al MINAZ sobre desarrollo y perspectivas de la Caña Energética en Cuba.
4. Arturo Arev. Bagazo de Caña (2012): <https://es.slideshare.net/arturoarev/bagazo-de-caa>.
5. Abril, Alejandro Julio y Navarro, Enrique A. Etanol a partir de biomasa lignocelulósica. España: Aleta Ediciones, 2012, 101 pp. ISBN: 978-84-15225-50-8.
6. Romero, P. (2016) 1ra. y 2da. Generación de Etanol, Noticias: (2016): <http://www.alkol.es/category/noticias/>.
7. EFE (2018): <https://www.efe.com/efe/america/economia/brasil-ve-el-etanol-de-maiz-como-una-alternativa-para-aprovechar-super-produccion/20000011-3513734>. EFE, Sao Paulo 4 feb. 2018.
8. Vedana, Julio Cesar (2019). Etanol e gasolina ganharão um novo concorrente no mercado, a energia elétrica: <https://www.novacana.com/>, 02 abr. 2019.

El valor indicador en la determinación de los tipos de materiales colorantes presentes en el azúcar crudo

Raúl Cruz-Millán

Laboratorio de la Unidad Empresarial Básica (UEB), de Cienfuegos, Empresa de Ingeniería y Servicios Técnicos Azucareros (TECNOAZUCAR).

raul.cruz@taf.azcuba.cu

RESUMEN

La producción de azúcar, dentro de los valores convenidos, es una necesidad de la economía cubana. Condiciones diversas se ven involucradas en la formación del color. En el presente trabajo, con el empleo del método del Valor Indicador, se identifican los tipos de materiales colorantes en el azúcar exportado por la terminal marítima de Cienfuegos, durante las zafas del 2016 al 2018. Los resultados muestran los compuestos fenólicos y los productos de degradación alcalina de las hexosas (HADP), como los tipos de materiales que prevalecen en el color. Se demuestra la factibilidad de aplicar el método del Valor Indicador en los laboratorios azucareros del país.

Palabras clave: color, valor indicador, materiales colorantes.

ABSTRACT

The production of sugar within the agreed values is a necessity of the Cuban economy. Different conditions are involved in the formation of color. In the present work, with the use of the Indicator Value method, the types of coloring materials were identified in the sugar exported by the port terminal of Cienfuegos during the harvests of 2016 to 2018. The results show the phenolic compounds and the products of alkaline degradation of hexoses as the types of materials that prevail in color. The feasibility of applying the Indicator Value method in the sugar laboratories of the country is demonstrated.

Key words: color, indicator value, coloring materials.

INTRODUCCIÓN

Desde los inicios de la producción azucarera, el color es un parámetro de significación para definir la calidad de los azúcares. La necesidad de un producto que cumpla los requisitos contratados conduce a investigadores y productores a trabajar en la búsqueda de este objetivo.

Se reconoce que el color en el azúcar de caña consiste en una compleja mezcla de componentes, cuenta con dos fuentes principales en su origen; los colorantes derivados de la caña y los formados durante el proceso de fabricación. Las principales clases de colorantes son los pigmentos vegetales, los productos de degradación alcalina de azúcares reductores, los caramelos y las melanoidinas (1). Además de estas cuatro clases de colorantes, compuestos no coloreados conocidos como precursores de color pueden desarrollar o reaccionar para formar color. Dentro de ellos están los azúcares reductores, aminoácidos y otros compuestos que contienen nitrógeno, ácidos fenólicos, cationes como hierro, calcio y magnesio y aniones, tales como hidroxilo (2).

Carpenter (3) plantea que resulta difícil conocer la formación y naturaleza de los productos coloreados y afirmó: una vez que se identifican algunos colorantes, el siguiente paso es diseñar proce-

dimientos analíticos simples y prácticos para que los compuestos puedan ser vigilados (3). En este sentido, Clarke, *et al.* (2) reportaron que la intensidad del color en el azúcar es función del pH, y como sus cambios no son lineales, la sensibilidad de cada componente, así como su participación en los compuestos coloreados pueden ser utilizados para estimar la contribución de las diferentes clases de compuestos en el color del azúcar (2). Esta respuesta de los materiales colorantes a los cambios de pH es denominada Valor Indicador (VI), para lo cual asignó una escala de valor del 1 al 14.

El productor de azúcar en Cuba enfrenta el reto de conciliar una industria químicamente compleja, con factores como las variedades de caña, condiciones climáticas, transportación de la materia prima y operaciones propias de la fábrica. La calidad de los azúcares en la última década registra un probado avance; sin embargo, el color reporta incumplimientos en un número de lotes destinados a la exportación. Por tanto, se impone garantizar producciones que honren los requisitos pactados y evitar penalizaciones que lastren la economía.

El presente trabajo se propone identificar, a través del método del Valor Indicador, los tipos de materiales colorantes que prevalecen en el azúcar recepcionada en el puerto de Cienfuegos, con destino a la exportación. Los resultados de esta determinación contribuyen a que los fabricantes realicen una adecuada gestión del color.

MATERIALES Y MÉTODOS

Las muestras para la investigación se tomaron de lotes de azúcar crudo a granel, destinadas a la exportación, por la terminal marítima donde se desarrolló el estudio, procedentes de centrales azucareros ubicados en las provincias de Villa Clara, Santi Spíritus y Cienfuegos, durante las zafras comprendidas entre 2016 y el 2018. Estas muestras se analizaron en el laboratorio de la Unidad Empresarial Básica (UEB) TECNOAZUCAR, en el puerto de Cienfuegos, centro de ensayos con un sistema de gestión de la calidad acreditado de acuerdo con la NC/ISO 17025:2006

El término *Valor Indicador* se aplica para una razón de color ICUMSA a pH 9.0 y pH 4.0, obtenido como se muestra en la (Ec.1), a partir de las mediciones de absorbancias de soluciones de azúcar, a una concentración de 5 °Brix, a una longitud de onda de 420 nm. La muestra es preparada según lo establecido en el método ICUMSA GS1/3-7 (2011) (4).

$$\text{ValorIndicador (VI)} = \frac{\text{Color a pH 9}}{\text{Color a pH 4}} \quad (\text{Ec.1})$$

Para la interpretación de los resultados obtenidos del VI, se utilizó la relación VI y tipo de material colorante, formulada por Rein (5), a partir de los elementos establecidos por Clarke (tabla 1).

Tabla 1. Valor indicador y tipo de material colorante predominante en el azúcar

Tipo de colorante	VI	Masa molecular
Melanina	Bajo	Muy elevado
Melanoidinas	1.0-1.2	Polimérico
Caramelos	1.2-2	Polimérico
HADP (productos de la degradación alcalina de las hexosas)	1.5-3	Intermedio
Compuestos fenólicos extraídos de la caña. Complejos de fenoles con hierro	5-14	Monomérico

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se analizan 20 muestras, de 10 centrales azucareros. A cada una se les determinó el Color ICUMSA GS1/3-7 y el valor indicador, resultados que se presentan en la tabla 2. Considerando que en el intervalo de VI de 3 a 5 no revela un solo tipo de material colorante, de acuerdo con lo indicado en la tabla 1, para los objetivos de este trabajo se define que el valor 4 marca la división en este rango.

Con el propósito de facilitar la información en la tabla 2 se identifican; con la letra A los compuestos fenólicos extraídos de la caña y complejos de fenoles con hierro y, con la letra B, los productos de la degradación alcalina de las hexosas (HADP).

Tabla 2. Valor Indicador, masa molecular y tipo de material colorante predominante en las muestras de azúcar crudo estudiadas

Muestra	Color ICUMSA	VI	Masa molecular	Tipo de colorante*
1	1490	2.91	Intermedio	B
2	1710	4.11	Monomérico	A
3	1660	5.36	Monomérico	A
4	1840	4.91	Monomérico	A
5	1860	2.66	Intermedio	B
6	1910	4.21	Monomérico	A
7	2060	2.96	Intermedio	B
8	1100	2.11	Intermedio	B
9	1742	4.07	Monomérico	A
10	1836	4.3	Monomérico	A
11	1535	4.1	Monomérico	A
12	1570	2.81	Intermedio	B
13	1680	5.37	Monomérico	A
14	1570	2.11	Intermedio	B
15	1070	4.73	Monomérico	A
16	1560	2.6	Intermedio	B
17	1466	4.8	Monomérico	A
18	1596	4.23	Monomérico	A
19	1143	4.49	Monomérico	A
20	1594	4.56	Monomérico	A

*Tipo de colorante A: compuestos fenólicos extraídos de la caña y complejos de fenoles con hierro.
Tipo de colorante B: productos de la degradación alcalina de las hexosas (HADP).

De las pruebas realizadas, 13 muestras indican que los materiales del color tienen origen en los compuestos fenólicos, al presentar VI superior a 4. El tipo de material colorante con fuente en los productos de degradación alcalina de las hexosas se presenta en 7 de las muestras investigadas. De acuerdo con estos resultados, el análisis de la información obtenida debe estar dirigida a los materiales que generan color, por la acción de los HADP y por los compuestos fenólicos extraídos de la caña y complejos de fenoles con hierro.

Los resultados arrojan VI intermedios, que presentan tipos de colorantes HADP, formados en la etapa de fabricación. Los productores con este problema deben revisar el control en los valores de pH en la clarificación de los jugos. De acuerdo con lo afirmado por Carpenter (3), los principales

productos de degradación alcalina de las hexosas son compuestos poliméricos de color marrón de naturaleza ácida, que conducen a la inversión de la sacarosa y formación de color adicional, reacciones que son catalizadas por los iones de calcio e hierro (3).

El material colorante del tipo de los fenólicos indica que en estos azúcares el color tiene un fuerte componente en los elementos que provienen de la materia prima. Los productores deben tener en cuenta que la entrada de hojas, cogollo y paja repercuten directamente en la incorporación de estos materiales, que en algunos casos no poseen color pero, al reaccionar, son capaces de desarrollar complejos coloreados. Los materiales de origen fenólicos tienen un carácter altamente soluble, que los hace muy difíciles de eliminar en el proceso. Los fenoles pueden oxidarse a compuestos de color oscuro mediante oxidación enzimática y no enzimática, que contribuyen al color del azúcar crudo.

El deterioro de parte de la industria y la presencia de compuestos fenólicos alertan sobre la reacción de los ácidos fenólicos, con los iones de hierro soluble en el proceso de fabricación, dando origen a productos de alto color. Esta reacción puede ocurrir siempre que las soluciones de azúcar estén en contacto con el hierro, particularmente, durante la fase de molienda. Complejos de hierro con catecoles son responsables de los tonos verdosos de algunos azúcares marrones que contienen hierro (6).

Los materiales colorantes predominantes de bajo e intermedio peso molecular no presentan correlación con el color ICUMSA reportado.

CONCLUSIONES

1. La aplicación del VI permite conocer que los tipos de materiales colorantes predominantes en el azúcar crudo recepcionado, con destino a la exportación, en el puerto de Cienfuegos, durante las zafas del 2016 al 2018, corresponden a materiales provenientes de los compuestos fenólicos extraídos de la caña, y de los que se originan de los productos de la degradación alcalina de las hexosas.
2. Se demuestra que el VI es un método sencillo y rápido, con requerimientos para su ejecución, existentes en los laboratorios de los centrales azucareros y terminales portuarias, del que se obtiene una valiosa información para implementar una gestión del color, en el proceso de fabricación de azúcar.
3. Dado lo cambiante que se presentan las fuentes que dan origen al color, se requiere una periodicidad en la determinación del VI, que permita el seguimiento a los materiales colorantes.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Smith, P. and Gregory, P. E. Analytical Techniques For Colour Studies. C.S.R. Manufacturing-Processing. Research Laboratories, Roseville, N.S.W., Australia, 1971. Pag 1415. <http://www.issct.org/pdf/proceedings/1971/1971%20Smith.Analytical%20techniques%20for%20colour%20studies.pdf> (11/08/2018).
2. Clarke, M. A., Blanco, R. S. and Godshall, M. Colorant In Raw Sugars. Processing. Sugar Processing Research Inc., P.O. Box 19687, New Orleans, LA 70179 USA, 1986. pp 671-672 <http://www.issct.org/pdf/proceedings/1986/1986%20Clarke%20Colorant%20in%20Raw%20Sugars.pdf> (19/09/2018).
3. Carpenter, F. G., Clarke, M. and J, Earl. Constituents In Raw Sugar That Influence Refining. Manufacturing – Processing. Cane Sugar Refining Research Project, Southern Regional Research Center, New Orleans, Louisiana, 1974.

4. Método ICUMSA GS1/3-7 (2011), "Libro de métodos" International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis, Berlin, 2013.
5. Peter Rein, Ingeniería de la Caña de Azúcar. Berlín: Bartens, 2012, en: Evaluación Sobre el Desarrollo del Color en el Almacenamiento de Azúcar Alfaro Herrera, Oscar Fernando. Departamento de Ingeniería de Procesos y Ciencias Ambientales, Universidad Centroamericana José Simeón Cañas, El Salvador <https://www.researchgate.net/publication/277306658> (17/09/18)
6. The origin of colour raw sugar By Nancy Paton CSR Limited, Central Laboratory, Proceedings Of Australian Society Of Sugar Cane Tecchnologists 1992, pag 9

Inventario nacional de contaminantes de la calidad del aire que proceden de la quema de bagazo

Anel Hernández-Garces^{1*}, Jessica Trujillo¹, Mirtha Reinosa², Janet Canciano² y Francisco Hernández³

1. Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (CUJAE).

Calle 114 No. 11901. e/ Ciclovía y Rotonda, Marianao, La Habana, Cuba.

* anel@quimica.cujae.edu.cu

2. Centro de Ingeniería e Investigaciones Químicas. Vía Blanca s/n, entre Infanta y Palatino, Cerro, La Habana, Cuba.

3. Azcuba. Calle 23 No.171, entre N y O, La Habana, Cuba.

RESUMEN

La base de toda evaluación de la calidad del aire parte de la elaboración del inventario del contaminante criterio. En Cuba, la industria azucarera quema bagazo para producir vapor de proceso y electricidad con la posterior emisión de contaminantes a la atmósfera. Con el fin de diversificar la matriz energética, la Política de Desarrollo Perspectivo de las Fuentes Renovables y el Uso Eficiente de la Energía en Cuba, en junio de 2014 estableció, entre otros propósitos, la instalación de 755 MW en bioeléctricas, que presupone un incremento de las emisiones. Este trabajo se propone como objetivo elaborar el inventario de contaminantes de la calidad del aire (SO_2 , NO_x y MP) emitidos por las calderas de 57 centrales azucareros cubanos, a través de la estimación, mediante factores de emisión, como precedente para la evaluación futura del impacto medioambiental a través de la modelación.

Palabras clave: emisiones, contaminantes atmosféricos, generador de vapor, central azucarero, inventario.

ABSTRACT

The basis of any evaluation of air quality is based on the preparation of the inventory of criteria pollutants. In Cuba, the sugar industry burns bagasse to produce process steam and electricity with the subsequent emission of pollutants into the atmosphere. In order to diversify the energy matrix, the Policy for the Perspective Development of Renewable Sources and the Efficient Use of Energy in Cuba in June 2014 established, among other purposes, the installation of 755 MW in bioelectric plants, which presupposes an increase in emissions. This work proposes the elaboration of the inventory of pollutants of air quality (SO_2 , NO_x and MP) emitted by the boilers of 57 Cuban sugar mills through the estimation by emission factors as precedent for the future evaluation of the impact environmental through modeling.

Key words: emissions, air pollutants, steam boiler, sugar mill, inventory.

INTRODUCCIÓN

La contaminación del aire constituye uno de los problemas ambientales más críticos del mundo, debido a la quema indiscriminada de hidrocarburos para la producción de energía. Esto revela la necesidad de ahondar en el conocimiento del impacto ambiental que provocan los contaminantes, su prevención y control, así como en el establecimiento de medidas que favorezcan la reducción de los niveles de contaminación en aras del desarrollo sostenible.

El uso de energías renovables pudiera ser una opción para reducir las emisiones de gases contaminantes. La agroindustria cañera puede y debe ayudar a afrontar tres importantes desafíos que

hoy enfrenta la humanidad: la producción de alimentos, el déficit energético y la preservación del medio ambiente.

La cogeneración de energía eléctrica, a partir de la quema del bagazo, se encuentra entre una de las ventajas más importantes que posee la agroindustria de la caña de azúcar, ante la crisis energética y la necesidad de cambiar la matriz energética cubana.

No obstante, la quema de biomasa cañera no exonera a las bioeléctricas de producir gases contaminantes. Siempre está presente la posibilidad y, depende, entre otros, de la existencia de sistemas de tratamiento, del estado técnico de las calderas y de la composición de la biomasa.

Este trabajo se propone como objetivo estimar, mediante factores de emisión, los contaminantes atmosféricos (SO_2 , NO_x y MP) emitidos por las calderas de 57 centrales azucareros cubanos, como precedente para la evaluación futura del impacto de las emisiones de las bioeléctricas sobre la calidad del aire.

MATERIALES Y MÉTODOS

Incluirá los principales materiales, procedimientos y métodos, empleados en el trabajo. Los métodos que ya hayan sido publicados deben ser acompañados de una referencia.

Fueron estudiados los generadores de vapor de 57 centrales, a lo largo de trece provincias. Todos los datos empleados en el estudio se corresponden con la zafra 2016-2017.

Se estimaron los contaminantes atmosféricos, a partir de la ecuación recomendada por la Agencia de Protección de Medio Ambiente de Estados Unidos, EPA, (1) y se utilizaron los factores de emisión publicados por esta agencia en la serie AP 42, para fuentes puntuales o estacionarias (2).

$$E = A \cdot f \cdot \left[1 - \frac{\epsilon}{100} \right]$$

donde:

E es la emisión (g/s).

A es el consumo de combustible (kg/s).

f es el factor de emisión no controlada (g/kg).

ϵ es la eficiencia de reducción de emisiones (%), cuando se utiliza tecnología de reducción.

Como no existe tecnología de reducción de emisiones, entonces $\epsilon=0$.

La Environmental Protection Agency (EPA) (1) ignora al SO_2 , no obstante se incluye en el presente trabajo, debido a la importancia de este contaminante criterio. Con este fin se considera, entonces, el factor de emisión reportado por el Inventario Nacional de Contaminantes, NPI (3) para el SO_2 .

Tabla 1. Factores de emisión, según National Pollutant Inventory (NPI)

Sustancia	Factor de emisión (g/kg bagazo)
MP	7.8
NO_x	0.6

Tabla 2. Factores de emisión incluidos en este trabajo

Sustancia	Factor de emisión (g/kg bagazo)
SO_2	0.25

A partir de la norma potencial de caña de cada central y considerando que estos producen un 27 % de bagazo, se estimó la cantidad de bagazo empleado como combustible. Luego, se sustrajo un 8 %, cantidad almacenada en la casa de bagazo para un arranque ulterior de la caldera.

Se promedió la temperatura de salida de los gases de combustión, ya que hay centrales que cuentan con más de una caldera, y emiten a través de una misma chimenea.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados demuestran que el principal contaminante emitido es el Material Particulado, MP. Como era de esperar el SO_2 emitido no es significativo si se compara con las emisiones procedentes de la quema de hidrocarburos. La distribución por provincias reporta una clara mayoría en el aporte de la región central, debido a que posee la mayor cantidad de centrales (figura 1).

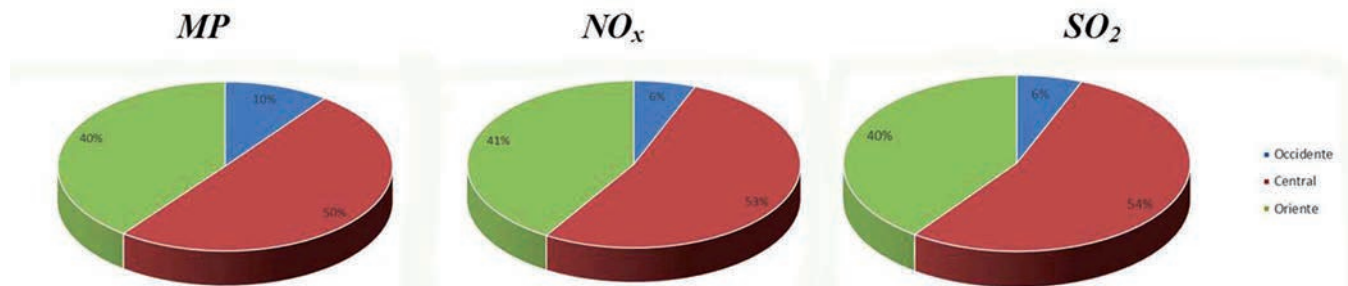


Figura 1. Distribución por regiones de emisiones (t/año).

Según la comparación normativa, todas las chimeneas sobrepasan los límites para el MP y los NO_x (figura 2 y 3). Lógicamente, el mayor aporte es del MP, causado por el empleo de bagazo como combustible. Por otra parte, ninguna de las emisiones de SO_2 supera la EMA establecida en la norma cubana NC/TS 803: 2010, debido al bajo contenido de azufre en el bagazo quemado. Se deben validar estas estimaciones, determinando el valor real de las emisiones con analizadores de gases de combustión.

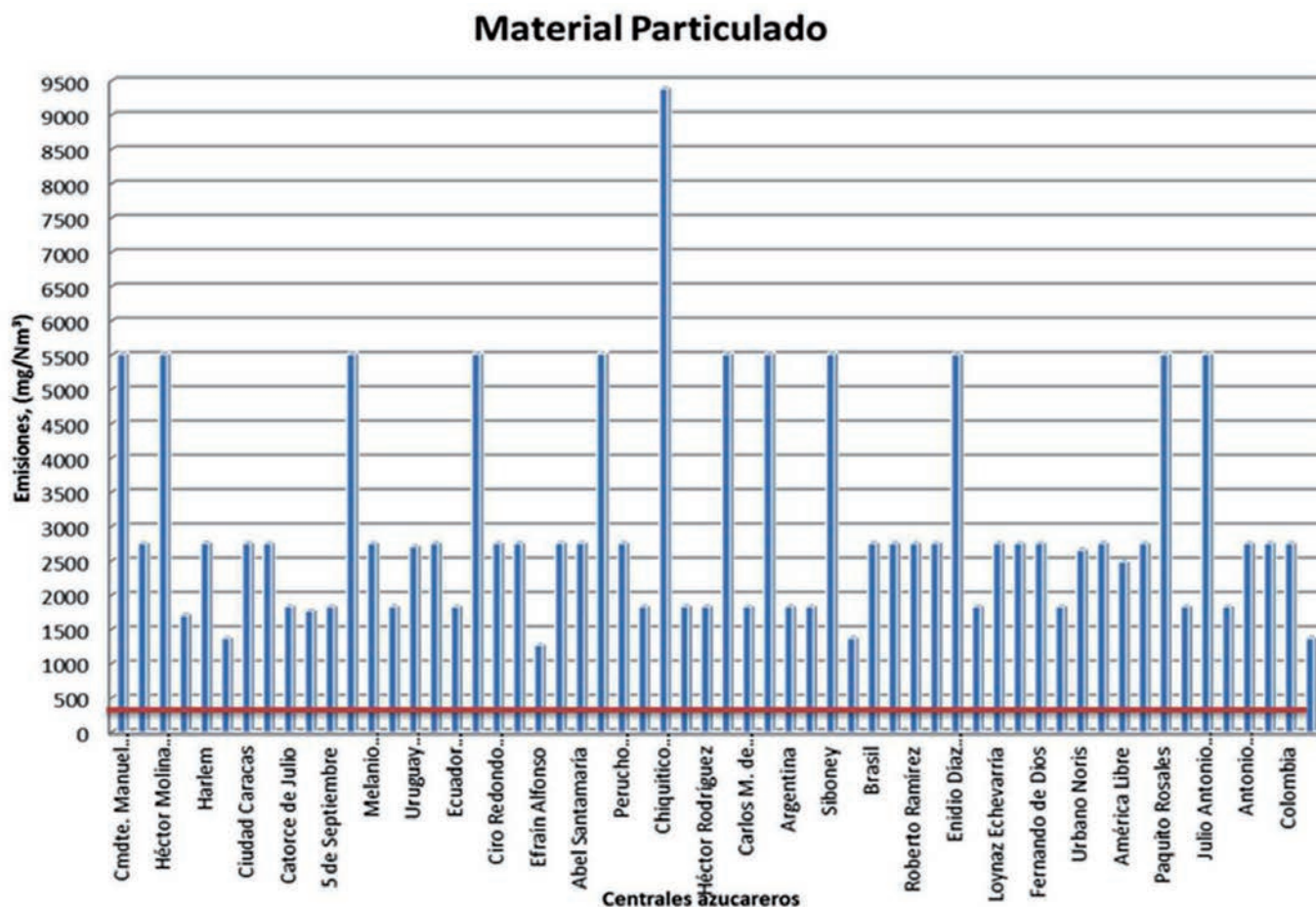


Figura 2. Comparación normativa del MP.

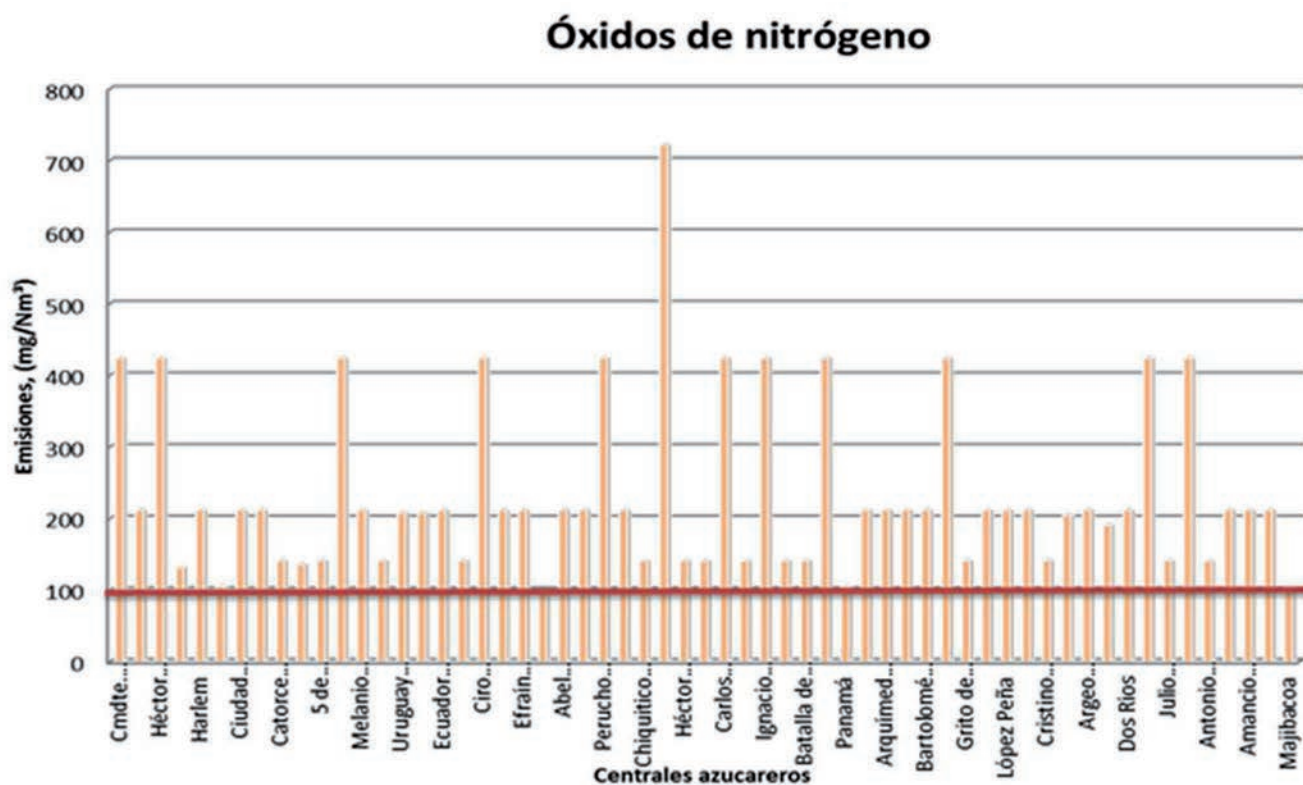


Figura 3. Comparación normativa del NO_x .

CONCLUSIONES

Se evaluaron los contaminantes atmosféricos procedentes de los generadores de vapor de 57 centrales azucareros del país y, como resultado, se obtuvieron valores de emisión de varios órdenes, mayores que los de los generadores de vapor convencionales, que emplean hidrocarburos como combustible, pero inferiores a los de termoeléctricas y grupos electrógenos.

La comparación de las emisiones con las EMA de la NC/TS 803: 2010, para la categoría de fuentes existentes, demostró que para el MP de todas las chimeneas se superan los valores fijados. Para los NO_x se supo que, en algunos casos, se supera y en otros no. No obstante, para el SO_2 ninguna de las emisiones sobrepasa el máximo legal.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Environmental Protection Agency (EPA). "Emissions Factors & AP-42". Compilation of Air Pollutant Emission Factors, 1998.
2. Environmental Protection Agency (EPA). "Emission factor documentation for AP-42, section 1.8 Bagasse combustion in sugar mills". 1993.
3. National Pollutant Inventory (NPI). "Emission estimation technique manual for Combustion in boilers". Version 3.6, 2001.

Reducción de la carga contaminante de la vinaza por producción de proteína unicelular

Patricia M. Albarracín^{1,2*}, María F. Lencina¹, Ada J. Robinson¹, Samanta Rearte¹ y M.M. Elsa Ferreyra¹

1. DIPGI, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología (FACET), Universidad Nacional de Tucumán (UNT), Avenida Independencia 1800, 4000 S.M. de Tucumán, Argentina.

2. CEDIA Facultad Regional de Tucumán Universidad Tecnológica Nacional.

* palbarracin@herrera.unt.edu.ar

RESUMEN

Para realizar esta investigación, se estudió el uso de la vinaza como medio líquido para la producción de proteína mediante técnicas biotecnológicas. Se trabajó con una cepa de *Candida utilis* y concentraciones acuosas de vinaza desde 10 a 50 %, sin agregado de nutrientes en un reactor en lote. Se monitoreó el crecimiento del microorganismo con un sensor de CO₂. Los parámetros medidos al inicio y final de cada ensayo fueron: nitrógeno total, DQO, pH, conductividad y cada dos horas se midió la DO (densidad óptica). Por ANOVA, con un nivel de significancia del 1 %, se evaluaron los factores repetición, tratamiento y reactor de cada parámetro. Los mejores resultados obtenidos fueron para las soluciones acuosas de 50 %: enriquecimiento proteico del 136 % en nitrógeno total y remoción promedio de DQO del 43 %. Se concluyó que el tratamiento de la vinaza con *Candida utilis* reduce su carga contaminante.

Palabras clave: proteína, vinaza, reducción de contaminación.

ABSTRACT

In this work, the use of vinasse as a liquid medium was studied for the production of protein by biotechnological techniques. *Candida utilis* in aqueous concentrations of vinasse (10 % to 50 %) was used, with no nutrients added. In a batch reactor the growth of the microorganism was monitored with a CO₂ sensor. The parameters measured at the start and end of each test were: total nitrogen, COD, pH and conductivity and, every two hours, the DO (optical density). By ANOVA, with a level of significance of 1 %, the repetition, treatment and reactor factors of each parameter were evaluated. The best results obtained were for the 50 % aqueous solutions: 136 % protein enrichment in total nitrogen and average COD removal of 43 %. It was concluded that the treatment of vinasse with *Candida utilis* reduces its polluting load.

Key words: proteins; vinasse; polluting load.

INTRODUCCIÓN

La perspectiva, a nivel mundial, es incrementar la producción de alcohol para su empleo como combustible automotor. En el año 2016, Argentina aumentó el corte de bioetanol en los combustibles al 12 %, que trajo como consecuencia un incremento del volumen de producción que llegó a 326 mil m³ de alcohol anual (1). Esta producción genera un residuo final líquido, llamado vinaza, altamente contaminante y en grandes volúmenes pues se producen entre 12 a 16 litros por cada litro de etanol. En este contexto Tucumán cuenta con 15 ingenios azucareros y 10 destilerías de alcohol, con el consecuente impacto ambiental que producen sus efluentes.

Las vinazas residuales contienen cerca del 70 % del potasio que se aporta a los suelos cañeros, como fertilizante químico. La fertirrigación, con estos efluentes, método comúnmente usado para biorremediación, puede producir salinización del suelo si no es aplicada de forma controlada.

Entre otras soluciones alternativas, consideramos usar vinaza como medio de cultivo para levaduras. Las levaduras tienen la habilidad de acumular, en altas concentraciones, iones presentes en el medio de cultivo. En particular, *Candida utilis*, cuando es cultivada con técnicas de fermentación en un medio compuesto por residuales de destilería, muestra una alta resistencia a las concentraciones de potasio.

Estudios realizados por Christen (2, 3) han mostrado la capacidad de la levadura *Cándida utilis* de crecer en diferentes soportes sólidos y líquidos.

También en sus estudios Díaz (4) ha demostrado que esta levadura puede desarrollarse en medio líquido formado por vinaza o en medio de vinaza y melaza, como lo indicó Serguera (5) y Doménech (6), que reportan el desarrollo de la levadura en vinaza enriquecida con amonio sulfato y amonio sulfato dibásico, a diferentes concentraciones. En estos casos se destaca, además de la obtención de proteína unicelular, la disminución de la carga contaminante de la vinaza.

Por ello, el objetivo de este trabajo es estudiar la propagación de la levadura *Candida utilis* en un reactor en lote, y usar como medio líquido soluciones acuosas de vinaza sin agregado de nutrientes, que permita captar y/o separar potasio de vinazas, por medio de las levaduras y reducir la carga contaminante del efluente.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los ensayos se llevaron a cabo en el laboratorio de Microbiología General e Industrial y en el laboratorio de Química Orgánica de FACET-UNT.

La vinaza fue suministrada por un ingenio azucarero de la localidad de la Banda del Río Salí, Tucumán, que utiliza la melaza como materia prima para la producción de etanol. La levadura utilizada en este trabajo es una cepa extraída del cepario de PROIMI CONICET. Los ensayos se llevaron a cabo en reactores y trabajaron en lote. Se realizaron 3 ensayos por duplicado en reactores de 250 ml, con diluciones acuosas de vinaza del 10 %, 25 % y 50 %.

Para cada ensayo, se prepararon los 3 medios de cultivos, se esterilizaron con autoclave de tipo chamberland a 1 atmósfera de sobrepresión y 121 °C durante 15 minutos. La cepa *Candida utilis*, previamente se activó en medio papa – Dextrosa durante 24 h a 34 °C antes de cada propagación a los reactores en lote. Se inoculó cada reactor con 10 mL de este cultivo.

El crecimiento se llevó a cabo con un agitador axial a 34 °C, por 24 h. No se realizó aireación externa, únicamente se utilizaron tapones biológicos, para permitir el flujo de gases en el reactor.

Se realizaron determinaciones analíticas al inicio y al final del tratamiento. Se midieron parámetros físico-químicos, para caracterizar los ensayos llevados a cabo en los reactores. Se determinó la variación del ión potasio por fotometría de llama, DQO (demanda química de oxígeno) por método colorimétrico y ART (azúcares reductores totales) método ICUMSA. Como parámetros de caracterización se midieron: pH con ph-metro Orion 420, conductividad con conductímetro Adwa AD32 y se realizó conteo en cámara de Neubauer para controlar la concentración de las levaduras. Los parámetros medidos se promediaron en Microsoft Excel 2013.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los datos obtenidos de los ensayos de fermentación se informan a continuación.

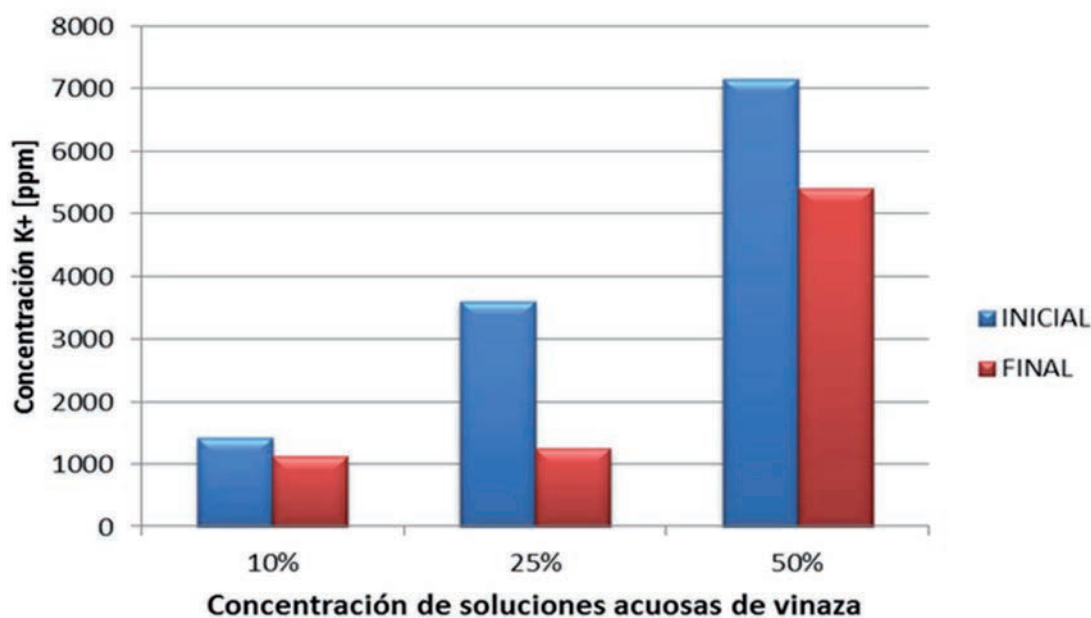
En la tabla 1, se observa que la cantidad de células por unidad de volumen aumenta con la concentración de vinaza; es decir, con la disponibilidad de nutrientes; esto habla muy bien del nivel de adaptación de *Candida utilis* a la naturaleza del efluente. No se observan aumentos en el orden de magnitud de la concentración de células, entre las soluciones acuosas de vinaza al 25 % y 50 %.

Tabla 1. Concentración celular promedio, a diferentes concentraciones de soluciones acuosas de vinaza

Concentración de soluciones acuosas de vinaza	[Cél./mL]
10 %	$3.6 \cdot 10^7$
25 %	$1.6 \cdot 10^8$
50 %	$1.9 \cdot 10^8$

En la figura 1 se observa la remoción promedio de iones potasio en las soluciones acuosas de vinaza de 25 % y 50 %. Los resultados de 2 000 ppm removidas con respecto a las soluciones sin tratamiento, son similares a los encontrados por Otero Rambla *et al.* (7). Estos iones son los que más abundan en la vinaza en Tucumán, según Amhed *et al.* (8). Se evidencia que la remoción de este ión depende de la concentración celular y no de la concentración de iones presentes en el medio. Esto coincide con que en las soluciones acuosas al 25 % y 50 %, la concentración celular que arrojó la cámara de Neubauer fue de la misma magnitud y la remoción de potasio fue la misma.

Es destacable que el tratamiento de soluciones acuosas de vinaza al 50 % con la cepa de *Candida utilis*, logró bajar la concentración de iones potasio a 5 400 ppm lo que facilitaría la disposición final del efluente como fertirriego y evitar que salinice los suelos donde es vertida.

**Figura 1.** Concentración de iones K⁺ al inicio y al final de cada ensayo de fermentación, en soluciones acuosas de vinaza 10 %, 25 % y 50 %.

El DQO (demanda química de oxígeno) es uno de los parámetros más relevantes en la vinaza y que la vuelven contaminante, refirió Serguera *et al.* (5). Se puede observar en la figura 2 que luego del tratamiento de los distintos medios con el microorganismo, se produce una importante disminución en el valor de este parámetro. Es decir, el tratamiento disminuye la carga contaminante de la vinaza en términos de DQO. La tendencia creciente en el porcentaje de remoción de carga contaminante, se corresponde con el aumento en el número de células por unidad de volumen a mayor concentración de vinaza en el medio que se observó anteriormente.

En cuanto a los azúcares reductores, se observó que la concentración de vinaza original era 0.5 mg/l. Luego de los ensayos hubo un aprovechamiento de estos por parte de los microorganismos para desarrollarse. Resultó un consumo de 82 %, 78 % y 64 % correspondientes a soluciones

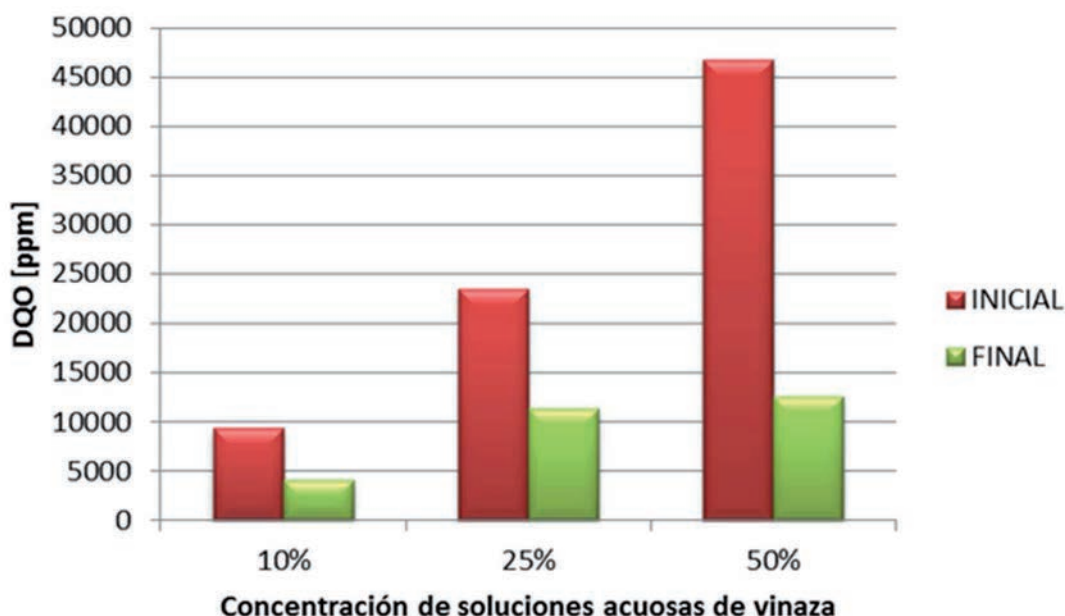


Figura 2. Concentración de DQO al inicio y final de cada ensayo de fermentación en soluciones acuosas de vinaza 10 %, 25 % y 50 %.

acuosas de vinaza de 10 %, 25 % y 50 % usadas, respectivamente, en cada ensayo. O sea, aun en el medio más concentrado de efluente, después del tratamiento, todavía posee disponibilidad de azúcares. Esto sugiere que la concentración de azúcares no es el nutriente limitante en el crecimiento de la levadura.

En cuanto al pH, el tratamiento no indicó cambios en la acidez propia del efluente que se mantuvo cercano a $\text{pH} = 4.8$.

La conductividad, usada para registrar la concentración de iones en las soluciones, disminuyó en promedio 8 %, comparativamente entre inicio y final de ensayos, en las diferentes concentraciones de soluciones de vinaza usadas como medio. Estos resultados obtenidos en conductividad concuerdan con el comportamiento observado en la remoción de potasio, pues como se mencionó el ion potasio es el más frecuente en las vinazas de las destilerías tucumanas.

CONCLUSIONES

La propagación de levadura ofrece un método de descontaminación de las vinazas de destilación del etanol y reduce al mismo tiempo, la carga orgánica de estas y parte de su fracción mineral, en especial el contenido de potasio. El efluente, solución acuosa de vinaza al 50 %, luego del tratamiento realizado posee un DQO de 12000 ppm (12 mg/mL) y se logró reducir la concentración de iones K a 5000 ppm, valores que facilitan su disposición final, ya que poseen un menor impacto ambiental que las vinazas no tratadas, para ser usadas como fertirrigación.

La concentración de azúcares reductores totales en el efluente no limita el crecimiento de la levadura *Candida utilis*, ya que luego del tratamiento realizado todavía hay azúcares disponibles en el medio de cultivo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Instituto de promoción del azúcar y alcohol de Tucumán (2019) <http://www.ipaat.gov.ar/wp-content/uploads/2020/04/TOTALES-HASTA-2DA-QUINCENA-FEBRERO-2020.pdf>
2. Christen, P.; Doménech, F.; Michelena, G.; Auria, R.; Revah, S. (2002). Biofiltration of volatile ethanol using sugar cane bagasse inoculated with *Candida utilis*. Journal of Hazardous Materials B89:253-265.
3. Christen, P.; Doménech, F.; Páca, J.; Revah, S. (1999). Evaluation of four *Candida utilis* strains for biomass, acetic acid and ethyl acetate production from ethanol. Bioresource Technology 68: 193-195.
4. Diaz, M.; Semprún, A.; Gualtieri, M. (2003). Producción de proteína unicelular a partir de desechos de vinaza. Revista de la Facultad de Farmacia vol 45: 23-26.
5. Serguera, M.; Rodríguez Y.; Gómez A.; Suárez, W. (2001). Estudio del efecto de la velocidad de agitación y del flujo de aire en el crecimiento de la levadura torula en la etapa de pre-fermentación. Tecnología Química 20: 63-69
6. Doménech, F. (2015). Enriquecimiento proteico de residuos lignocelulosicos para la alimentación animal a partir de efluentes azucareros- Optimización del crecimiento de la levadura forrajera *Candida utilis* empleando vinazas y etanol gaseoso emitido por las destilerías como nutrientes. Proyecto Perez Guerrero del fondo fiduciario para la cooperación Sur-Sur.
7. Otero-Rambla, M.; Almazán-del Olmo, O.; Bello-Gil, D.; Saura-Laria, G.; Martínez-Valdivieso-Piloto, J. (2012). Reducción de la concentración de ion potasio en las vinazas de destilación de alcohol por medio de la propagación de *Candida utilis*. ICIDCA sobre los Derivados de la Caña de Azúcar, 46 (2), 23-29.
8. Ahmed, P. M.; Pajot, H. F.; Coronel, M.; Juárez, G.; Castellanos, L. I.; Gusils, C. H. (2015). Estudio de las características composicionales de la vinaza de la caña de azúcar. X Simposio de Biotecnología RedBio Argentina.

Desarrollo y validación de un modelo en Aspen Hysys v10.0 para el proceso de fermentación alcohólica

Arletis Cruz-Llerena^{1,2*}, Osney Pérez-Ones², Lourdes Zumalacárregui-de Cárdenas²

y José Luis Pérez-de los Ríos²

1. Departamento de Alcohol, Levadura y Alimento Animal, Dirección de Derivados, Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (Icidca). Vía Banca 804 y Carretera Central. San Miguel del Padrón, La Habana, Cuba.

* arletis.cruz@icidca.azcuba.cu

2. Grupo de Análisis de Procesos, Facultad de Ingeniería Química, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (Cujae). Calle 114 No. 11901 e/ Ciclovía y Rotonda, Marianao, La Habana, Cuba.

RESUMEN

Se realiza la simulación del proceso de fermentación alcohólica de una ronera cubana con el simulador Aspen Hysys v10.0. Se seleccionó el paquete de propiedades NRTL para la estimación de las propiedades del equilibrio entre el agua y sustancias orgánicas a bajas presiones e IDEAL para la fase vapor. El modelo de simulación obtenido fue validado con los datos reales del proceso, con un error relativo menor al 2.5 %. Se realiza un caso de estudio para evaluar la influencia que tiene el flujo de miel alimentada a la destilería sobre algunas variables importantes del proceso. Se evalúa la sustitución de miel final por miel B como materia prima, obteniéndose una disminución en el consumo de miel de 100 kg/h y un aumento de 0.39 del grado alcohólico del vino.

Palabras clave: simulación, fermentación alcohólica, casos de estudio.

ABSTRACT

The simulation of the alcoholic fermentation process of a Cuban rum factory using Aspen Hysys v10.0 is presented in this paper. The NRTL property package was selected for the estimation of the equilibrium properties between water and organic substances at low pressures and IDEAL for the vapor phase. The simulation model obtained was validated with the actual process data with a relative error lesser than 2.5 %. A study case was done in order to evaluate the influence of the molasses flow fed to the distillery on some important variables of the process. The substitution of the raw material, final molasses, by molasses B was studied, showing a decrease in the consumption of molasses of 100 kg/h and an increase of 0.39 of the alcoholic degree of the wine.

Key words: simulation, alcoholic fermentation, study case.

INTRODUCCIÓN

La fermentación es un proceso complejo y de gran aplicabilidad. En el caso de la producción de etanol por vía fermentativa, a escala industrial, la optimización de esta etapa es crucial (1) para reducir el costo de operación.

La fermentación alcohólica es la transformación anaeróbica por la levadura de azúcares, principalmente hexosas como la glucosa y la fructosa, en etanol y dióxido de carbono, así como en la formación de los congéneres que influyen en la calidad de los productos finales (2, 3). Esta etapa se considera la más importante en el proceso de obtención de etanol, pues además de ser esta la

etapa de formación del alcohol, es también la que rige el consumo de materia prima, que equivale al 50-80 % de los costos de producción (2).

Por la naturaleza biológica de este proceso, inciden sobre su desarrollo una gran variedad de variables y parámetros operacionales (3), tanto no lineales como dinámicos; por tanto, su modelación resulta difícil y desafiante (1).

La simulación de procesos proporciona una visión de la conducta de un proceso real, lo que resulta beneficioso en sistemas complejos, con interacción de varias variables. La simulación se puede definir como el uso de un modelo matemático para generar la descripción del estado de un sistema (4). Una vez desarrollado y validado un modelo de simulación, se pueden evaluar diferentes condiciones sin afectar al sistema real (5). De ahí la importancia de su empleo en el estudio del proceso de fermentación alcohólica.

En el presente trabajo se desarrolla y valida un modelo de simulación del proceso de fermentación alcohólica, en una ronera cubana. Se desarrollan diferentes casos de estudio, para evaluar el comportamiento de las principales variables del proceso ante diferentes escenarios, resultados que pueden ser utilizados en investigaciones posteriores.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del proceso tecnológico

Fermentación alcohólica

La materia prima fundamental del proceso de fermentación alcohólica es la miel final de caña que resulta del agotamiento final de la sacarosa. Este producto es un líquido oscuro, denso y viscoso, que se separa de la masa cocida de baja calidad, y del cual no se le puede cristalizar más azúcar por métodos convencionales y económicos. Además de los azúcares no cristalizados, las mieles finales contienen compuestos orgánicos y sales inorgánicas.

La miel se descarga en una cisterna y, antes de ser almacenada en un tanque de 1 200 m³, pasa primero por un filtro grosero y luego por un filtro más fino de 5 mm de espesor, con el objetivo de eliminar impurezas presentes. Debido a que la viscosidad de este producto es elevada se tiene un alto gasto energético en su bombeo, que se puede reducir si se precalienta hasta 40 °C con vapor directo en la línea de succión de la bomba.

Después de precalentada la miel, a un flujo de 2.17 m³/h, pasa a un disolutor estático que posee facilidad de limpieza y desinfección. El disolutor trabaja con agua cruda y en él se logra una densidad uniforme. El °Brix de la miel diluida se controla con un densímetro y se mantiene entre 15-16 °Brix.

La miel diluida pasa a un tanque, con agitación de 2 m³ de capacidad, donde se le añade ácido nítrico para ajustar el pH del medio y evitar cualquier crecimiento microbiano que compita con la levadura. Este tanque alimenta por reboso a otro tanque de 6 m³, al cual está conectada la succión de la bomba P-05. Esta bomba mantiene un lazo cerrado de miel diluida en toda el área de fermentación.

La miel diluida con un pH de 5, pasa a un tanque cultivador, de una capacidad de 2 m³, con un sistema de aireación, agitación mecánica, adición de antiespumante, control de temperatura, nivel y presión.

En el tanque cultivador comienza la fermentación al adicionar el medio de cultivo que contiene los nutrientes (fuentes de nitrógeno, fósforo) y ácido que se utiliza para controlar el pH. La preparación de nutrientes se realiza en un tanque de 1 m³, equipado con agitador mecánico donde se disuelven las dos sales a utilizar: fosfato diamónico y sulfato de amonio.

Después de añadidos los nutrientes y ajustado el pH del medio, se procede a la esterilización, haciendo circular vapor a 0.05 MPa y 110 °C, durante una hora, por la chaqueta del tanque y se alcanza una temperatura máxima de 105 °C. Una vez esterilizada la carga del cultivador se procede a enfriarla con el agua de enfriamiento que circula por el serpentín ubicado en su interior, hasta alcanzar una temperatura entre 30 y 32 °C. Esta es la temperatura óptima para inocular la levadura.

A continuación, se le inocula el Carlsberg, de aproximadamente unos 12 L, que contiene levadura de una cepa del género *Saccharomyces cerevisiae*, después de pasar por un proceso de propagación en el laboratorio. De esta manera, comienza la propagación de la levadura a nivel industrial, mediante la aireación del medio de cultivo.

Se monitorea el cultivador hasta dar por terminada esta fase de propagación, cuando el Brix ha alcanzado el valor entre 6-7 °Brix y de haberse realizado una observación al microscopio para controlar parámetros como el conteo celular, gemación, viabilidad y la morfología de la célula. Este cultivo sirve de inóculo al prefermentador.

El prefermentador tiene una capacidad de 11 m³, cuenta con un sistema de enfriamiento interior, aireación y agitación mecánica. El tanque está abierto, lo que facilita su limpieza. El equipo se llena con un flujo continuo de 2 m³/h de miel diluida hasta alcanzar un volumen de 10.4 m³. Se le adicionan los nutrientes y el inóculo que proviene del cultivador. Así comienza el siguiente proceso de propagación de la levadura, mediante aireación ligera y continua y se mantiene una temperatura entre 30 y 32 °C. Este proceso se monitorea desde el punto de vista químico y biológico hasta llegar al final, cuando el °Brix disminuya a valores entre 6.0 y 6.5 °Brix y se determine el adecuado estado de la levadura y su concentración.

La biomasa que proviene del prefermentador se somete a un proceso de fermentación incrementada en el fermentador, llamada también de alimentación constante. El inóculo pasa por gravedad al fermentador y comienza la adición continua de la miel diluida. El flujo de miel diluida se fija manualmente se debe encontrar entre 3-5 m³/h, en correspondencia con los azúcares fermentables necesarios para obtener 6-6.5 °GL; la adición de miel diluida se mantiene hasta las 20 horas, debiendo quedar el fermentador lleno con un valor que no exceda de los 9 °Brix. Las próximas cuatro horas se emplean en el total agotamiento de los azúcares por parte de las levaduras, para lograr así, un ciclo de 24 horas.

En esta etapa, el objetivo es obtener el mayor rendimiento alcohólico posible y no el incremento de biomasa; por tanto, no se suministra aire al medio, la temperatura se controla en valores entre 32-34 °C y se emplea la agitación mecánica para homogeneizar el medio y evitar que la levadura precipite. En el fermentador no se adicionan nutrientes, pues con el nitrógeno y fósforo aprovechable que contiene la miel, es suficiente.

El fermentador tiene una capacidad de 64 m³, cuenta con sistema de enfriamiento interior, agitación mecánica y es abierto; por lo que tiene las mismas ventajas de limpieza que el prefermentador. Este proceso se considera terminado después que se han agotado completamente los azúcares fermentables, debe obtenerse un porcentaje de etanol en correspondencia con el sustrato adicionado y los azúcares reductores fermentables.

Obtención del modelo de simulación

El desarrollo de una simulación eficaz depende de la correcta selección de los componentes y del paquete de propiedades (6-9). En este trabajo se empleó, para la simulación del proceso de fermentación alcohólica el simulador Aspen Hysys v10.0.

En el caso de la selección de los componentes, para la simulación de la miel se utilizaron componentes representativos según los datos reportados en la literatura (10, 11). En la tabla 1 se muestra la composición másica seleccionada de miel final.

Tabla 1. Composición másica de miel final

Componentes	Composición (%)	Componentes	Composición (%)
Composición de miel	100	Composición de cenizas	10.05
H ₂ O	15	K ₂ O	6.12
C ₁₂ H ₂₂ O ₁₁ (Sacarosa)	33	Na ₂ O	0.49
C ₆ H ₁₂ O ₆ (Glucosa)*	23	CaO	2.26
Cenizas	10.05	MgO	1.18
Impurezas	18.48	Composición de las impurezas	18.48
Ácido acético	0.324	Gomas	3.15
Ácido propiónico	0.060	Coloides	8.02
Ácido butírico	0.091	Otros no azúcares	7.31

* Incluye composición de glucosa + fructosa

Algunos de estos componentes no se encuentran en la base de datos del simulador Aspen Hysys v10.0, por lo que fue necesaria su inserción como hipotéticos. En la tabla 2 se plantean los compuestos sólidos hipotéticos insertados.

Tabla 2. Compuestos sólidos hipotéticos insertados (12)

Compuestos	Fórmula química	Masa molar	Densidad (kg/m ³)
Óxido de potasio	K ₂ O	94.20	2 350
Óxido de sodio	Na ₂ O	61.98	2 270
Óxido de calcio	CaO	56.10	3 300
Óxido de magnesio	MgO	40.30	3 580

Para la estimación de las propiedades, se seleccionó el paquete de propiedades NRTL para el equilibrio entre el agua y las sustancias orgánicas a bajas presiones e IDEAL para la fase vapor (13).

Simulación de la fermentación alcohólica

Para la construcción del modelo de simulación de la etapa de fermentación se emplearon seis módulos: Tank, Air cooler, Heat exchanger, Component Splitter, Adjust y Spreadsheet. El módulo Tank se utilizó para la simulación del disolutor y del fermentador. La torre de agua de enfriamiento se representó con el módulo Air cooler (TE Ferm), suministrando el dato de la temperatura del aire a la entrada (28 °C). El módulo Heat exchanger simuló el calentamiento de la miel (Calentador M) y el sistema de enfriamiento del fermentador (Enfriador V), donde se suministró como dato la caída de presión ($\Delta P = 0$ kPa). El degasificador se simuló con el Component Splitter, se suministra valor 1 para la fracción de separación de CO₂ en la corriente CO2deg. El Adjust se empleó en la dilución (ADJ-D), para ajustar a 0.84 la fracción másica de agua en la miel diluida y manipular el flujo másico de la corriente Agua de dilución y en el caso de la fermentación (ADJ-F), se manipuló la corriente calor perdido (se suministra como dato inicial el flujo de Calor perdido de $-1.824 \cdot 10^6$ kJ/h) para ajustar la temperatura de la corriente vino a degasif (33 °C). El módulo Spreadsheet se empleó como hoja de cálculo para la determinación del Brix en las corrientes miel, miel diluida y vino (Brix Ferm) y la eficiencia en fermentación (Eficiencia Ferm).

En la tabla 3 se muestran los datos empleados para la simulación.

Tabla 3. Datos de las corrientes para la simulación

Corriente	Descripción	Presión (kPa)	Temperatura (°C)	Fracción de vapor	Flujo (kg/h)	Composición
Miel almac	Miel almacenada	101.3	28	-	3 000	Tabla 1
Miel	Miel calentada a etapa de dilución	-	40	-	-	-
Vapor miel	Vapor para calentamiento de miel	50	-	1	-	-
Cond miel	Condensado del calentamiento de miel	-	-	0	-	-
Miel diluida	Miel diluida alimentada al fermentador	-	30	-	-	-
Agua dilución	Agua empleada en dilución de miel	101.3	28	-	13 700	Agua 100 %
Agua FF	Agua de enfriamiento de fermentación	-	27.7	-	-	-
Agua CF	Agua caliente de fermentación	101.3	29	-	38 160	Agua 100 %
CO2deg	CO ₂ recuperado del vino	-	33	-	-	-

Las reacciones químicas descritas en la literatura (5, 14-23) e insertadas en la simulación, (tabla 4) fueron: hidrólisis de la sacarosa en la etapa de dilución de la miel y la obtención de etanol y co-productos, en la etapa de fermentación.

Tabla 4. Reacciones químicas que ocurren en la etapa de fermentación

Módulo	Reacciones	Componente limitante	Conversión (%)	Fuente
Disolutor	$C_{12}H_{22}O_{11} + H_2O \rightarrow 2 C_6H_{12}O_6$	$C_{12}H_{22}O_{11}$	90	(5)
Fermentador	$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2 C_2H_5OH \text{ (Etanol)} + 2 CO_2$	$C_6H_{12}O_6$	95	(20)
	$0,5 C_6H_{12}O_6 + H_2O \rightarrow C_2H_4O_2 \text{ (Ácido acético)} + CO_2 + 2 H_2$	$C_6H_{12}O_6$	1,19	(15, 23)
	$C_6H_{12}O_6 + 2 H_2 \rightarrow 2 C_3H_8O_3 \text{ (Glicerol)}$	$C_6H_{12}O_6$	2,67	(15, 23)
	$5 C_6H_{12}O_6 \rightarrow 4 C_5H_{11}OH \text{ (Alcohol isoamílico)} + 10 CO_2 + 6 H_2O$	$C_6H_{12}O_6$	$3,1 \cdot 10^{-4}$	(23)
	$C_6H_{12}O_6 + 2 CO_2 \rightarrow 2 C_4H_6O_4 \text{ (Ácido succínico)} + O_2$	$C_6H_{12}O_6$	0,6	(16, 20)
	$C_6H_{12}O_6 + H_2O \rightarrow C_6H_{14}O_6 \text{ (Sorbitol)} + 0,5 O_2$	$C_6H_{12}O_6$	1	(22)
	$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2 C_3H_6O_3 \text{ (Ácido láctico)}$	$C_6H_{12}O_6$	0,5	(22)
	$2 C_6H_{12}O_6 \rightarrow 0,1 C_3H_8O \text{ (1-Propanol)} + 0,2 C_4H_{10}O \text{ (Isobutanol)} + 1,38 C_5H_{12}O \text{ (1-Pentanol)} + 4 CO_2 + 2,32 H_2O$	$C_6H_{12}O_6$	8	(22)
	$C_2H_5OH + 0,5 O_2 \rightarrow C_2H_4O \text{ (Acetaldehído)} + H_2O$	C_2H_5OH	0,01	(22)

El modelo de simulación obtenido se muestra en la figura 1.

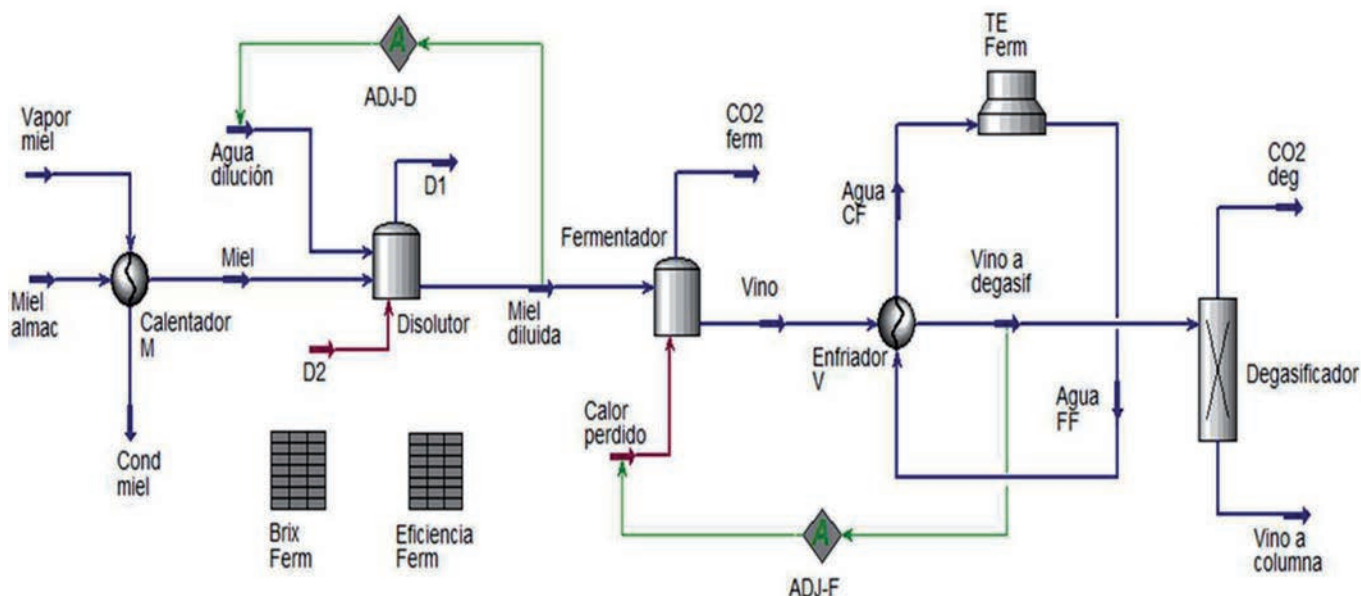


Figura 1. Modelo de simulación de la fermentación alcohólica.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Validación del modelo de simulación

Los resultados de la simulación del proceso de fermentación alcohólica y su comparación con los datos reales de la planta se muestran en la tabla 5.

Tabla 5. Comparación de los resultados de la simulación de la fermentación alcohólica

Parámetros	Planta real	Aspen Hysys	Error relativo (%)
Brix de la miel final (%)	85	85	0.00
Densidad de la miel (kg/m ³)	1 440	1 472	2.22
Flujo másico de vapor de calentamiento (kg/h)	40	39.85	0.37
Flujo másico de agua de dilución (kg/h)	13 452	13 700	1.84
Flujo másico de miel diluida (kg/h)	16 452	16 700	1.51
Brix de la miel diluida (%)	15.5	15.55	0.32
Densidad de la miel diluida (kg/m ³)	1 060	1 056	0.38
Temperatura del vino sin enfriamiento (°C)	36	36.23	0.64
Flujo másico de vino a columna (kg/h)	15 912	15 910	0.01
Brix del vino a columna (%)	6.5	6.49	0.15
Densidad del vino a columna (kg/m ³)	1 020	1 010	0.98
Grado alcohólico del vino a columna (% vol)	6.11	6.14	0.49
Temperatura del vino a columna (°C)	33.5	33.0	1.49
Eficiencia en fermentación (%)	93	93.47	0.51

A partir de esta comparación se concluye que el modelo de simulación obtenido queda validado con un error relativo menor al 2.5 %, el error máximo relativo de 2.22 %, el promedio de 1.84 % y el mínimo 0.01 %. Aunque no son variables medidas en la fábrica; se obtuvo además que la dextrosa no consumida por la levadura fue de 4.3 %, similar al valor de 4 % reportado por Bonomi *et al.* (19), y que el etanol perdido por arrastre en la corriente CO₂ fue de 1.7 %, ligeramente superior a lo planteado por Domenech *et al.* (24) de 0.93-1.41 %.

Casos de estudios

Influencia del aumento del flujo de miel alimentada sobre variables del proceso

Con el objetivo de analizar la influencia que tiene el flujo de miel alimentada a la destilería, sobre algunas variables importantes del proceso, se realizó un estudio de caso apoyado en el modelo de simulación validado del proceso de fermentación. Se tomó como intervalo de la variable dependiente, un flujo másico de miel alimentada entre 2 000 y 4 000 kg/h, con un paso de 500 kg/h. En la tabla 6 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 6. Resultados del caso de estudio

Parámetros	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4	Escenario 5
Variable independiente					
Flujo másico de miel almacenada (kg/h)	2 000	2 500	3 000	3 500	4 000
Variables dependientes					
Flujo másico de vapor para calentamiento de miel (kg/h)	26.57	33.21	39.85	46.49	53.13
Flujo volumétrico de vino (m ³ /h)	11.42	13.16	15.78	18.40	21.02
Fracción volumétrica de etanol en vino	0.0567	0.0614	0.0614	0.0615	0.0615
Flujo volumétrico de CO ₂ generado (m ³ /h)	310.2	387.1	462.7	537.0	612.0

La figura 2 muestra la influencia del flujo de miel sobre el consumo de vapor de calentamiento en el calentador de miel, donde se observa una relación lineal directa. Aunque se incrementa el flujo de miel en un 16 %, el flujo de vapor de calentamiento no alcanza el máximo de 55 kg/h que es posible suministrar.

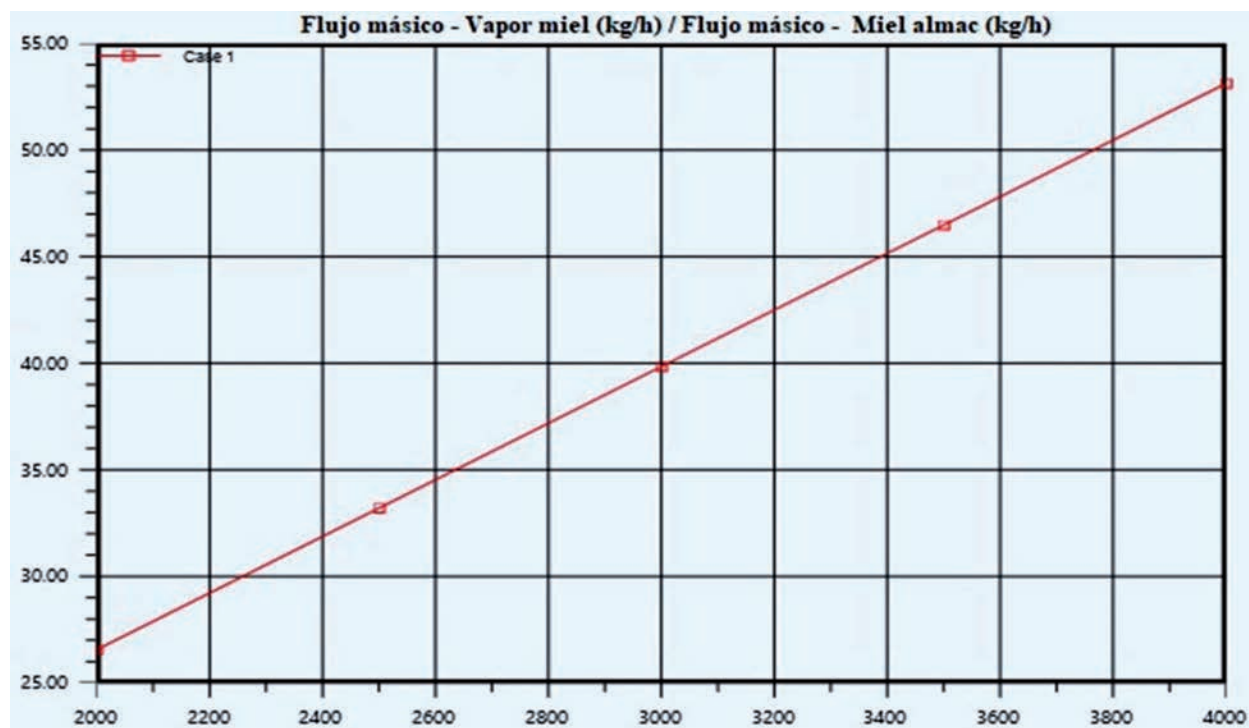


Figura 2. Influencia del flujo de miel sobre el flujo de vapor de calentamiento de miel.

En la figura 3 se observa que la influencia del flujo másico de miel sobre el flujo volumétrico de vino producido no es constante en todo el intervalo estudiado. Se aprecia una relación directa con cambios de pendientes, donde el efecto del cambio es mayor, a mayores valores de flujo de miel.

Aunque la capacidad de procesamiento de flujo de miel alimentada que admite el área de fermentación es de 4 000 kg/h, en este caso es necesario tener en cuenta la capacidad de la columna destiladora que, si sobrepasa los 15.6 m³/h, ocurrirían pérdidas de etanol en las vinazas, por lo que el flujo de miel alimentada no debe exceder los 3 000 kg/h.

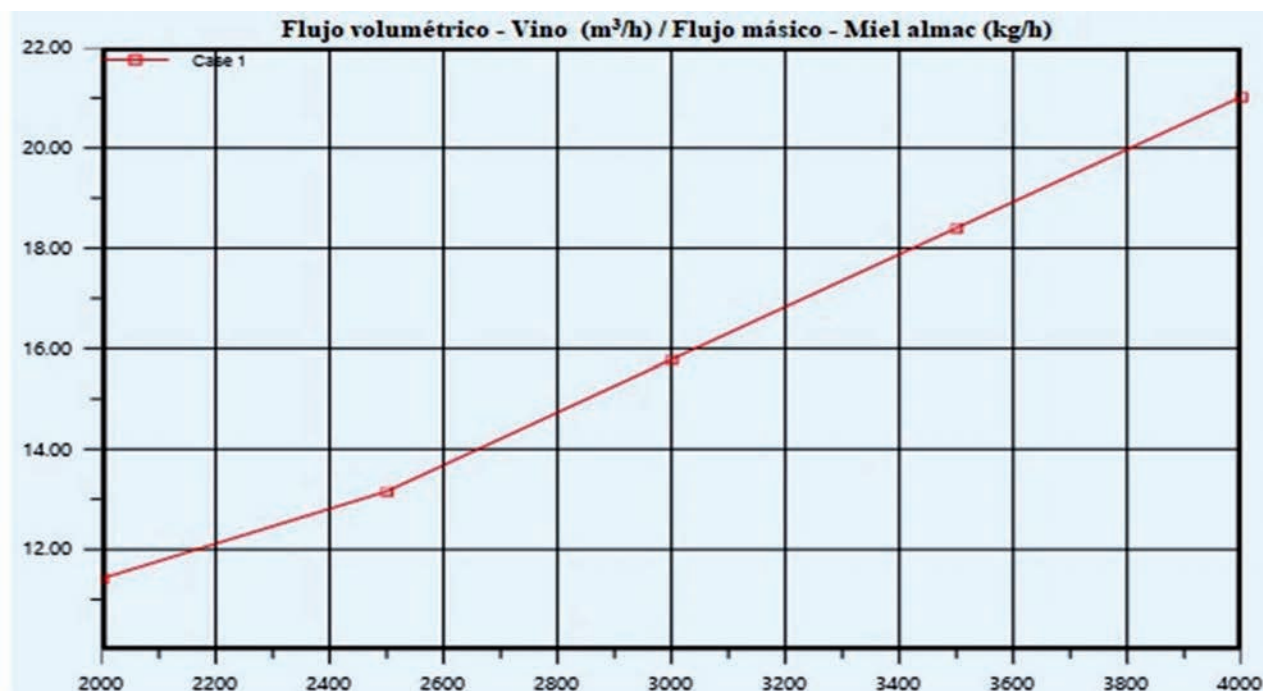


Figura 3. Influencia del flujo de miel sobre el flujo de vino

Por otra parte, si se analiza la influencia del flujo de miel en la fracción volumétrica de etanol en vino, se puede determinar que una disminución del consumo de miel en más del 6 % entre los 2 000 y 2 500 kg/h, provoca una disminución del grado alcohólico del vino en 0.4 % vol.; sin embargo, con un aumento del flujo de miel en más de 16 %, el incremento de la fracción volumétrica de etanol en el vino obtenido es despreciable (figura 4). Por consiguiente, para aumentar el grado alcohólico con un flujo de miel superior a los 3 000 kg/h, se debe tener una concentración superior de azúcares reductores totales.

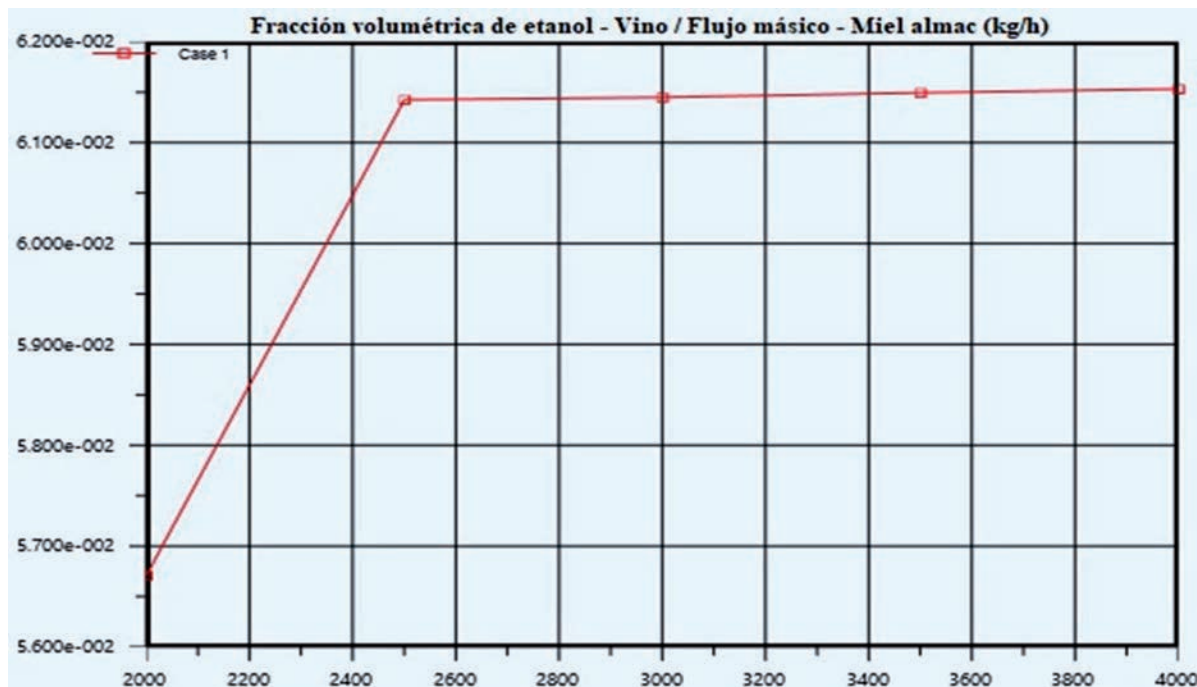


Figura 4. Influencia del flujo de miel sobre la fracción volumétrica de etanol en el vino.

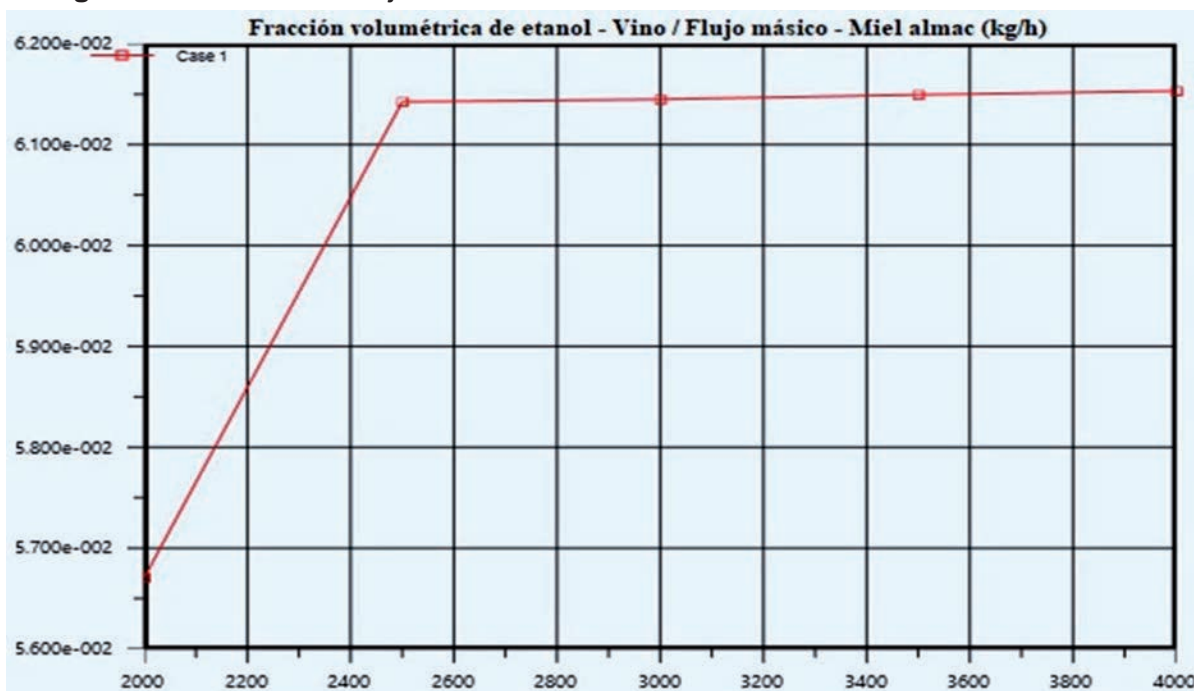


Figura 5. Influencia del flujo de miel sobre el flujo de CO₂ generado.

En la figura 5 se puede observar una relación lineal directa entre el flujo másico de miel y el flujo volumétrico de dióxido de carbono generado en fermentación. Actualmente, en esta planta no se

realiza la recuperación de CO_2 ; por lo que, de contar con esta tecnología, se recuperarían entre 460-610 m^3/h ; que, a un precio de 60.50 USD/t, considerando 100 días de operación, representaría una ganancia adicional entre 116 601.48-136 034.98 USD/año.

Sustitución de la materia prima

Atendiendo al resultado del caso de estudio anterior, en el que se concluía que para aumentar el grado alcohólico con un flujo de miel superior a los 3 000 kg/h , se debe tener una concentración superior de azúcares reductores totales, se preparó un caso de estudio cambiando la materia prima, por una miel con mayor contenido de reductores totales.

Los resultados obtenidos de la evaluación de la sustitución de la miel final por una miel B ($\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$: 31,4 %, $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$: 30.1 %, cenizas: 10.05 % e impurezas: 15.98 %) se presentan en la tabla 7.

Tabla 7. Resultados de la sustitución de la materia prima

Parámetros	Miel final	Miel B	Diferencia
Flujo másico de miel (kg/h)	3 000	2 900	- 100
Brix de la miel (%)	85	88	+ 3
Densidad de la miel (kg/m^3)	1 472	1 536	+ 64
Flujo másico de vapor de calentamiento (kg/h)	39.85	37.11	- 2.74
Flujo másico de agua de dilución (kg/h)	13 700	13 860	+160
Flujo másico de miel diluida (kg/h)	16 700	16 760	+ 60
Brix de la miel diluida (%)	15.55	15.48	- 0.07
Densidad de la miel diluida (kg/m^3)	1 056	1 058	+ 2
Flujo másico de vino a columna (kg/h)	15 910	15 910	0
Brix del vino a columna (%)	6.49	5.83	- 0.66
Densidad del vino a columna (kg/m^3)	1 010	1 009	- 1
Grado alcohólico del vino a columna (% vol)	6.14	6.53	+ 0.39
Temperatura del vino a columna ($^{\circ}\text{C}$)	33.0	33.0	0
Flujo volumétrico de dióxido de carbono (m^3/h)	462.1	494.2	+ 32.1

Los resultados de la sustitución de la materia prima muestran que disminuye el consumo de miel en 100 kg/h , lo que representa una reducción del índice de consumo de 8 kg de miel/hL de aguardiente producido, equivalente a un ahorro de 25 197.6 USD/año considerando un precio de miel de 104.99 USD/t.

Además, el consumo de agua de dilución aumenta en 160 kg/h y el grado alcohólico del vino en 0.39, debido a la mayor concentración de azúcares reductores totales, lo que incide en un incremento de 32.1 kg/h del CO_2 generado.

Por otra parte, con este aumento de la concentración de etanol en el vino, al mantener la misma producción de aguardiente en la columna destiladora de 1 104 kg/h a 75.5 °GL (25) es posible predecir una reducción aproximada en el flujo volumétrico de vino a procesar en la columna entre un 5-6 %, que implicaría una disminución del flujo volumétrico de vinazas concentradas, entre un 25-30 %, así como de vapor de calentamiento entre 6-7 % y del consumo de crudo entre 1-1.3 %.

CONCLUSIONES

1. La simulación del proceso de fermentación alcohólica de una ronera cubana se desarrolló en el simulador Aspen Hysys v10.0. Se verificó que el modelo de simulación representa ade-

cuadramente el sistema, ya que en comparación con los datos reales de la planta, los errores relativos son menores que 2.5 %.

2. Se realizó un caso de estudio donde se determinó que existe una relación lineal directa entre el flujo de miel alimentada y el flujo de vapor de calentamiento, así como con los flujos volumétricos de vino y de CO₂ generado. En el caso del grado alcohólico del vino, este decrece si disminuye el flujo de miel, mientras que si aumenta, el grado alcohólico no muestra variación considerable.
3. Al evaluar la sustitución de la materia prima empleada en la actualidad por una miel de mayor calidad, se reduce el consumo de miel en 100 kg/h y aumenta el grado alcohólico del vino en 0.39, lo que implica una reducción del flujo volumétrico del vino a procesar en la columna entre un 5-6 %, del consumo de vapor entre 6-7 % y del crudo entre 1-1.3 %.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Esfahanian, M.; Nikzad, M.; Najafpour, G.; Ghoreyshi, A.A. Modeling and optimization of ethanol fermentation using *Saccharomyces cerevisiae*: Response surface methodology and artificial neural network. Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly/CICEQ. 2013;19(2):241-52.
2. Pérez, O.; Gozá, O. Jiménez O. Producción de alcohol por vía fermentativa. Monografía. La Habana, Cuba: CUJAE; 2003. p. 46.
3. López LE, Zumalacárregui L, Pérez O. Análisis de componentes principales aplicado a la fermentación alcohólica. Revista Científica de la UCSA. 2019;6(2):11-9.
4. Ranjan S. Process modeling and simulation for chemical engineers. USA: John Wiley & Sons; 2017. 356 p.
5. Amin R, Hossain S, Sarker M. Simulation of ethanol production by fermentation of molasses. Journal of Engineering (JOE). 2013;1(4):69-73.
6. Hemptinne JC. Select thermodynamic models for process simulation. Paris, France: Editions Technip; 2012. 414 p.
7. Gmehling J, Kolbe B, Kleiber M, Rarey J. Chemical thermodynamics for process simulation. Weinheim, Germany: Wiley-VCH; 2012. 744 p.
8. Hill D, Justice FC. Understand thermodynamics to improve process simulations. Chemical Engineering Progress. 2011:20-5.
9. Satyro MA. Thermodynamics and the simulation engineer. Chemical Product and Process Modeling. 2008;3(1):1-41.
10. Rein P. Ingeniería de la caña de azúcar. Berlin: Verlag Dr. Albert Bartens KG; 2012. 850 p.
11. Otero MA. Las mieles finales de caña. Composición, propiedades y usos. Monografía. La Habana, Cuba: ICIDCA; 1997. p. 148.
12. Poling BE, Thomson GH, Friend DG, Rowley RL, Wilding WV. Physical and chemical data. Perry's chemical engineers' handbook. 8 ed: McGraw-Hill; 2008. p. 1-517.
13. Haydary J. Chemical process design and simulation: Aspen Plus and Aspen Hysys applications. First ed. American Institute of Chemical Engineers I, editor. USA: John Wiley & Sons, Inc.; 2019. 418 p.
14. Silva PA, Maciel R, Posada J. Mass and heat integration in ethanol production mills for enhanced process efficiency and exergy-based renewability performance. Processes. 2019;7(10):35.
15. Rodríguez R. Otimização do processo de produção de etanol de segunda geração em um sistema integrado à primeira geração [Tese de Doutorado apresentada como parte dos requisitos

- necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Química]. Rio de Janeiro, Brasil: Universidade Federal do Rio de Janeiro; 2019.
16. Michailos SE, Webb C. Biorefinery approach for ethanol production from bagasse. Bioethanol production from food crops: Elsevier; 2019. p. 319-42.
 17. Longati AA, Lino ARA, Giordano RC, Furlan FF, Cruz AJG. Biogas production from anaerobic digestion of vinasse in sugarcane biorefinery: A techno-economic and environmental analysis. Waste and Biomass Valorization. 2019;1-19.
 18. Oliveira CM, Pavão LV, Ravagnani MA, Cruz AJ, Costa CB. Process integration of a multi-period sugarcane biorefinery. Appl Energy. 2017;213:520–39.
 19. Bonomi A, Cavalett O, Pereira M, Lima M. Virtual biorefinery. An optimization strategy for renewable carbon valorization. London: Springer; 2016. 319 p.
 20. Aspen Plus bioethanol from corn stover model. USA; 2011.
 21. Walter A, Ensinas AV. Combined production of second-generation biofuels and electricity from sugarcane residues. Energy. 2010;35:874-9.
 22. Ramírez CX. Simulación del proceso de producción dual bioetanol combustible-azúcar [Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de Magister en Ingeniería Química]. Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander; 2009.
 23. Dias M, Ensinas AV, Nebra SA, Maciel R, Rossella C, Wolf MR. Production of bioethanol and other bio-based materials from sugarcane bagasse: Integration to conventional bioethanol production process. Chemical Engineering Research and Design. 2009;87:1206–16.
 24. Domenech F, Lorenzo Y, Lorenzo M, Esquivel L. Diagnóstico preliminar de las emisiones gaseosas en la industria de los derivados de la caña de azúcar. ICIDCA. 2011;45(3):30-7.
 25. Cruz A, Pérez O, Zumalacárregui L, Pérez JL. Simulación en Aspen Hysys v10.0 de los procesos de destilación de aguardiente y concentración de vinazas. ICIDCA. 2019;53(3):45-55.

Evaluación del sistema de lagunas de oxidación en la industria productora de azúcar Urbano Noris

Rosalía de la Caridad Esquivel-Figueroa^{1*}, Odalis Isabel Figueroa-Sánchez¹, Yaimet Victoria Téllez-Pol² y Rafael Rodríguez-Macfarlane²

1: Universidad de Holguín, Avenida Libertadores # 287 Holguín, Cuba.

* rosaliaef92@nauta.cu

2. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar, Sede Holguín. Carretera Central y circunvalación, km 769, Vía Habana, Holguín, Cuba.

RESUMEN

El central azucarero Urbano Noris, empresa agroindustrial desarrolló un estudio que cuenta con un sistema de lagunas de oxidación compuesto por una laguna anaeróbica y dos facultativas con el objetivo de determinar la eficiencia en el tratamiento a los residuales líquidos generados por la empresa. La evaluación se realizó en el período comprendido entre el año 2016 y 2019, con la caracterización de los efluentes de entrada y salida de la primera laguna de estabilización. Se demostró que el funcionamiento del sistema de tratamiento tiene una eficiencia de 16.67 % y 11.76 % para los parámetros de la demanda bioquímica (DBO_5) y química de oxígeno (DQO), respectivamente. Además, la falta de mantenimiento y la pérdida de la interconexión de las lagunas, entre otros factores, influyen en el mal funcionamiento del sistema de tratamiento.

Palabras clave: lagunas de oxidación, tratamiento de residuales líquidos, eficiencia.

ABSTRACT.

The sugar mill Urbano Noris, in which the present study was carried out, has an oxidation lagoon system composed of an anaerobic lagoon and two facultative. The objective was to determine the efficiency of the liquid waste treatment. The evaluation was carried out in the period between 2016 and 2019, with the characterization of the input and output effluents of the first stabilization lagoon. It was shown that the operation of the treatment system has an efficiency of 16.67% and 11.76% for the parameters of biochemical (DBO_5) and oxygen chemistry demand (DQO) respectively. In addition, the lack of maintenance and the interconnection of the lagoons are the main factors that influence the bad function of the treatment system.

Key words: oxidation lagoons, liquid waste treatment, efficiency.

INTRODUCCIÓN

El agua es uno de los recursos naturales que se encuentra en mayor cantidad en el planeta, es la base fundamental para la existencia de todo tipo de vida. Es ampliamente utilizada en todas las actividades humanas, tanto industriales como domésticas, por ello, es también, uno de los medios más contaminados. Las descargas de efluentes de una variedad de actividades de origen antropogénico han provocado la contaminación de ríos, lagos y otros cuerpos de agua; a su vez, el acelerado crecimiento poblacional y la expansión de las zonas urbanas, ha incrementado el impacto negativo sobre los recursos hídricos (1).

La calidad del agua es una preocupación en todo el mundo. Las fuentes de agua potable están bajo la amenaza creciente de la contaminación, con consecuencias de gran alcance para la salud y para el desarrollo económico y social de comunidades y naciones (2).

El plan del estado para el enfrentamiento al cambio climático: La Tarea Vida, se interesa por el cuidado y uso racional de este preciado recurso y plantea “asegurar la disponibilidad y el uso eficiente del agua como parte del enfrentamiento a la sequía a partir de la aplicación de tecnologías para el ahorro y la satisfacción de las demandas locales. Elevar la infraestructura hidráulica y su mantenimiento, así como la introducción de acciones para la medición de la eficiencia y productividad del agua” (3).

Uno de los sectores que genera gran cantidad de residuales líquidos es el cañicultor. Este recurso abastece todos los procesos productivos y, también, es cuerpo receptor de las aguas residuales, al final de los procesos de producción de azúcar (4).

A pesar de esto, la producción de azúcar de caña deviene proceso amigable con el medio ambiente, siempre que se brinde un adecuado aprovechamiento de sus residuos y co-productos y se apliquen buenas prácticas en el manejo del agua y la energía (5).

La contaminación ambiental es un problema que se ha agravado con el tiempo y que debe ser atendido de manera eficaz, una forma de lograrlo es mediante el tratamiento a las aguas residuales, a los cuerpos de agua donde éstas son descargadas, para remover la mayor cantidad de residuos y asegurar que el cuerpo receptor tenga una calidad tal que pueda sustentar los usos que se le den, de acuerdo a la normatividad ambiental vigente. (6)

Una de las principales tecnologías aplicadas para el tratamiento biológico de los residuales líquidos de las industrias azucareras son las lagunas de oxidación o estabilización. Las primeras surgieron como embalses contruidos para sistemas reguladores de agua para riego. Se almacenaban los excedentes de agua residual utilizada en riegos directos, sin tratamiento previo. Durante el almacenamiento se observó que la calidad del agua mejoraba sustancialmente, por lo que se estudió la posibilidad de utilizar las lagunas como método de tratamiento de aguas residuales (7, 8).

Este sistema de tratamiento es adecuado en países con climas tropicales, como es el caso de Cuba, pues las condiciones ambientales incrementan la eficiencia en la remoción de contaminantes. Estos están basados en procesos biológicos, que realizan una depuración o descontaminación del agua, disminuyen o eliminan de forma natural, los elementos biodegradables presentes en el agua. Se clasifican, según la presencia de oxígeno, en sistemas aeróbicos, anaeróbicos, facultativos y de maduración (9, 10).

Una de las empresas agroindustriales que emplea las lagunas de estabilización como sistema de tratamiento de los residuales líquidos contaminantes, es el central azucarero Urbano Noris, de la provincia de Holguín, Cuba. El actual sistema está formado por una laguna anaeróbica y dos facultativas y se detectan anomalías en su funcionamiento. Este sistema está instalado para funcionar en serie y cuenta con un medidor de flujo. El efluente tratado es empleado en el fertirriego, y del buen funcionamiento del sistema de lagunas depende la calidad del agua a emplear y las consecuencias medioambientales para el suelo. Las deficiencias apreciadas se deben posiblemente, a aspectos constructivos, operación y mantenimiento, por ser sistemas operables sin ninguna o poca supervisión.

El estudio tuvo como objetivo evaluar el estado del sistema de tratamiento de los residuales líquidos en la industria azucarera Urbano Noris, a partir de la determinación de la eficiencia en relación con los parámetros de la demanda química (DQO) y bioquímica de oxígeno (DBO₅). El diagnóstico del efluente, en el período comprendido entre los años 2016-2019 permitió la evaluación del sistema lagunar y detectar las principales dificultades y, además, proponer medidas para mejorar la eficiencia de las lagunas de estabilización y contribuyan a un uso racional del agua.

MÉTODOS

La evaluación fue realizada a partir del diagnóstico de las caracterizaciones de los residuales líquidos en el período 2016-2019, además de la búsqueda de información:

1. Diagnóstico de la caracterización de los efluentes de entrada y salida de la laguna de estabilización.
2. Cálculo de la eficiencia de las lagunas para el período de estudio.
3. Determinación del comportamiento de la eficiencia.
4. Identificación de las principales dificultades en el tratamiento actual y propuesta de medidas para la mitigación o moderación de la carga contaminante.

Identificación de los parámetros a caracterizar en el residual líquido

La caracterización de los residuales del central azucarero Urbano Noris es realizada por la Empresa Nacional de Análisis y Servicios Técnicos (ENAST), que son laboratorios acreditados internacionalmente para este tipo de análisis. Los indicadores empleados son conductividad eléctrica (CE), potencial de hidrógeno (pH), sólidos sedimentables (SS), demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO), coliformes totales (CT) y coliformes termotolerantes (CTT). (11).

Expresión de cálculo para la eficiencia de las lagunas de oxidación

La determinación de la eficiencia de las lagunas de oxidación se realiza por la ecuación siguiente, donde el rango para que esta elimine la mayor carga contaminante posible es de 75-85 %:

$$E_f = ((DBO_{5 \text{ Laguna 1}} - DBO_{5 \text{ Laguna 2}}) / DBO_{5 \text{ Laguna 1}}) * 100$$

Donde:

$DBO_{5 \text{ Laguna 1}}$: Valor de la demanda bioquímica de oxígeno en la laguna 1.

$DBO_{5 \text{ Laguna 2}}$: Valor de la demanda bioquímica de oxígeno en la laguna 2.

La ecuación puede expresarse en función de otros términos que permiten evaluar la eficiencia del sistema de tratamiento de residuales líquidos tales como: DQO, grasas, sólidos, nitrógeno, en mg/L, g/L, kg/m³ (12).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización de las aguas residuales

En la tabla 1 se muestran los resultados obtenidos de la caracterización en los diferentes períodos de tiempo analizados. El punto de muestreo está localizado a la entrada de los efluentes de la laguna 1 y 2.

Tabla 1. Caracterización del residual líquido en el período analizado

Años	2016		2017		2018		2019	
Criterios	Laguna 1	Laguna 2	Laguna 1	Laguna 2	Laguna 1	Laguna 2	Laguna 1	Laguna 2
CE (μS/cm)	1 568	1 933	2 490	3 330	2 180	5 420	4 890	5 660
pH	6.15	7.86	3.67	3.73	4.44	5.05	4.04	4.67
SS (ml/L)	60	5	5	2	3	2	10	7
DQO (mg/L)	20 800	2 688	35 200	19 200	9 600	4 800	27 200	24 000
DBO ₅ (mg/L)	7 246	1 792	14 119	7 159	3 442	2 343	18 000	15 000
CT (NMP/100mL)	9 200	5 400	22 000	2 600	1 700	2 600	-	1 700
CTT (NMP/100mL)	9 200	3 200	22 000	2 100	1 400	2 200	-	1 700

La determinación del DBO_5 y DQO es esencial para conocer el nivel de contaminación potencial; además, a partir de su relación se puede comprobar que el agua residual analizada en los años 2016, 2017 y 2018 es mixta, de acuerdo con la naturaleza de sus contaminantes, ya que los valores de DBO_5/DQO se encuentran en el rango de 0.2 a 0.5. En el año 2019 se considera un residual líquido predominantemente orgánico, ya que el valor obtenido es mayor a 0.5. El pH es una de las principales características que se tiene en cuenta para la utilización del agua residual en el fertirriego. (4)

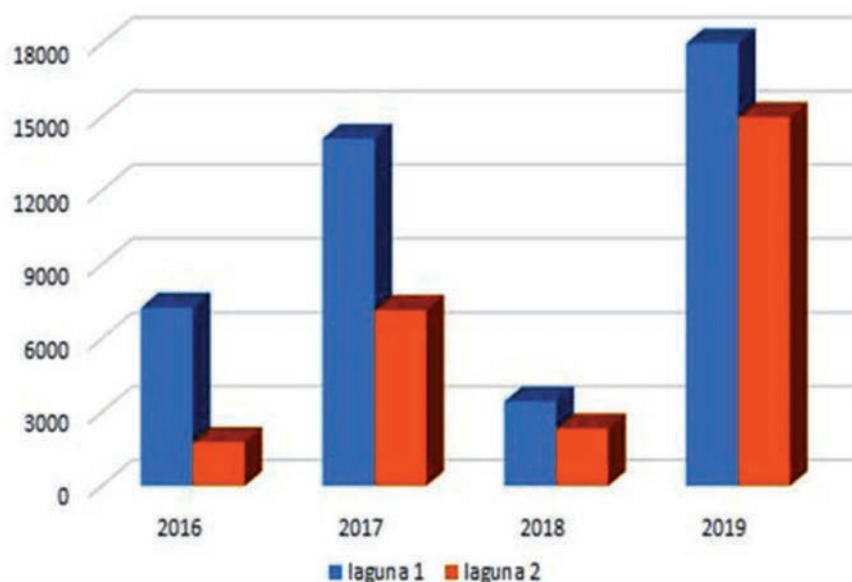


Figura 1. Valores obtenidos de la DBO_5 en la laguna 1 y 2 del central Urbano Noris.

La figura 1 indica que en los dos primeros años analizados la diferencia obtenida entre la demanda bioquímica de oxígeno, antes y después del tratamiento del residual, es cercana o superior al 50 %, esto no sucede en los dos años posteriores. Este comportamiento se corresponde con deficiencias del sistema de tratamiento, que ha provocado una baja remoción de contaminantes.

Esta situación exige una revisión y remediación de las condiciones actuales del sistema de tratamiento de las lagunas de la empresa porque, de mantenerse la situación, puede afectarse el residual y provocar que no pueda ser usado en fertirriego.

A continuación, se muestra la figura 2 con el análisis correspondiente a la DQO y pH obtenidos.

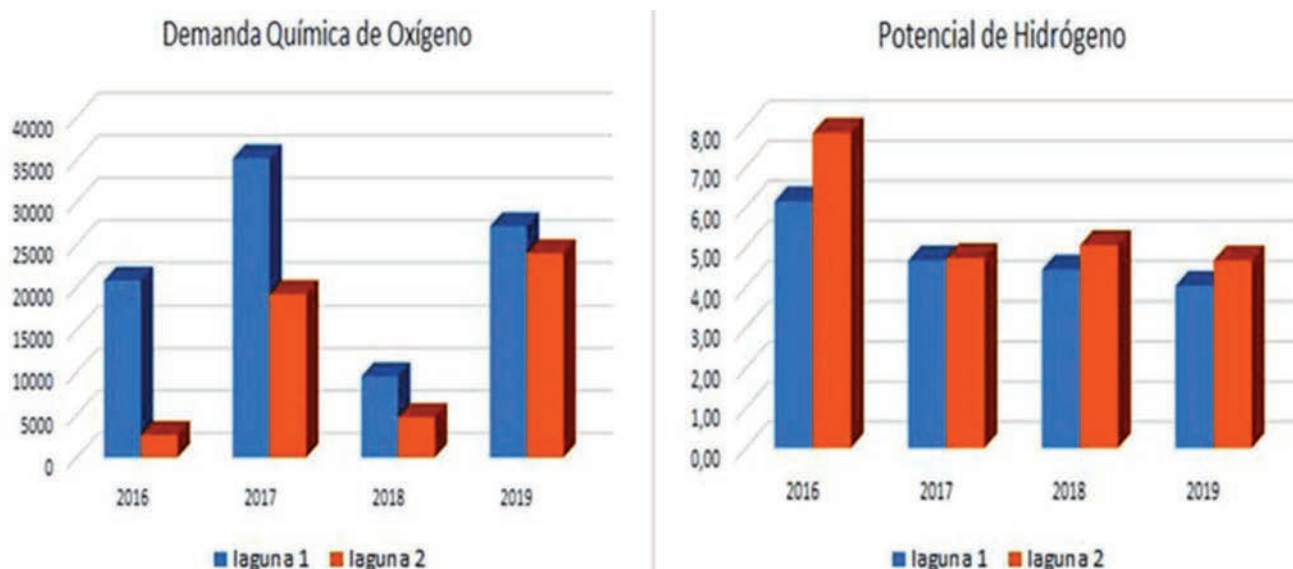


Figura 2. Valores obtenidos de la DQO y pH en el período de tiempo analizado.

El comportamiento de los valores obtenidos de la DQO se corresponde con el valor de DBO_5 . Es apreciable como la disminución de este parámetro en el año 2016 es mucho más acentuada que en los años posteriores. Para el análisis del pH se observa como, luego del tratamiento del residual, los valores aumentan, en el año 2016, la diferencia entre los resultados alcanzados a la entrada y a la salida de la laguna 1 son más acentuados con respecto a los posteriores. De acuerdo con la Norma Cubana 855:2011 "Utilización de las aguas residuales de la industria azucarera y de derivados en el fertirriego de la caña de azúcar", el agua residual obtenida se clasifica como mala para su uso según el valor de pH en los años 2017 hasta 2019 (13), que la imposibilita para su uso como riego.

Determinación de la eficiencia del sistema de tratamiento

La eficiencia de las lagunas de oxidación, con respecto a los parámetros de la DBO_5 y la DQO del central azucarero Urbano Noris, está dada en la tabla 2 siguiente:

Tabla 2. Eficiencia del sistema de lagunas de oxidación en la industria azucarera Urbano Noris

Años	2016	2017	2018	2019
Eficiencia DBO_5 (%)	75.27	49.30	31.93	16.67
Eficiencia DQO (%)	87.08	45.45	50.00	11.76

Los valores de la eficiencia han ido disminuyendo al pasar los años y se han reportado valores inferiores en la etapa actual. El sistema de tratamiento tuvo un comportamiento eficiente sólo en el año 2016, los demás valores se encuentran fuera del rango establecido. Para tener una mejor comprensión de la tabla 2, se representan los resultados en la figura 3.

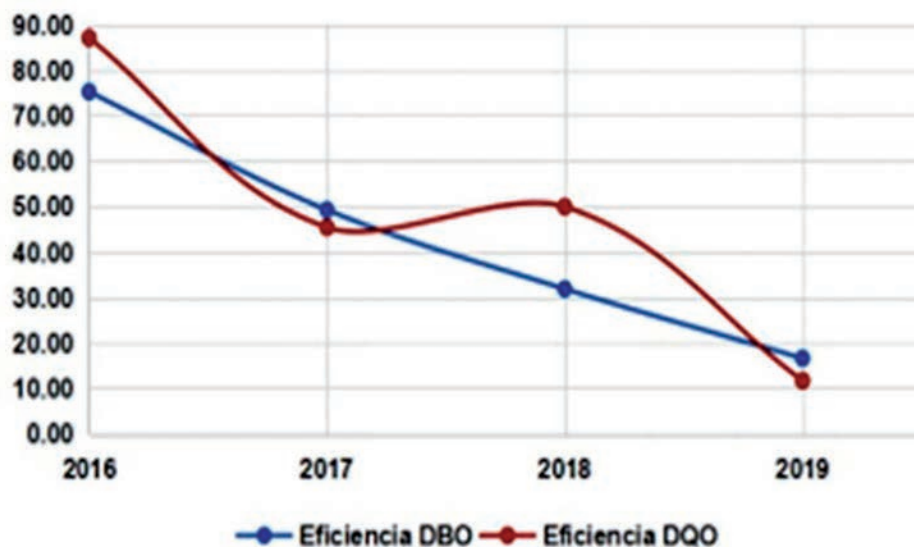


Figura 3. Eficiencia del sistema de tratamiento en el período de estudio.

Principales deficiencias en el tratamiento empleado

Mediante visitas a la empresa y entrevistas a los trabajadores se encontraron las siguientes deficiencias que ocasionan el deterioro del sistema de tratamiento:

1. En el sistema de tratamiento compuesto por tres lagunas, sólo se encuentra en funcionamiento la laguna anaeróbica.
2. No existe la interconexión entre las lagunas.
3. Falta de mantenimiento.
4. Crecimiento de arbustos y animales que pastan en los perímetros del sistema de tratamiento. Altas suspensiones de partículas en la superficie.

5. El potencial de hidrógeno del residual para la etapa actual no cumple los requerimientos de la NC 855/2011 y, por tanto, el efluente del sistema de tratamiento no puede ser utilizado en riego.

Propuesta de medidas

El diagnóstico de las deficiencias permite realizar modificaciones al proceso para mejorar el funcionamiento de las lagunas y obtener agua residual con una carga contaminante menor, cuya calidad sea buena para utilizarla en el fertirriego (14).

1. Realizar las instalaciones para circuito cerrado de las aguas de enfriamiento del tándem, turbogeneradores, cristalizadores, chumaceras y puntos de apoyo, etc.
2. Disminuir al mínimo indispensable las aguas empleadas en la limpieza de los equipos del proceso, estos son evaporadores, clarificadores, cristalizadores, centrífugas, molinos, etc.
3. La cachaza, en todos los casos, deberá ser extraída en seco y nunca ser diluida.
4. Las fugas de jugos azucarados y mieles finales deben ser reducidos al mínimo. En caso de ocurrir algún tipo de fuga en lugar de limpiar con agua, regar bagazo seco de forma tal que se absorba el tipo de fuga en cuestión y disponer posteriormente de este, como un residuo sólido.
5. Debe de instalarse un flujómetro que permita determinar de una forma más certera el volumen de residual que va hacia las lagunas, debido a que el método utilizado no es el más recomendado, porque tiende a errores. Se debe monitorear el índice de 0.25-0.30 litros de agua residual por toneladas de caña molida.
6. Debe efectuarse periódicamente la limpieza de los diques o taludes de las lagunas y evitar la vegetación y la proliferación de mosquitos y otros insectos.
7. Realizar la medición de la altura de los lodos, para comprobar que no exceda la tercera parte de la altura total de la laguna. Si la altura excede este parámetro proceder a su remoción.
8. Volver a interconectar las lagunas para que se pueda realizar nuevamente el proceso con la mayor calidad posible.
9. Delimitar el lugar con cercas y pancartas identificativas para impedir la entrada no autorizada al área de tratamiento y que los animales pasten allí.
10. Contratar los servicios del Instituto de Proyectos Azucareros (IPROYAZ) para la realización de un proyecto, con el objetivo de recuperar los aspectos constructivos que se han deteriorado y devolver a las lagunas de estabilización las condiciones iniciales.

CONCLUSIONES

El sistema de tratamiento de residuales líquidos de la empresa azucarera Urbano Noris presenta dificultades por la falta de mantenimiento y la pérdida de la interconexión entre las lagunas y otros aspectos que ocasionan que la eficiencia actual esté por debajo del 20 % de remoción, para los parámetros de DBO_5 y DQO. El análisis en diferentes períodos demuestra que el sistema lagunar presentó comportamiento adecuado en el año 2016 y disminuyó, progresivamente, en los años posteriores. A partir de las deficiencias señaladas se proponen una serie de medidas para contrarrestar el inadecuado tratamiento.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Carrasquero, S. Remoción de turbidez usando semilla de *Tamarindus indica* como coagulante en al potabilización de aguas. *Revista Bases de la Ciencia*. e-ISSN 2588-0764, vol. 4, no 1, p. 19-44. 2019.
2. Arcila, H.; Peralta, J. Agentes naturales como alternativa para el tratamiento del agua. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, vol. 11, no 2, p. 136-153. 2016.
3. Rey Santos, O. El Plan de Estado para el Enfrentamiento al Cambio Climático: la "Tarea Vida". 2018.
4. Valera, K. F. Caracterización de las aguas residuales de la industria azucarera Tres Valles, en Honduras. 2016.
5. Díaz-de los Ríos, M. El manejo de los residuales líquidos de la industria de azúcar y sus derivados en Cuba, en el contexto de las legislaciones ambientales actuales. *ICIDCA sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, vol. 50, no 3, p. 59-63. 2016.
6. MEDINA, C.; Barboza, E. Evaluación y análisis del funcionamiento de las lagunas de estabilización construidas en localidades representativas en el departamento de Lambayeque, periodo 2015. 2019.
7. Sastoque, J.A.; Bedoya, L.M.; Ramos, M.I. Diseño, operación y evaluación de plantas de tratamiento de aguas residuales. Tesis Doctoral. Universidad Libre Seccional Pereira. 2016.
8. Romero, T. de Jesús; Castillo, Y. Actualización del estado de las lagunas de estabilización de la provincia Mayabeque. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*. vol. 39, no 2, p. 72-85. 2018
9. Cortés-Martínez, F. Optimización en el diseño de lagunas de estabilización con programación no lineal. *Tecnología y ciencias del agua*, vol. 6, no 2, p. 85-100. 2015.
10. Aguilar, J.M. Evaluación de la calidad del biosólido obtenido mediante el proceso de digestión anaerobia termofílica, de los lodos residuales de la laguna de estabilización de la ciudad de Juliaca. 2018.
11. Medina, M.G. Evaluación y rediseño del sistema de tratamiento de aguas residuales de las Lagunas de estabilización del sector 'Rio Seco', Distrito de la Joya, Provincia de Arequipa. 2018.
12. Motito-Legrá, J.A. Estudio de las aguas industriales y residuales en la UEB Central Azucarero "Paquito Rosales". *Tecnología Química*, vol. 34, no 3, p. 215-229. 2014.
13. Norma Cubana 855:2011 "Utilización de las aguas residuales de la industria azucarera y de derivados en el fertirriego de la caña de azúcar".
14. Ramos-Bell, S.; Lorenzo-Acosta, Y. Acciones de producción más limpia para implementar en la industria azucarera cubana. *ICIDCA sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*. vol. 51, no 1, p. 60-66. 2017.

Determinación de compuestos sensoriales en destilados obtenidos de fermentación alcohólica utilizando sistemas nanoestructurados magnéticos

Arianna Núñez-Caraballo¹, Anna Iliná¹, Rodolfo Ramos-González¹, Carolina Flores-Gallegos², Magdalena Lorenzo-Izquierdo³, Cristóbal Aguilar-González², Georgina Michelena-Álvarez², Abelardo Flores-Vela⁴ y José Luis Martínez-Hernández^{1*}

1. Grupo de Nanobiociencia, Universidad Autónoma de Coahuila. Blvd. V. Carranza e Ing. José Cárdenas Valdés, 25280 Saltillo, México.
*jose-martinez@uadec.edu.mx
2. Departamento de Investigación en Alimentos, Universidad Autónoma de Coahuila. Blvd. V. Carranza e Ing. José Cárdenas Valdés, 25280 Saltillo, México.
3. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA). Vía Blanca 804 y Carretera Central. San Miguel del Padrón. La Habana, Cuba.
4. Instituto Politécnico Nacional – Tamaulipas, Km 14.5 Carretera Tampico, Puerto Industrial Altamira, Tamaulipas, México.

RESUMEN

En este trabajo se realizó la caracterización de una melaza de la región de Tamaulipas, en México, que fue utilizada en la fermentación alcohólica. Se realizaron diferentes ensayos para evaluar el efecto de ferrita de manganeso (sistema magnético nanoestructurado) y presencia de co-cultivo de *Saccharomyces cerevisiae* 150 y *Kluveromyces marxianus* sobre la producción de etanol y compuestos sensoriales. Se demostró que el proceso de inmovilización y el empleo de co-cultivo favorece la producción de etanol y de compuestos sensoriales que se encuentran dentro de los valores permisibles por la norma.

Palabras clave: fermentación alcohólica, congéneres, nanopartículas, melaza de caña.

ABSTRACT

In this work, the characterization of a molasses from the region of Tamaulipas Mexico was performed, which was used in alcoholic fermentation. Different assays were carried out to evaluate the effect of manganese ferrite (magnetic nanostructured system) in presence of co-culture of *Saccharomyces cerevisiae* 150 and *Kluveromyces marxianus* to produce ethanol and favorable sensory compounds. It was possible to demonstrate the immobilization process and the use of co-culture allow the production of ethanol and sensory compounds, which are within the permissible values of Mexican norm.

Key words: alcoholic fermentation, congeners, nanoparticles, cane molasses.

INTRODUCCIÓN

La producción de bebidas alcohólicas es una de las actividades más practicadas a nivel mundial por ser uno de los productos más rentables en el mercado (1). Los procesos de producción de bebidas alcohólicas para consumo humano incluyen la destilación, para la separación de la mezcla etanol-agua que proviene del proceso de fermentación.

En general, las levaduras durante la fermentación convierten los azúcares presentes en el medio en etanol, CO_2 y en una variedad de compuestos volátiles y no volátiles que contribuyen a la complejidad sensorial de las bebidas que fermentan (2). Los ésteres representan el mayor grupo de compuestos aromáticos en bebidas alcohólicas fermentadas (3) y son producidos mediante reacciones enzimáticas. Los ésteres imparten el aroma frutal en las bebidas fermentadas, por esa razón su presencia determina en parte la calidad sensorial (4).

En el caso de la destilación del mosto fermentado, los compuestos volátiles son comúnmente asociados con las propiedades sensoriales y aromáticas de la bebida. Su contenido y concentración en los destilados depende, en gran medida, del microorganismo y producen un número elevado de distintos compuestos como metanol, acetaldehído, furfural, ésteres, alcoholes superiores (butanol, isobutanol, amílico e isoamílico). Si su concentración en las bebidas alcohólicas es elevada, estas pueden ser tóxicas para el organismo y son los responsables del dolor de cabeza que se manifiesta después de la embriaguez, motivo por el cual se debe cumplir con las especificaciones que establece la norma reguladora, para poder producir y comercializar la bebida alcohólica destilada (5).

En general, la biosíntesis de ésteres es afectada por diversos factores como la temperatura de la fermentación, la aireación del mosto, la cepa de levadura y la técnica de fermentación (6). El crecimiento intenso de levaduras está relacionado con una excesiva producción de alcoholes superiores (7).

Para la determinación de dichos componentes se utiliza la cromatografía de gases que facilita la separación, identificación y determinación de componentes relacionados con mezclas complejas. Es una técnica cromatográfica en la que la muestra se volatiliza y se inyecta en una columna cromatográfica. La elución se produce por el flujo de una fase móvil de gas inerte. Hay que tener en cuenta que la fase móvil no interactúa con las moléculas del analito; su única función es la de transportarlo a través de la columna. Es útil para gases o para compuestos relativamente volátiles, lo que incluye a numerosos compuestos orgánicos.

El presente estudio se enfocó en la determinación de los compuestos sensoriales en destilados bajo un sistema de fermentación con levadura inmovilizada en nanopartículas a partir de melaza de caña, proveniente de la región de Tamaulipas en México. Para esto, inicialmente se realizó su caracterización antes de ser aplicada en la fermentación alcohólica. Se realizaron diferentes ensayos para evaluar el efecto de ferrita de manganeso (sistema magnético nanoestructurado) y presencia de co-cultivo de *Saccharomyces cerevisiae* 150 y *Kluveromyces marxianus* sobre la producción de etanol y compuestos sensoriales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materia prima

La melaza de caña fue proporcionada por una empresa azucarera del estado de Tamaulipas, México. La misma se disolvió en agua estéril, que se calentó y se agitó hasta diluir totalmente. Posteriormente se centrifugó 2 veces con el fin de retirar gran parte de las impurezas, se esterilizó por 20 min a 120 libras de presión. La caracterización se realizó de acuerdo con los métodos convencionales (8).

Microorganismos y preparación de inóculo

Se utilizaron 2 cepas de levaduras *Saccharomyces cerevisiae* 150 y *Kluveromyces marxianus*, pertenecientes a la colección de cultivos del Grupo de Nanobiociencia de la UadeC. Las cepas se conservaron en agar en tubo inclinado de YPG (glucosa 20 g/L, peptona 10 g/L, extracto de levadura 10 g/L y agar 15 g/L) a 4 °C.

Para obtener el inóculo, una asada de cada cepa fue transferida a 50 mL de medio sintético (glucosa 20 g/L, peptona 10 g/L, extracto de levadura 10 g/L). La fermentación se llevó a cabo durante 18 h, a 150 rpm y 32 °C, hasta obtener una concentración de 10^7 células/mL.

Fermentación alcohólica

La fermentación anaeróbica se realizó en matraces Erlenmeyer de 500 mL y se utilizaron 300 mL de melaza de caña ajustada a 20° Brix. Los reactores fueron equipados con tapas de goma, capilares de cristal y una trampa de CO₂. El 10 % del inóculo se adicionó a la melaza suplementado con 1 g/L de KH₂PO₄, 1.59 g/L de NH₄SO₄ y 0.5 g/L de MgSO₄·7H₂O. Se ensayaron diferentes variantes compuestas por:

- *Kluveromyces marxianus* libre, *Saccharomyces cerevisiae* 150 libre.
- *Kluveromyces marxianus* y *Saccharomyces cerevisiae* 150 libre.
- *Kluveromyces marxianus* y *Saccharomyces cerevisiae* 150 en presencia de 460 mg/mL de nanopartículas magnéticas de ferrita de manganeso recubiertas con quitosán (NPMQ).
- *Saccharomyces cerevisiae* 150 con NPMQ.

El procedimiento de la síntesis y caracterización de las nanopartículas magnéticas, así como la inmovilización de levaduras mediante la adsorción en NPMQ, se describen en el trabajo previo (9) desarrollado por grupo de Nanobiociencia de la Universidad Autónoma de Coahuila.

Destilación y cuantificación de compuestos

El fermento una vez obtenido fue destilado. Para ello, se vierte el vino en un balón de 500 mL y se calienta utilizando una hornilla o manta. La temperatura de 80 °C de los vapores se chequea continuamente con un termómetro acoplado a la boca del botellón. Los vapores que se forman pasan a través de un condensador, donde se enfrían y se colecta el condensado en una probeta hasta alcanzar un volumen de 50 mL de destilado que será analizado posteriormente. El intercambio de calor dentro del condensador se realiza entre los vapores que desprende el vino y agua helada. Cuando concluye la destilación se descarga el vino pobre en etanol (vinaza).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de la caracterización de la melaza se muestran en la tabla 1, comparándose estos valores con los reportados para la melaza utilizada en la industria azucarera cubana para la producción de etanol (8). Se observa que la melaza de Tamaulipas presenta 82.16 °Brix y la melaza de Cuba tiene un valor de 86 °Brix, siendo menor la de Tamaulipas pero aceptable para su utilización como materia prima pues con 80 °Brix ya se considera apta para la fermentación. Además se obtuvo que el por ciento de azúcares fermentables es mayor en la melaza de Tamaulipas que la melaza de Cuba, un factor importante para su posterior fermentación pues son mayores los azúcares disponibles, en cuanto a las cenizas y contenido de nitrógeno las melazas de Tamaulipas presentan menor

Tabla 1. Caracterización de la melaza

Determinaciones	Unidad	Melaza Tamaulipas	Melaza cubana
Sólidos solubles	°Brix	82.16 ± 1.16	86 ± 1.2
pH		5.23 ± 0.01	5.6 ± 0.08
Azúcares fermentables	(%)	66.34 ± 1.14	57 ± 1.17
Cenizas	(%)	9.17 ± 0.09	9.3 ± 0.12
Nitrógeno	(%)	0.21 ± 0.06	0.51 ± 0.13

número, debido a que la composición varía dependiendo de la variedad, la edad, la fitosanidad, el suelo, las condiciones meteorológicas y el manejo agronómico, que se emplean en cada país.

En la tabla 2, se presentan los resultados de la cuantificación de los principales compuestos sensoriales detectados en el destilado obtenido como producto de la fermentación de melaza caracterizada en diferentes ensayos efectuados.

Tabla 2. Comparación de la producción de componentes volátiles mayoritarios (g/100L)

Variantes	Acetaldehído	Acetato de etilo	Acetal	Metanol	1-butanol	Alcoholes superiores	Etanol (g/L)
<i>K. marxianus</i>	1.02 ± 1.13	3.54 ± 1.01	2.21 ± 3.43	1.3 ± 1.02	0	150	29.1 ± 1.2
<i>S. cerevisiae</i> 150	0	0.82 ± 0.15	0	0.15 ± 1.08	0	78.05	50.7 ± 3.1
<i>S. cerevisiae</i> 150 NPMQ	0	0.86 ± 1.55	0	0.11 ± 0.11	0	83.02	56.1 ± 4.0
<i>K. marxianus</i> y <i>S. cerevisiae</i> 150	15.37 ± 0.48	1.36 ± 1.05	6.31 ± 1.98	1.53 ± 1.02	1.09 ± 0.37	180	63.1 ± 2.5
<i>K. marxianus</i> y <i>S. cerevisiae</i> 150 NPMQ	3.66 ± 4.11	4.77 ± 0.18	2.25 ± 1.56	1.61 ± 0.42	0.98 ± 0.09	185.4	70.0 ± 3.7

Se demuestra (tabla 2) que el proceso de inmovilización y la presencia de *Kluyveromyces marxianus* favorecen la producción de compuestos sensoriales. Los mayores valores de todos los compuestos se observaron en el caso de cultivo mixto inmovilizado. En ningún sistema se produjo 2-butanol. Todos los alcoholes superiores que se determinaron se encuentran dentro de los rangos permitidos por la norma (10). El comportamiento observado en el sistema *S. cerevisiae* y *K. marxianus* difiere de lo reportado anteriormente por Escalante *et al.* (11), quienes no demostraron las diferencias en alcoholes superiores entre el cultivo mixto y libre y utilizaron *Brettanomyces intermedius* y *S. cerevisiae* en la fermentación de sidra. En la actualidad los estudios muestran que todavía no se comprende bien cómo los organismos responden a la inmovilización, pues depende de la cepa y el soporte utilizado y si esto favorece la sobreexpresión de genes que actúan en el metabolismo de dichos organismos, favoreciendo la producción de metabolitos secundarios (12).

En ensayos de fermentación realizados en el presente estudio se observó que la producción de etanol se incrementó en presencia de NPMQ, tanto para levadura individual como para el co-cultivo. Cabe mencionar que en el estudio previo (9) se demostró que el uso de NPMQ conduce a la disminución de tiempo de fermentación y posibilidad de reuso de biomasa en varios ciclos de fermentación mediada por su separación magnética.

CONCLUSIONES

La melaza de caña de la región de Tamaulipas se caracteriza por varias similitudes al compararla con la de Cuba destacando, sin embargo, mayor nivel de azúcares reductores y menor contenido de nitrógeno. El uso de co-cultivo y NPMQ conduce a obtención de mayores niveles de etanol en tiempos de fermentación más cortos. Los niveles de compuestos volátiles detectados en destilados se encuentran dentro del rango permitido por la norma mexicana. Sin embargo, los mejores resultados se observaron en caso de cultivo mixto inmovilizado en NPMQ.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Carretero, F. (2010). Procesos de fabricación de bebidas alcohólicas. *Innovación Tecnológica en la Industria de Bebidas* Vol.22, 73-79.
2. Swiegers, J.; Pretorius, I.(2005) Yeast modulation of wine flavour. *Advances in Applied Microbiology* Vol.57, 131–175.
3. Suomalainen, H. (1981) Yeast esterase and aroma esters in alcoholic beverages. *Journal of the Institute of Brewing* Vol. 87, 296–300.
4. Pérez, E.; González-Hernández, J.C.; Chávez-Parga, M.C (2013) Caracterización fermentativa de levaduras productoras de etanol a partir de jugo de *Agave cupreata* en la elaboración de Mezcal. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* Vol. 12, No. 3 451-461.
5. Vásquez, I. (2013) Determinación de acetato de etilo en bebidas alcohólicas destiladas con añejamiento (ron) por el método de cromatografía de gases. Tesis de Grado para optar por el Título de: Química de alimentos.
6. Rojas, V.; Gil, J.; Pinaga, F.; Manzanares, P. (2001). Studies on acetate ester production by non-Saccharomyces wine yeasts. *International Journal of Food Microbiology* 70, 283–289.
7. Fredlund, E.; Blank, L.; Sauer, U.; Passoth, V. (2004). Oxygen and glucose dependent regulation of central carbon metabolism in *Pichia anomala*. *Applied and Environmental Microbiology* 70, 5905–5911.
8. Otero, M.A. (1990) Las Mieles de Caña en: II Seminario Internacional de Azúcar y Derivados de la Caña, La Habana, abril 10-13.
9. Núñez, A.; Martínez, J.; Aguilar, N.; Ramos, R.; Segura, E. ; Ríos, L.; Morales, T.; Michelena, G.; Flores, C.; Ilyina, A. (2019) Ethanolic fermentation of sugarcane molasses with *S.cerevisiae* immobilized in a nanostructured magnetic support." *Refining of petroleum and petrochemical products: problems and perspectives* UFA, Rusia, 5-6 Diciembre.
10. Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-199-SCFI-2015, Bebidas alcohólicas Denominación, especificaciones fisicoquímicas, información comercial y métodos de prueba.
11. Escalante, W.; Rychtera, M.; Melzoch, K.; Ibáñez, F.; Cotos, R.; Bravo, N.; Memenza, M.; Chávez, Y. (2014) Efecto de la aireación en la producción de compuestos volátiles por cultivo mixto de *Brettanomyces intermedius* y *Saccharomyces cerevisiae* durante la fermentación de sidra. *Revista especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 17(1), 5-14.
12. Djordjevic, V.; Willaert, R.; Gibson, B.; Nedović, V. (2016) Immobilized Yeast Cells and Secondary Metabolites. *Fungal metabolites*, 2-22.

Estudio de los efectos del BioJas® en los indicadores morfológicos, fisiológicos y bioquímicos de las vitroplantas de piña MD-2 en la transición *in vitro-ex vitro*, en condiciones de aclimatización

Justo L. González-Olmedo^{1*}, Andrew Mboghli¹, René Carlos Rodríguez-Escriba¹,
Romelio Rodríguez-Sánchez¹ y Georgina Michelena-Álvarez²

1. Centro de Bioplantas, UNICA, Ciego de Ávila, Cuba.

*justo@bioplantass.cu

2. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA), Vía Blanca 804 y
Carretera Central. San Miguel del Padrón. La Habana, Cuba.

RESUMEN

En la agricultura moderna es determinante garantizar semillas de alta calidad, en cantidades masivas, que sólo el cultivo *in vitro* logra en poco tiempo. Sin embargo en la transición *in vitro - ex vitro* y su posterior permanencia en condiciones de aclimatización, se producen notables pérdidas. El empleo de bioproductos como el ácido jasmónico (formulación BioJas®), producido como derivado de la industria azucarera cubana para inducir respuestas de defensa en las plantas ante el estrés abiótico, permite superar la eficiencia de la propagación. Se determinó el efecto del BioJas® (1 mg.L⁻¹) en indicadores morfológicos, fisiológicos y bioquímicos de las plantas cultivadas *in vitro* en la primera fase de aclimatización. El ácido jasmónico atenuó los efectos estresantes en la transición *in vitro - ex vitro*, porque promovió un intercambio gaseoso más eficiente al fijar más CO₂ con menores pérdidas de agua. También aumentó los contenidos de proteínas totales y disminuyó la actividad específica de la enzima superóxido dismutasa, que mejoró la calidad junto a la supervivencia de estas plantas.

Palabras clave: ácido jasmónico, vitroplantas de piña, aclimatización.

ABSTRACT

In modern agriculture it is crucial to guarantee high quality seeds in massive quantities that only *in vitro* culture achieves in a short time. However, in the *in vitro - ex vitro* transition and its subsequent permanence under acclimatization conditions, remarkable losses occur. The use of bioproducts such as jasmonic acid (BioJas® formulation), produced as a derivative of the Cuban sugar industry to induce defense responses in plants against abiotic stress, allows to overcome the efficiency of propagation. The effect of BioJas® (1 mg.L⁻¹) on morphological, physiological and biochemical indicators of the plants cultivated *in vitro* in the first acclimatization phase was determined. Jasmonic acid attenuated the stress effects in the *in vitro - ex vitro* transition because it promoted a more efficient gas exchange by fixing more CO₂ with less water losses. It also increased the total protein contents and decreased the specific activity of the enzyme superoxide dismutase, with which the quality was improved together with the survival of these plants.

Key words: jasmonic acid, pineapple vitroplants, acclimatization.

INTRODUCCIÓN

La piña (*Ananas comosus* (L.) Merr.) principal representante de la familia *Bromeliaceae*, es cultivada en los trópicos y subtrópicos del mundo para su consumo local y exportación internacional. El cultivar MD-2, ha ganado mercado mundial en los años recientes por transformar el mercado de fruta fresca y la producción industrial de la piña *Bartholomew* (1). La necesidad de introducir esta nueva variedad de piña en plantaciones cubanas requiere altas producciones de material de propagación, que en poco tiempo solo es garantizado por el cultivo *in vitro*. La tecnología de micropropagación es una herramienta eficaz, con muchas ventajas sobre la técnica tradicional de propagación vegetal, ya que permite obtener gran número de plantas en poco tiempo y con mejor calidad. Sin embargo, los protocolos actualmente aplicados en aclimatización, presentan todavía oportunidades para elevar el grado de supervivencia y el desarrollo de las plantas en los primeros días posteriores a la transición *in vitro-ex vitro*. Uno de los jasmonatos más conocidos es el ácido jasmónico (AJ) que actúa, principalmente, como molécula señalizadora de respuesta en plantas a numerosas situaciones de estrés abiótico y biótico. La formulación BioJas®, producida por el Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA), es una excelente alternativa para aplicar a las plantas y atenuar los efectos del estrés abiótico que implica el tránsito a las condiciones *ex vitro*. Con ese objetivo se realizó la investigación que se expone.

MATERIALES Y MÉTODOS

La presente investigación se desarrolló en los laboratorios especializados y en las áreas de aclimatización del Centro de Bioplasmas, en la Universidad de Ciego de Ávila. Como material vegetal se emplearon plantas de piña (*Ananas comosus* (L.) Merr.) cultivar MD-2 micropropagadas. En la última fase se crearon dos grupos: uno con la formulación BioJas® y, otro que sirvió como control, al se le agregó la misma cantidad de agua destilada. El BioJas® se le añadió al medio, previo a la cocción y se garantizó una concentración de 1 mg.L⁻¹. Cada fase del cultivo *in vitro* duró 45 días.

A la salida de los frascos, las 90 plantas de cada grupo se plantaron en recipientes plásticos, con un volumen de sustrato de 190 cm³, compuesto por una mezcla de zeolita + cachaza (1:1) (v:v), en un diseño completamente aleatorizado. Las condiciones de aclimatización mantuvieron promedios de temperatura de 25 ± 2 °C, humedad relativa de 70-80 % y condiciones atmosféricas de concentración de CO₂ (375-400 µmol.mol⁻¹), e intensidad de luz de 450 µmol.m⁻².s⁻¹ y régimen de ciclos naturales de fotoperíodo. Esta fase se desarrolló en 42 días.

Se evaluaron las siguientes variables morfológicas de calidad de las plantas: altura de la planta (cm), el número de hojas, longitud de la hoja mayor (cm), número de raíces, longitud de raíz mayor (cm) y la masa fresca (g).

Las evaluaciones fisiológicas se realizaron al inicio de la fase de aclimatización y, posteriormente, a los 14, 28 y 42 días. Como indicadores de variables fisiológicas se midieron la fotosíntesis neta (µmol CO₂ m⁻².s⁻¹) y la transpiración total (mmol H₂O m⁻².s⁻¹), que se efectuaron con el equipo CIRAS-2 (Sistema Portátil de Fotosíntesis, Europa, PP Systems, UK), acoplado a una cubeta universal (PLC6 de 2.5 cm²). Se calculó, a partir de los valores de estas variables, la eficiencia del uso del agua que es la relación entre la fotosíntesis neta y la transpiración total. Este indicador se evaluó cada 14 días, durante 42 días. Además se calcularon los contenidos de clorofilas a, b y totales (µg.g⁻¹MF).

Las variables bioquímicas se determinaron con la misma frecuencia que las fisiológicas. Se escogieron diez plantas por tratamiento (siempre respetando el criterio de la categorización de las plantas) como se ha explicado. Las extracciones enzimáticas y de proteínas solubles se realizaron a través del mismo procedimiento: hojas maceradas en nitrógeno líquido, se añadió tampón Tris-HCl 0.1 M,

pH 7.5, se homogeneizó, se centrifugó a 15000 g, durante 20 minutos. La mezcla de reacción para la actividad enzimática superóxido dismutasa (SOD) contenía 20 μL de extracto enzimático, 1 mL de tampón fosfato de potasio-KOH 50 mmol.L^{-1} , pH 7.6, 0.1 mmol.L^{-1} EDTA, 0.01 mmol.L^{-1} citocromo C, 0.05 mmol.L^{-1} xantina, 0.03 unidades xantina oxidasa (EC 1.2.3.22) (SIGMA). La mezcla xantina-xantina oxidasa fue la fuente de radicales superóxido y se siguió el método del citocromo C (550 nm) (coeficiente de extinción a 340=21.1 (mmol.L^{-1})-1 cm^{-1}). El tiempo de reacción fue de tres minutos, la actividad enzimática se expresó en $\text{mmol de superóxido.min}^{-1} \cdot \text{g MF}^{-1}$ y la actividad específica se expresó en $\text{mmol de superóxido.min}^{-1} \cdot \text{mg Prot}^{-1}$.

El procesamiento estadístico de los resultados se realizó con el utilitario Statistical Package for Social Sciences (SPSS) (versión 17.0 para Windows, SPSS Inc.).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El eficiente protocolo de aclimatización empleado fue mejorado con diferencias estadísticas en el porcentaje de supervivencia. Se logró 96 % para las plantas con BioJas®, mientras el control registró cerca de 2 % de más mortalidad.

El efecto del BioJas® en las variables morfológicas de vitroplantas de piña, al inicio de la aclimatización, manifestó solo diferencias favorables en el número de hojas y con igualdad en la masa fresca. Se justifican las reducciones porque el producto duplicó el número de brotes, al parecer potenciando acción de citoquininas. A pesar de eso, no influyó en la vitalidad de las plantas como antes se informó.

Finalmente, las plantas tratadas con BioJas® alcanzaron mejores variables de calidad al concluir la aclimatización. Estas manifestaciones deben corresponderse con cambios en el metabolismo que el tratamiento *in vitro* favoreció, por la aplicación de manejos en los frascos de cultivo antes de la salida de las plantas a exteriores, para atenuar efectos negativos de la transición *in vitro- ex vitro*. En términos de intercambio gaseoso por funcionamiento de estomas asociado con fotosíntesis y transpiración, la tabla 1 así lo demuestra.

Tabla 1. Efecto del BioJas® en la eficiencia del uso del agua ($\text{mmol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$) de vitroplantas de piña (*Ananas comosus* (L.) Merr.) cultivar MD-2 durante la aclimatización

Concentración BioJas (mg.L^{-1})	día 0	día 14	día 28	día 42
0	0.61b	3.35	6.46b	14.29
1	1.44a	3.62	8.37a	14.05
ES	0.15	0.12	0.44	0.86
Sig.	*	ns	*	ns

Medias con letras diferentes indican significación (T-test, $p \leq 0.05$) en cada momento. Cada dato representa la media para $n=40$.

La alta eficiencia del uso del agua de las vitroplantas de piña tratadas con el BioJas® en este experimento demuestra que estas tuvieron mayor captación del CO_2 , con menor pérdida del agua, que significa que su calidad es mejor. En estudios realizados en plantas de *Platymiscium pinnatum* no encontraron ninguna correlación entre la tasa relativa de crecimiento y la eficiencia del uso del agua. En el presente trabajo la tasa de crecimiento de las variables morfológicas fue superior en las plantas con BioJas®, para igualarse al control 42 días después de la salida *in vitro*. Algunos factores que influyeron son: la fotosíntesis no difirió entre los grupos y ascendió de 4 a 7 $\text{mmol CO}_2 \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; la transpiración fue mayor en el control en el momento de la salida, luego se redujo de 4 a 1 $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ pero el BioJas® siempre mantuvo este indicador bajo, así logró mayor eficiencia del uso

del agua; las clorofilas fueron bajas en las tratadas con BioJas® (100µg.g⁻¹ MF) pero, de inmediato, en condiciones fotoautotróficas, se igualaron al control y ambos grupos llegaron a 250 µg.g⁻¹ MF de clorofilas a+b. Esto indica que la mejor supervivencia de las plantas tratadas con BioJas® y con este comportamiento, estuvieron más preparadas para enfrentar el estrés abiótico que implica la transición *in vitro-ex vitro*. La figura 1 expresa con la acción de la superóxido dismutasa sobre las especies reactivas del oxígeno (ERO) contribuye a este análisis.

Los cambios registrados en este indicador están en correspondencia con las concentraciones de proteínas solubles cuantificadas en las plantas y que merecen un estudio proteómico de cada momento. En la fecha del tránsito, las plantas previamente tratadas con BioJas® poseían mayor biosíntesis proteica, expresión de una mejor predisposición metabólica para enfrentar la transición Aragón *et al.* (2), por lo que disminuye la actividad específica de SOD, ya que su actividad enzimática fue similar en ambos tratamientos. Así fue en todo el proceso, salvo a los 28 días, cuando se evaluó un incremento proteico en las control.

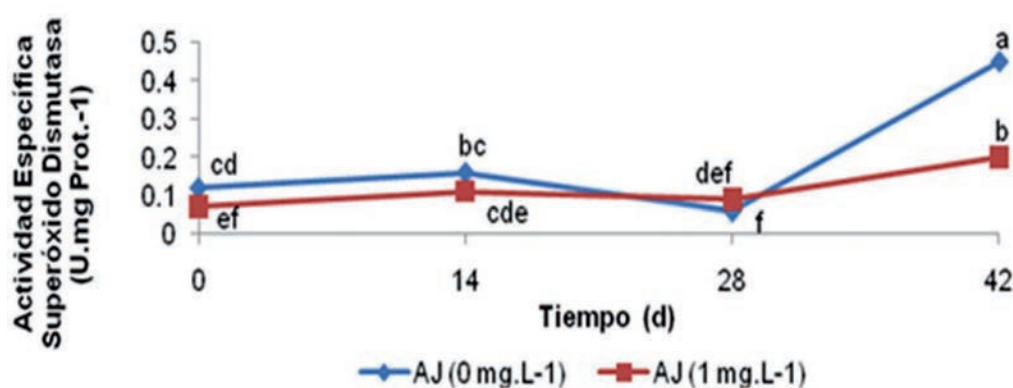


Figura 1. Efecto del BioJas actividad específica (ES=+0.02 U.mg Prot.⁻¹) de la superóxido dismutasa de vitroplantas de piña (*Ananas comosus* (L.) Merr.) cultivar MD-2 en condiciones de aclimatización. Medias con letras diferentes indican significación (ANOVA, prueba Tukey, $p \leq 0.05$). Cada dato representa la media para n=6. Una U corresponde a 1 µmol de superóxido por minuto.

Las bajas generaciones de ERO (presumiblemente O⁻²) en las vitroplantas tratadas con el BioJas® aseguran un buen desarrollo de estas. La mayor tasa de crecimiento de la hoja, órgano vital para el fototropismo vegetal, es una evidencia que apoya este análisis. Mayor producción de ERO puede causar un retraso en el desarrollo de plantas, como se evidenció en plantas transgénicas de papa, con una elevada producción de ERO por la sobreexpresión del gene Cu/Zn SOD cloroplástico Kim *et al.* (3).

CONCLUSIONES

1. Las vitroplantas de piña tratadas con el BioJas® presentaron alta eficiencia del uso del agua que demuestra mayor captación del CO₂ que incide en una mejor calidad del cultivar.
2. Las plantas previamente tratadas con BioJas® presentaron mayor biosíntesis proteica y mejor predisposición metabólica para enfrentar la transición *in vitro-ex vitro*.
3. La tasa de crecimiento de las variables morfológicas fue superior en las plantas con BioJas® para igualarse al control 42 días después de la salida *in vitro*.
4. Las plantas tratadas con BioJas® tuvieron mejor supervivencia y pudieron estar más preparadas para enfrentar el estrés abiótico que implica la transición *in vitro-ex vitro*.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Bartholomew, D. 2009. MD2 Pineapple transforms the world's pineapple fresh fruit export industry. Pineapple News. 2-5.
2. Aragón, C.E.; Carvalho, L.C.; González- Olmedo, J.L.; Escalona, M. ; Amancio, S. 2009. Sugarcane (*Saccharum sp.* Hybrid) Propagated in Headspace Renovating Systems Shows Autotrophic Characteristics and Develops Improved Anti-oxidative Response. Tropical Plant Biol. 2: 38–50.
3. Kim, H. S; Yoon, S. K.; Hahn, H.K. 2009. Reactive Oxygen Species: Regulation of Plant Growth and Development. Advances in Botanical Research. 52: 26-41.
4. Cernusak, L.A.; Aranda, J.; Marshall, J.D.; Winter, K. 2007. Large variation in whole-plant water-use efficiency among tropical tree species. New Phytologist. 173: 294 –305.

La estruvita: el problema que puede convertirse en solución

Antonio Bell-García* y Caridad Suárez-Machín

Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA).

Vía Blanca 804 y Carretera Central. San Miguel del Padrón. La Habana, Cuba.

*antonio.bell@icidca.azcuba.cu

RESUMEN

Los residuos han sido tradicionalmente considerados un problema, tanto para quien los genera, como para la sociedad en general. Los residuales derivados del proceso de la industria azucarera contienen elevadas concentraciones de fósforo y nitrógeno. Actualmente, estos nutrientes se pierden tras la depuración, pero existe la posibilidad de recuperarlos gracias al mineral estruvita, también conocido como fosfato de amonio y magnesio, y que puede ser obtenido de forma controlada.

El objetivo de este trabajo es estudiar los factores que influyen en la cristalización de la estruvita en los residuales de la industria azucarera, para la recuperación del exceso de potasio, fósforo, magnesio y nitrógeno amoniacal y su posterior utilización como fertilizante, ya sea aplicado de forma directa o con la obtención de fertilizantes, que significaría alternativas a otros productos comerciales similares.

Palabras clave: estruvita, residuales, obtención, factores, influencia.

ABSTRACT

Wastes has traditionally been considered as a problem, both for those who generate it and for society as a whole. The residuals derived from the process of the sugar industry contain high concentrations of phosphorus and nitrogen. Currently, these nutrients are lost after the purification, but there is the possibility of recovering them thanks to the struvite mineral, also known as ammonium and magnesium phosphate, and that can be obtained in a controlled manner. The objective of this work is to study the factors that influence the crystallization of struvite in the residuals of the sugar industry for the recovery of excess potassium, phosphorus, magnesium and ammoniacal nitrogen and its subsequent use as fertilizer, whether applied directly or with obtaining fertilizers, which would mean alternatives to other similar commercial products.

Key words: Struvite, residuals, obtaining, factors, influence.

INTRODUCCIÓN

Los residuales resultantes de los procesos industriales azucareros contienen elevadas concentraciones de fósforo y nitrógeno. Actualmente, estos nutrientes se pierden tras la depuración, pero existe la posibilidad de recuperarlos gracias al mineral de estruvita, que se puede obtener de forma controlada. Se trata de un cristal que puede emplearse directamente como fertilizante sobre nuestros campos de cultivo y, que supone ventajas con respecto a los fertilizantes habituales, sobre todo desde el punto de vista económico.

La Asociación española de fabricantes de agronutrientes (AEFA) afirma que la estruvita es un fosfato amónico magnésico que se encuentra asociado a la materia orgánica y cristaliza en condiciones anaerobias por la acción bacteriana. Se encuentra en los estiércoles, lodos de depuradoras, fracción orgánica de residuos domésticos, efluentes de industrias alimentarias, mataderos, etc.

La cristalización de la estruvita ($\text{NH}_4\text{MgPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ o $\text{KMgPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) se forma por un proceso espontáneo, que ocurre de forma habitual en las depuradoras, tras el proceso de digestión que, de hecho, constituye un problema técnico, pues se acumula en tuberías y depósitos y causa obstrucciones e inutiliza las instalaciones que, a su vez, provoca aumentos importantes en los costos de mantenimiento Struvia™ (1).

El control de la cristalización de la estruvita en los residuales de la industria azucarera (recuperando el exceso de K, P, Mg y amoníaco) y su posterior utilización como fertilizante, ya sea aplicado de forma directa o con la obtención de un producto fertilizante de liberación lenta, debido a la baja solubilidad en el agua, junto a la posibilidad de elaborar pre-mezclas minerales, para la formulación de alimento animal, pueden constituir soluciones alternativas a otros productos comerciales similares para estos fines y abaratar los costos en el sector agropecuario y azucarero.

El objetivo de este trabajo es estudiar los factores que influyen en la cristalización de la estruvita en los residuales de la industria azucarera, para la recuperación del exceso de potasio, fósforo, magnesio y nitrógeno amoniacal.

DESARROLLO

La estruvita se forma a partir de una concentración equimolar de NH_4^+ , Mg_2^+ y PO_4^{3-} , de acuerdo con la siguiente reacción:



La precipitación de estruvita es controlada por el pH, grado de sobresaturación, temperatura, presencia de otros iones (Ca, Fe), velocidad de agitación, relación $\text{Mg}^{2+}:\text{PO}_4^{3-}$ y tiempo de reacción (2, 3).

Factores que influyen en el proceso de formación de la estruvita

- pH: El control del pH del cristalizador se logra adicionando un álcali que neutralice la generación de hidrogeniones, para ello se suele utilizar NaOH. Para aquellas corrientes de aguas con alto contenido en dióxido de carbono disuelto, como las procedentes de reactores anaerobios metanogénicos o digestores de lodos, se puede realizar la neutralización de los hidrogeniones formados mediante la progresiva desorción del dióxido de carbono disuelto en dichas corrientes de agua, usando para ello sistemas de desorción o stripping, mediante aireación del agua residual a tratar, en la corriente de entrada de agua residual, antes de su introducción en el cristalizador o en el propio sistema de cristalización. Este debe oscilar entre 6.8-8.2 (4).
- Grado de sobresaturación: La sobresaturación es la fuerza impulsora que provoca la formación y posterior crecimiento de los cristales en una disolución. El grado de saturación de nitrógeno, fósforo y magnesio, debe ser la adecuada.
- Relación molar $\text{Mg}^{2+}:\text{PO}_4^{3-}$. Se ha demostrado que aumenta la eficiencia en la eliminación del fósforo si aumenta la relación Mg/P. Se plantea que la relación óptima Mg/P es 1.3 y que un exceso de magnesio en el medio no tiene un efecto significativo en la mejora del proceso de cristalización.
- Temperatura: La estruvita es térmicamente inestable a temperaturas superiores a los 50 °C y puede perder parte o todas las moléculas de amonio y agua en función de la temperatura alcanzada. Este factor influye tanto en la constante de solubilidad como en la velocidad de reacción, por lo que la precipitación de la estruvita es más difícil de obtener a altas temperaturas (5).

- Presencia de iones extraños: Se puede citar, por ejemplo, que la presencia del ion calcio puede perturbar la morfología y pureza del producto final, aunque no afecta a la precipitación del fósforo (6).

La interacción entre los iones calcio y magnesio puede inhibir la formación del fosfato de calcio o de la estruvita, en dependencia de las concentraciones relativas de estos iones (7).

Las vinazas de destilería son los efluentes líquidos más contaminantes del sector azucarero, por su gran volumen de generación, alta carga orgánica y color oscuro, lo que hace muy difícil su degradación.

La tabla 1 muestra la composición química promedio de las vinazas de destilerías en Cuba.

Tabla 1. Composición media de los residuales de alcohol, a partir de diferentes sustratos (8). Fuente: (9)

Determinación	Vinaza-Mieles	Vinaza-Jugos
DQO (g/l)	71. 20	35. 06
DBO (g/l)	30. 00	18. 00
pH	4.47	3.78
ST (g/l)	52. 67	24. 86
STF (g/l)	12. 61	4. 20
STV (g/l)	40.06	20.66
Sulfatos (g/l)	2.9	1.56
Nitrógeno (g/l)	0.21	0.38
Potasio (g/l)	2.5-4.3	0.13-1.5
Fósforo (g/l)	0.21	0.27
Calcio (g/l)	0. 55	0. 59
STV/ST(g/l)	0.75	0.83
Volumen (m ³ /t)	1.2	1.2

La composición de la vinaza reflejada en la tabla anterior, es una medida del potencial nutricional que presenta este residuo para la precipitación de estruvita. Según esta composición se puede determinar la posible precipitación espontánea en condiciones normales o, si por el contrario, debe añadirse magnesio en concentraciones adecuadas, que permita la precipitación de la estruvita.

La vinaza puede tratarse por diferentes métodos, biológicos o químicos; sin embargo, por ninguno de estos métodos se obtiene un producto realmente reutilizable, porque con la eliminación de los residuales también se eliminan minerales valiosos como el fósforo y el magnesio.

Ventajas del proceso ESTRUVIA

1. Recupera parte del fósforo de las aguas residuales y consigue, de esta forma:
 - Reducir el volumen de lodo que se produce
 - Reducir el contenido de fósforo en los lodos (ideal para aquellas zonas saturadas con fósforo y en riesgo de eutrofización).
2. Reduce costos de operación en las instalaciones.
 - Se evitan interrupciones en la operación, sobre costos y paradas no planificadas causadas por la precipitación no controlada de la estruvita en las tuberías.
 - Reduce el consumo de reactivos empleados para el tratamiento de las aguas residuales, como las sales de hierro y aluminio.
3. Es una solución para efluentes con alto contenido en fósforo.

Aplicaciones

- Tratamiento de efluentes ganaderos.
- En la industria de alimentación y bebidas, industrias lácteas, destilerías, mataderos, industria de procesamiento de la papa y, en general, en aquellas industrias donde se tratan los efluentes fermentados para su regeneración.
- En la industria agroquímica, fabricación de fertilizantes y biocombustibles.

CONCLUSIONES

La precipitación de la estruvita es un proceso apropiado para mitigar el efecto medioambiental de la vinaza y, a su vez, contribuir a aumentar el valor agregado de la agroindustria azucarera, con la obtención de un excelente fertilizante de liberación lenta.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. STRUVIA™. Recuperación sostenible de fósforo de las aguas residuales Veolia Water Technologies Spain. www.veoliawatertechnologies.es.
2. Doyle, J. D.; & Parsons, S. A. (2002). Struvite formation, control and recovery. *WaterResearch*, 36, 3925-3940.
3. Ariyanto, E.; Sen, T. K.; & Ang, H. M. (2014). The influence of various physico-chemical process parameters on kinetics and growth mechanism of struvite crystallisation. *Advanced Powder Technology*, 25, 682-694.
4. Fotidis, I. A.; Laranjeiro, T. F., & Angelidaki, I. (2016). Alternative co-digestion scenarios for efficient fixed-dome reactor biomethanation processes. *Journal of CleanerProduction*, 127, 610-617.
5. Lapeña, A. Recuperación de fósforo en forma de Estruvita a partir de la orina y el Agua de mar. 2014. Valencia. España.
6. Le Corre, K.S.; Valsami-Jones, E.; Hobbs, P.; Parsons, S.A. *Impact of calcium on struvite crystal size, shape and purity*. Journal of Crystal Growth. Vol. 283, No. 3-4, 2005, p. 514-522.
7. Battistoni, P.; Pavan, M.; Prisciandaro and F. Cecchi. *Water Res.* 2000, 35:3033.
8. Chanfón, J.M.; Yaniris Lorenzo, Y. Alternativas de tratamiento de las vinazas de Destilería. Experiencias nacionales e Internacionales. 2014. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar. ICIDCA. *Centro Azúcar Vol 41, No. 2, (pp. 56-67)*.

Determinación de alcoholes superiores por cromatografía de gases y espectrofotometría

Dacelis Borroto-Mato*, Magdalena Lorenzo-Izquierdo, Nancy Herrera-Marrero, Arlyn Reyes-Linares y Silvia Mato-Pérez

Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA)

Vía Blanca 804 y Carretera Central. San Miguel del Padrón. La Habana, Cuba.

*dacelis.borroto@icidca.azcuba.cu

RESUMEN

En el presente trabajo se establecieron procedimientos para la determinación de alcoholes superiores en bebidas alcohólicas destiladas por cromatografía gaseosa y una modificación al método espectrofotométrico descrito por la norma NC 535:2007, se compararon ambas técnicas a partir de una muestra real. Se analizaron las características de desempeño de los dos métodos, la sensibilidad de la técnica con límites de detección (entre 0.05 y 0.30 mg.L⁻¹) y cuantificación (entre 0.16 y 0.96 mg.L⁻¹). Se determinaron alcoholes superiores con un coeficiente de correlación mayor que el 0.99 y coeficiente de variación < 5 % para un nivel de confianza de 95 %. De la comparación entre los métodos se derivó que no existen diferencias significativas entre las precisiones alcanzadas por los métodos de trabajo con los estadígrafos de Fischer y de Student. Se logró validar un procedimiento analítico en cromatografía de gases y, que a su vez, fue comparable con el método espectrofotométrico.

Palabras clave: método cromatográfico, método espectrofotométrico, alcoholes superiores, 1-propanol.

ABSTRACT

Procedures for determination of higher alcohols by gas chromatography were established and a modification of spectrophotometric method described by NC 535: 2007 standard, in distilled alcoholic beverages. Both techniques were compared from a real sample. Performance characteristics of two methods, sensitivity of technique with detection limits (from 0.05 to 0.30 mg.L⁻¹) and quantitation (between 0.16 and 0.96 mg.L⁻¹) were analyzed. Higher alcohols were determined with a correlation coefficient greater than 0.99 and coefficient of variation < 5 % for a confidence level of 95 %. From comparison of methods was derived there is not significant differences between accuracies achieved by working methods using statisticians Fischer and Student. It was possible to validate an analytical procedure in gas chromatography and which in turn was comparable to spectrophotometric.

Key words: chromatographic method, spectrophotometric method, higher alcohols, 1-propanol.

INTRODUCCIÓN

La determinación de alcoholes superiores (AS) en bebidas alcohólicas es de gran interés para las diferentes destilerías del Grupo Empresarial AZCUBA. Una elevada concentración de estos alcoholes en los mostos puede ser prevista en la producción, durante el curso de la fermentación, y expresa la necesidad de contar con métodos de análisis precisos y exactos que permitan su identificación y cuantificación.

En la producción de algunas bebidas destiladas, los alcoholes superiores se consideran impurezas, y su concentración puede ser lo suficientemente elevada como para producir un desagradable sabor y olor penetrante. Estas concentraciones usualmente son determinadas en las fábricas, por

métodos espectrofotométricos que no consideran la concentración del 1-propanol. La adecuación de la técnica y su comparación con los resultados obtenidos por diferentes laboratorios, será de gran utilidad para establecerla como método de rutina.

El presente trabajo tiene como objetivos comparar los resultados obtenidos de alcoholes superiores por las dos técnicas: espectrofotométrica (NC-535 2007) (1) y cromatográfica (NC- 508:2011) (2) y determinar parámetros de linealidad, especificidad, exactitud (ensayo de recuperabilidad o recobrado) y límites de detección y cuantificación con procedimientos del Comité Nórdico de Análisis de Alimentos (NMKL) en la técnica analítica por cromatografía de gases, para evaluar las diferentes calidades de los alcoholes.

MATERIALES Y MÉTODOS

Método cromatográfico

Según la norma NC- 508:2011(2). Se empleó un cromatógrafo de gases modelo GC-17A (SHIMADZU, Japón, Kioto) con columna capilar CP-WAX 10 (60 m. x 0.25 mm d.i. 0.25 μ m espesor de película) con detector de llama (FID) y equipado con inyector automático.

- Gas portador: Hidrógeno 128 kPa.
- Temperatura de columna: 40 °C por 10 min., 40 °C a 70 °C a 5 °C/min.
- Temperatura del Inyector: 150 °C.
- Temperatura del Detector: 250 °C.
- Volumen de inyección: 1 μ l *Split* 1:25.

Como patrones se utilizaron acetaldehído, acetal, acetato de etilo, metanol, 1-propanol, 1-butanol, 2-metil-1-propanol, 2-metil-1-butanol, 3-metil-1-butanol y como estándar interno 1-pentanol, reactivos de la firma Sigma-Aldrich, E.E.U.U, con una pureza superior a 99 %. Estas son firmas productoras regidas por sistemas de gestión de la calidad certificados, según las normas ISO, con certificado de pureza y libre de otras impurezas de congéneres del etanol. El agua para el análisis cumplió con la norma (NC-ISO/IEC3696 2004) (3).

Método espectrofotométrico

A partir de la norma (NC-535 2007) (1), que tiene en cuenta como alcoholes superiores la suma de 2-metil-1-propanol y 3-metil-1-butanol, se propusieron modificaciones en cuanto a los patrones porque se incorporaron a la mezcla el 1-propanol y se variaron las concentraciones de estos en la curva patrón.

Reactivos y soluciones patrones

Se utilizaron reactivos de la firma Sigma-Aldrich, Alemania que tenían una pureza superior a 99 % en volumen y son los mismos que se describen en la norma citada. El agua para análisis cumplió con la norma (NC-ISO/IEC3696 2004) (3).

Las lecturas se realizaron a una longitud de onda de 540nm en un espectrofotómetro SPECORD 210 (Analytikjena, Alemania).

La concentración de alcoholes superiores se expresó en g/100 L de alcohol absoluto (AA).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Método cromatográfico

Se desarrolló la curva patrón de cinco concentraciones para cada uno de los compuestos mayoritarios, que exige la norma presente en estas matrices. Con estas condiciones se obtuvo una buena respuesta cromatográfica, con resolución entre picos ≥ 1 , que permitió conocer los tiempos de retención de cada compuesto. Los cromatogramas superpuestos de los 5 puntos de la curva se muestran en la figura 1.

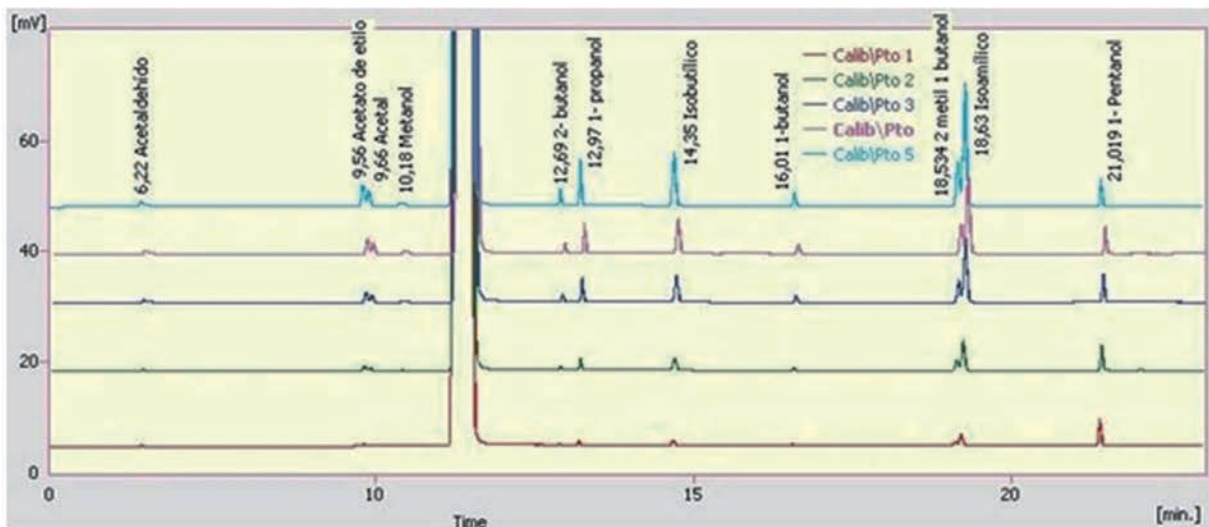


Figura 1. Cromatogramas de las concentraciones de los congéneres, más el estándar interno (1-pentanol) en la curva patrón.

Método espectrofotométrico

Se desarrolló la curva patrón de cinco concentraciones, con la mezcla de patrones seleccionados que conforman los alcoholes superiores (AS), con la mezcla de los patrones 1- propanol, 2-metil-1-propanol y 3-metil-1-butanol (figura 2).

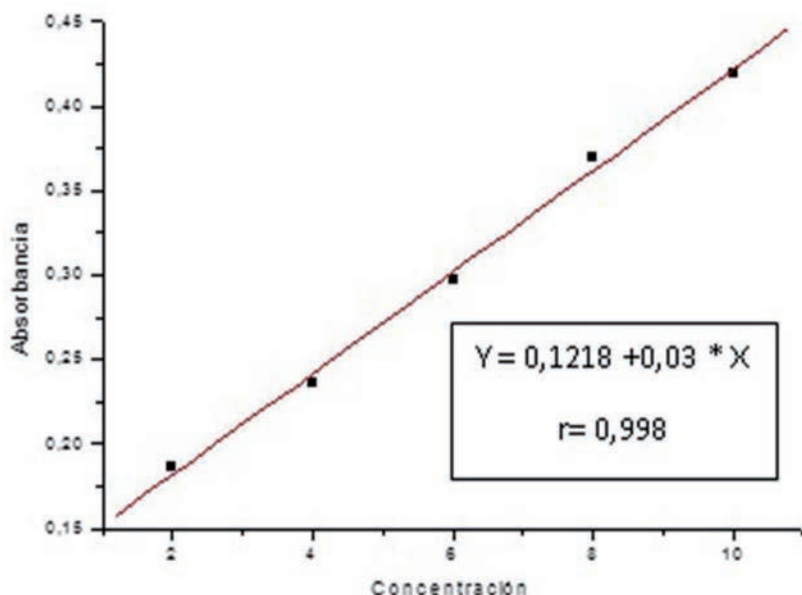


Figura 2. Curva patrón en la determinación de AS, por método espectrofotométrico.

El modelo obtenido es lineal, explica más del 99 % de la variabilidad de los datos, y los resultados indican una significativa relación lineal entre las absorbancias y los valores de las concentraciones. La pendiente tuvo una desviación típica relativa menor al 3 % y el término constante no fue significativamente distinto de cero, con un 99 % de confianza.

Comparación entre los métodos

Se realizaron modificaciones al método espectrofotométrico para que tuviera en cuenta el componente 1-propanol, en el rango de trabajo que exigía la norma (NC-535 2007) (1) y con estas modificaciones realizadas se analizaron muestras de alcohol rectificado con los dos métodos, el de componentes mayoritarios acreditado por CG y por el método alternativo de espectrofotometría, para realizar la comparación de ambos. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Muestras analizadas por los dos métodos

Muestras	AS por GC (g/100L de AA)	AS por UV (g/100L de AA)	Muestras	AS por GC (g/100L de AA)	AS por UV (g/100L de AA)
1	10.38	10.97	7	11.15	10.81
2	11.14	10.81	8	11.09	11.21
3	10.97	11.22	9	10.14	10.22
4	11.24	10.80	10	10.74	10.11
5	11.41	10.11	\bar{x}	10.93	10.73
6	10.99	10.98	S	0.40	0.43

Se evaluaron estadísticamente los resultados, mediante la prueba de significación de Fisher y la prueba de Student.

Prueba de Fischer

$$F_{exp} = 0.93 \quad F_{tab} = 3.18 \quad GL = 18 \quad p = 0.05$$

Como $F_{exp} \leq F_{tab}$ se puede establecer que no existen diferencias significativas entre las precisiones alcanzadas por los métodos de trabajo.

Prueba de Student

$$t_{exp} = 1.11 \quad t_{tab} = 2.10 \quad GL = 18 \quad p = 0.05$$

Al ser la $t_{exp} \leq t_{tab}$ indica que no existen diferencias significativas entre las medias de los métodos de trabajo.

Al analizar las medias y las desviaciones estándar de las muestras analizadas, con el método de componentes mayoritarios por CG acreditado y por el método alternativo de espectrofotometría, con las modificaciones propuestas a la norma (NC-535 2007) (1), no existen diferencias significativas entre los métodos de trabajo, lo que concuerda con los resultados del estudio de comparación realizado por Gregory (4) entre los métodos de cromatografía líquida y espectrofotometría.

CONCLUSIONES

Se determinaron decromatográfica y espectrofotométricamente alcoholes superiores, con un coeficiente de correlación mayor al 0.99, coeficiente de variación < 5 % para un nivel de confianza de 95 %. Se confirmando que los métodos son repetibles y reproducibles, teniendo en cuenta los

factores de variabilidad entre las muestras, días de experimentación y analistas. Las modificaciones propuestas a la NC 535:2007 ofrecen resultados confiables, al analizar los resultados obtenidos de alcoholes superiores, por las dos técnicas, Se puede establecer que no existen diferencias significativas entre las precisiones alcanzadas por los métodos de trabajo al utilizar los estadígrafos de “*F*” de Fischer y “*t*” de Student.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. NC-535:2007. Bebidas Alcohólicas. Determinación de alcoholes superiores- Método espectrofotométrico. ININ/Oficina Nacional de Normalización. Cuba.
2. NC-508.2011.Bebidas alcohólicas-Determinación de componentes volátiles mayoritarios en bebidas alcohólicas destiladas, aguardientes y alcohol etílico por cromatografía gas-líquido. Oficina Nacional de Normalización.pp.1-14.
3. NC-ISO/IEC3696.2004.Agua para uso en análisis de laboratorio-Especificación y método de ensayo.Oficina Nacional de Normalización.pp.1-12.
4. Gregory, B. S. 2001. Validación de la técnica analítica para la cuantificación de la nitroglicerina inyectable. Trabajo de diploma, Departamento de Farmacia, Instituto de Farmacia y Alimentos, Universidad de la Habana. Licenciatura en Farmacia.