

ICIDCA

sobre los derivados de la caña de azúcar

Volumen 49 No. 3 septiembre - diciembre 2015

ISSN - 0138-6204



Aplicación de crudos enzimáticos
de origen fúngico en la hidrólisis del
bagazo de caña de azúcar



Evaluación del aumento de la
digestibilidad en alimento para
ganado bovino



Acercamiento a la
automatización de la
producción de Fitomas-E
en el Icidca

Í N D I C E

Estudio de estabilidad del bioproducto Lebame

Grisel M. Ortega-Arias-Carbajal, María Elena Díaz de Villegas-Díaz de Villegas,
Grizel Delgado-Arrieta, Aidin Martínez-Sánchez

3

Aplicación de crudos enzimáticos de origen fúngico en la hidrólisis del bagazo de caña de azúcar

Zurima Menéndez-Ramírez, Julio Dustet-Mendoza, Iliana Sevilla-Fernández,
Lourdes Zumalacárregui-de Cárdenas, Mariam Martí-Tamayo

9

Tendencia de los principales parámetros del azúcar crudo durante los años 2001 a 2014

Roberto J. Rodríguez-Mambuca, Julián Rodríguez-López,
Jesús Mesa-Oramas

11

Evaluación del aumento de la digestibilidad en alimento para ganado bovino

Diana Isis LLanes-Gil López, Jorge Aurelio Lois-Correa,
María Elena Sánchez-Pardo

17

Predicción de la transferencia de masa en cultivos no-newtonianos de *Bacillus licheniformis*

Mariela Rizo-Porro, Nemecio González-Fernández, Luis B. Ramos-Sánchez

21

La quimiometría y la industria del azúcar y sus derivados

Estrella P. Zayas-Ruiz, Magdalena Lorenzo-Izquierdo,
Felipe O. Fragoso-Concepción

31

La generación y uso del hidrógeno para el suministro de caña a la industria azucarera

Antonio Valdés-Delgado

34

25 años de experiencia en la evaluación comparativa de la determinación de sacarosa por polarimetría y cromatografía líquida de alta eficiencia (HPLC) en miel final

Estuardo Edmundo Monroy-Benítez

37

Acercamiento a la automatización de la producción de Fitomas-E en el Icidca

Marlen Lorenzo-Maiquez, Gilberto Mesa-Mena, Félix Borroto-González

41

Evaluación energética de la integración del proceso de obtención de biobutanol en una destilería autónoma

Electo Eduardo Silva-Lora, José Carlos Escobar-Palacios,
David L. Vargas-Nuncira; Arnaldo Martín Martínez-Reyes,
Oscar Almazán del Olmo

47

Modelo con algoritmo genético para el diseño óptimo de una planta de producción de biogás a partir de cachaza

Erdwin García-Alvarez, José P. Monteagudo-Yanes, Julio R. Gómez-Sarduy

51

CONTENTS

3

Lebame bioproduct stability study

Grisel M. Ortega-Arias-Carbajal, María Elena Díaz de Villegas-Díaz de Villegas,
Grizel Delgado-Arrieta, Aidin Martínez-Sánchez

9

Application of enzymatic crudes from fungal origin in the hydrolysis of the sugarcane bagasse

Zurima Menéndez-Ramírez, Julio Dustet-Mendoza, Iliana Sevilla-Fernández,
Lourdes Zumalacárregui-de Cárdenas, Mariam Martí-Tamayo

11

Trends of main parameters of brown sugar from 2001 to 2014

Roberto J. Rodríguez-Mambuca, Julián Rodríguez-López,
Jesús Mesa-Oramas

17

Increased digestibility evaluation after alkaline treatment into supplemented food with wastes from the production of microbial transglutaminase and destined to cattle

Diana Isis Llanes-Gil López, Jorge Aurelio Lois-Correa,
María Elena Sánchez-Pardo

21

Prediction of mass transfer in non-Newtonian cultures of *Bacillus licheniformis*

Mariela Rizo-Porro, Nemecio González-Fernández, Luis B. Ramos-Sánchez

31

Chemo metrics and sugar cane industry and by products

Estrella P. Zayas-Ruiz, Magdalena Lorenzo-Izquierdo,
Felipe O. Fragoso-Concepción

34

Generation and hydrogen use for supplying sugar cane to factories

Antonio Valdés-Delgado

37

25 years of experience in comparative determination of sucrose by polarimetry and chromatography high efficiency (HPLC) in final molasses

Estuardo Edmundo Monroy-Benítez

41

An approach to the automation of Fitomas-E production at Icidca

Marlen Lorenzo-Maiquez, Gilberto Mesa-Mena, Félix Borroto-González

47

Energetic evaluation of the integration of bio butanol production process in an existing distillery

Electo Eduardo Silva-Lora, José Carlos Escobar-Palacios,
David L. Vargas-Nuncira, Arnaldo Martín Martínez-Reyes,
Oscar Almazán del Olmo

51

Modeling with genetic algorithm for design of a biogas plant from filter cake

Erdwin García-Alvarez, José P. Monteagudo-Yanes, Julio R. Gómez-Sarduy

Estudio de estabilidad del bioproducto Lebame

Grisel M. Ortega-Arias-Carbajal, María Elena Díaz de Villegas-Díaz de Villegas, Grisel Delgado-Arrieta, Aidin Martínez-Sánchez

Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar
Vía Banca 804 y Carretera Central. San Miguel del Padrón, La Habana, Cuba.
grisel.delgado@icidca.azcuba.cu

RESUMEN

En el Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (Icidca), se ha desarrollado a través de un proceso de fermentación sumergida, un bioproducto compuesto por microorganismos eficientes, que ha sido denominado como Lebame. El objetivo del presente trabajo es determinar la estabilidad de este bioproducto, en diferentes condiciones de almacenamiento durante 6 meses. Se estudiaron tres lotes del bioproducto almacenados en refrigeración (12 °C) y a temperatura ambiente (25-32 °C). Se analizó la concentración celular (bacterias y levaduras) y el comportamiento del pH. El factor tiempo presentó un efecto estadísticamente significativo sobre las pérdidas de microorganismos y sobre el pH, sin embargo la temperatura no mostró efecto significativo. Se detectaron ligeras pérdidas de microorganismos, que se incrementan significativamente hasta los 32 días de almacenamiento del Lebame. A tiempos superiores no se detectaron diferencias significativas. El bioproducto es estable por un período de 6 meses y se puede almacenar a temperatura ambiente.

PALABRAS CLAVE: microorganismos eficientes, microorganismos benéficos, estabilidad, Lebame, bioproducto.

ABSTRACT

In Cuban Research Institute of Sugarcane By-products (ICIDCA), have been developed a bioproduct constitute by efficient microorganisms through a submerged fermentation process, which has been called Lebame.

The aim of this study is to determine the stability of the Lebame bioproduct in different storage conditions during 6 months. Bioproduct three batches of stored refrigerated (12°C) and room temperature (25-32°C) were studied. Cell concentration (bacteria and yeasts) and pH are analyzed. The time factor presents statistically significant effect on losses microorganisms and on pH, but temperature shows no significant effect. Slight losses of microorganisms, which are significantly increased until 32 days of Lebame storage, at higher times significant differences were no detected. The bioproduct is stable for a period of 6 months and can be stored at room temperature.

KEYWORDS: effective microorganisms, beneficial microorganisms, stability, Lebame, bioproduct.

INTRODUCCIÓN

Los microorganismos eficientes (EM) fueron desarrollados en la década de los 80 por el profesor Teruo Higa, de la Universidad del Ryukyus en Okinawa, Japón, como una opción viable y sostenible para la producción agrícola y animal dentro de los parámetros orgánicos y biológicos, para no afectar al medio ambiente, así como para lograr productos de alta calidad con bajo costo (1-5). La

tecnología de producción de EM se ha extendido a más de 180 países (6-11) y sus campos de aplicación se han ampliado en la agricultura, el tratamiento de aguas, la gestión de residuos, la conservación del medio ambiente, los tratamientos de limpieza, salud animal y salud humana (12).

Investigaciones realizadas en relación con las aplicaciones de los EM en la agricultura han demostrado, entre otras, que la inoculación con los microorganismos contenidos en el EM, al eco-

sistema (constituido por el suelo y las plantas) permite mejorar la calidad y la salud de los suelos, así como el crecimiento, el rendimiento y la calidad de los cultivos.

Algunos efectos demostrados son que promueven la floración, el desarrollo de los frutos y la reproducción de las plantas, mejoran física, química y biológicamente el ambiente de los suelos y suprimen los patógenos y pestes que causan enfermedades, aumentan la capacidad fotosintética de los cultivos, aseguran mejor germinación, desarrollo de las plantas e incrementan la eficacia de la materia orgánica como fertilizante (13-17).

Los microorganismos eficientes (EM) o inoculantes microbianos son una mezcla concentrada de microorganismos benéficos presentes en ecosistemas naturales, sin manipulación genética, que incluyen tanto especies aeróbicas como anaeróbicas, del tipo fotosintéticas y cuyo logro es que coexistan y se complementen fisiológicamente unos con otros (1, 18).

Los EM contienen especies seleccionadas de microorganismos incluyendo poblaciones predominantes de bacterias ácido lácticas (*Lactobacillus plantarum*, *Lactobacillus casei*), levaduras (*Saccharomyces cerevisiae*, *Candida utilis*), bacterias fotosintéticas o fototrópicas (*Rhodospseudomonas plastrus*, *Rhodobacter spaeiroides*), actinomicetos (*Streptomyces albus*, *Streptomyces griseus*) y otros tipos de organismos como los hongos fermentadores (*Aspergillus oryzae*, *Mucor hiemalis*). Todos ellos, mutuamente compatibles unos con otros, coexisten en un cultivo líquido y ejercen una función específica o común (1,19).

El Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (Icidca), ha desarrollado un producto a través de un proceso de fermentación, compuesto por microorganismos eficientes, el cual ha sido denominado como Lebame.

La estabilidad de todo producto es uno de los parámetros requeridos para su uso y comercialización. El estudio de la estabilidad durante el almacenamiento de un producto, permite conocer su capacidad de variación o degradación en presencia de diferentes factores que afecten las características físicas, químicas y biológicas del mismo.

El objetivo del presente trabajo es determinar la estabilidad del producto Lebame, en diferentes condiciones de almacenamiento, por un período de 6 meses.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se realiza un proceso de fermentación sumergida, empleando los microorganismos *Bacillus*

subtilis B/23-45-10 Nato, *Lactobacillus bulgaricum* B/103-4-1, *Saccharomyces cerevisiae* L/25-7-12. Se incuban por separado cada uno de los microorganismos en su medio específico, posteriormente se crecen los tres en el medio de levadura.

La extensión del inóculo se realiza en condiciones anaerobias, en un medio con miel y sulfato de amonio, hasta el consumo de los azúcares reductores totales. Así se obtienen los lotes del producto Lebame que se envasan en frascos plásticos de 1 litro de capacidad, se cierran herméticamente y se almacenan a temperatura ambiente (25-32°C) y en refrigeración (12°C), por un período de 6 meses.

Determinaciones microbiológicas y analíticas

El conteo de microorganismos (bacterias y levaduras) y la determinación del pH se realizó según los reportes de la literatura (20 y 21).

Las pérdidas de microorganismos se determinaron a través del valor del logaritmo (base 10) del conteo celular, respectivamente.

Análisis estadístico de los resultados

Se utilizó el programa Statgraphics Centurion XV, 2007 (22), mediante un análisis Anova Multifactorial, teniendo en cuenta los factores: temperatura y tiempo. La prueba de múltiple rangos en cada caso se realizó mediante el método: 95,0 % LSD de Fisher.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El comportamiento celular, en lotes del producto LEBAME, almacenados en diferentes condiciones: refrigeración (12 °C) y temperatura ambiente (25-30 °C), por un período de aproximadamente 6 meses, se muestra en la tabla 1.

En general se puede señalar que el producto Lebame obtenido, resultó tener una población bacteriana entre 10^5 - 10^8 UFC. mL⁻¹ y una población de levaduras de 10^3 - 10^7 UFC. mL⁻¹ en las condiciones de almacenamiento estudiadas.

Un producto de microorganismos eficientes EM-1 ha sido reportado con un mínimo de los siguientes microorganismos (expresado en miles de UFC/mL en solución acuosa): bacterias ácido lácticas 1×10^4 y bacterias fotosintéticas 1×10^6 , levaduras 1×10^3 (7,8). La firma VMEMPROTEC, reporta para un producto de microorganismos eficaces una única concentración celular de 1×10^4 UFC/mL de los microorganismos mencionados (13).

Los resultados obtenidos en el presente estudio concuerdan con los reportes de la literatura para bioproductos de microorganismos eficientes (7-8,13 y 23).

Tabla 1. Conteo celular (UFC. mL⁻¹) en lotes de Lebame (valores promedio) en diferentes condiciones de almacenamiento

Número Lote	Tiempo (días)	Almacenamiento refrigeración (12 °C)		Almacenamiento temperatura ambiente (25 -32 °C)	
		Conteo de bacterias (UFC. mL ⁻¹)	Conteo de levaduras (UFC. mL ⁻¹)	Conteo de bacterias (UFC. mL ⁻¹)	Conteo de levaduras (UFC. mL ⁻¹)
1	0	1,00 x10 ⁸	5,00 x 10 ⁶	1,00 x 10 ⁸	5,00 x 10 ⁶
	32	7,00 x10 ⁶	4,00 x 10 ⁵	1,10 x 10 ⁷	4,00 x 10 ⁶
	170	1,60 x 10 ⁶	7,00 x 10 ⁵	1,75 x 10 ⁶	1,50 x 10 ⁵
	200	9,50 x 10 ⁶	4,50 x 10 ⁵	3,40 x 10 ⁵	5,00 x 10 ⁴
2	0	1,00 x 10 ⁸	5,00 x 10 ⁶	1,00 x 10 ⁸	5,00 x 10 ⁶
	32	7,20 x 10 ⁶	2,50 x 10 ⁵	1,20 x 10 ⁶	2,50 x 10 ⁵
	170	3,25 x 10 ⁶	2,00 x 10 ⁵	1,50 x 10 ⁶	6,00 x 10 ⁵
	200	3,85 x 10 ⁵	4,50 x 10 ⁴	7,45 x 10 ⁵	3,85 x 10 ⁵
3	0	4,00 x 10 ⁵	8,00 x 10 ⁶	5,35 x 10 ⁶	8,00 x 10 ⁶
	32	3,50 x 10 ⁵	1,55 x 10 ⁶	1,40 x 10 ⁶	4,00 x 10 ⁵
	170	1,60 x 10 ⁶	8,00 x 10 ⁵	1,10 x 10 ⁵	2,00 x 10 ⁵
	200	3,70 x 10 ⁷	1,80 x 10 ⁷	2,70 x 10 ⁷	1,00 x 10 ³

Tabla 2. Análisis de varianza para las pérdidas de bacterias y de levaduras

	Pérdidas de bacterias	Pérdidas de levaduras
Efectos principales	Valor ·P	Valor ·P
Temperatura	0,3309	0,0589
Tiempo	0,0090	0,0000

El tiempo en que una proporción dada de la población original de un producto permanece viable después del almacenamiento en las condiciones escogidas, se conoce como tiempo de vida útil o vida de estante, por lo cual para analizar el comportamiento celular durante el almacenamiento; a partir de los resultados anteriores, se calcularon las pérdidas de microorganismos en las dos condiciones de temperatura. Los resultados del análisis de varianza para las variables: pérdidas de bacterias y de levaduras se muestran en la tabla 2.

El valor de probabilidad P- del factor tiempo es menor que 0,05 en cada caso, por lo que este factor tiene un efecto estadísticamente significativo sobre las pérdidas de bacterias y de levaduras, con un 95,0 % de nivel de confianza respectivamente. Sin embargo el factor temperatura no muestra efecto significativo.

Los resultados de la prueba de múltiple rangos para las variables pérdidas de bacterias y pérdidas de levaduras, analizando los factores tiempo y temperatura, se muestran en la figuras 1-2 y 3-

4, respectivamente (letras diferentes muestran diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95,0 % de confianza).

Las pérdidas de bacterias (figura 1) y de levaduras (figura 3) se incrementan significativamente

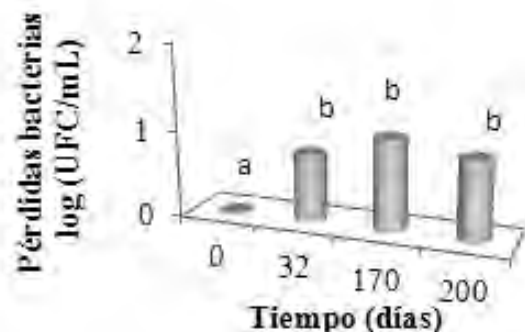


Figura 1. Pérdidas de bacterias con el tiempo.



Figura 2. Pérdidas de bacterias con la temperatura.

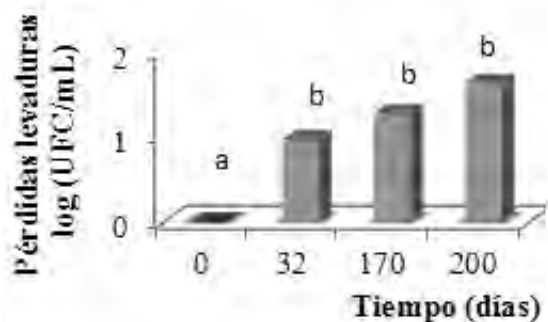


Figura 3. Pérdidas de levaduras con el tiempo.

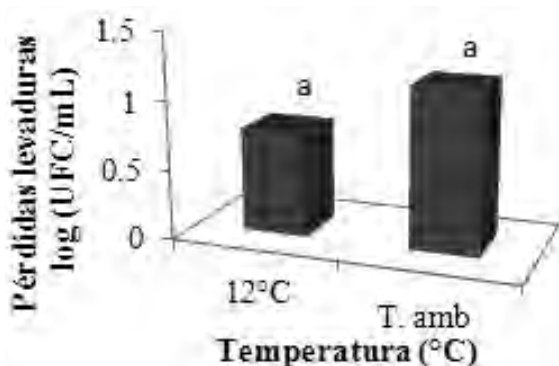


Figura 4. Pérdidas de levaduras con la temperatura.

te hasta los 32 días. A partir de este momento y hasta los 200 días no se observan diferencias significativas. En ningún caso se detectó un efecto significativo del factor temperatura (figuras 2 y 4).

Al analizar las pérdidas de microorganismos, se puede señalar que el producto se mantiene estable hasta cerca de los 6 meses en las condiciones de almacenamiento estudiadas, lo cual concuerda con reportes de FutureTech today (14), en los que se plantea que la vida de estante del EM-1 es de aproximadamente 6 meses. Otros reportes señalan que el EM es viable durante 180 días a temperatura ambiente (15). MOA (2003), refiere que el producto de microorganismos eficientes autóctonos, tiene una duración aproximada de 6 meses a partir de la fecha de envasado y que es conveniente almacenarlo en un lugar donde la temperatura sea constante, en la que haya poca variación entre el día y la noche (24). Por otra parte se reporta un tiempo de almacenamiento para el EM de aproximadamente un año, almacenado en un lugar fresco y mantenido el envase bien cerrado (11).

El comportamiento del pH durante el almacenamiento en diferentes condiciones, se muestra en la tabla 3.

Se puede señalar, que el producto Lebame tiene un valor de pH entre 3,78 y 4,14, valor este muy cercano al reportado por ENRO (9), que obtu-

Tabla 3. Comportamiento del pH en diferentes condiciones de almacenamiento

Lote	Tiempo (días)	pH (12°C)	pH (25-32°C)
1	0	3,86	3,86
	32	4,02	4,02
	170	4,05	3,98
	200	3,97	3,93
2	0	3,78	3,78
	32	3,98	3,97
	170	3,81	4,04
	200	4,02	4,10
3	0	4,08	4,08
	32	4,14	4,03
	170	4,07	4,03
	200	4,02	4,03

vo un pH entre 3,3 y 3,6. En los reportes de Future Techtoday, 2013, se considera que un indicador medible es si el producto tiene un pH superior a 4,0 (14).

Los resultados obtenidos del análisis de varianza para el pH, se pueden observar en la tabla 4.

Tabla 4. Análisis de varianza para el pH

Efectos principales	Valor -P
Temperatura	0,9001
Tiempo	0,0121

El factor tiempo resultó con un valor de P menor que 0,05, por lo que presenta un efecto estadísticamente significativo sobre el pH del producto Lebame, con un 95,0 % de nivel de confianza.

Los resultados de las pruebas de múltiples rangos para el pH, se muestran en las figuras 5 y 6.

El tiempo también presenta, en este caso, un efecto significativo sobre el pH, marcado desde el día inicial hasta los 32 días (figura 5); posterior-

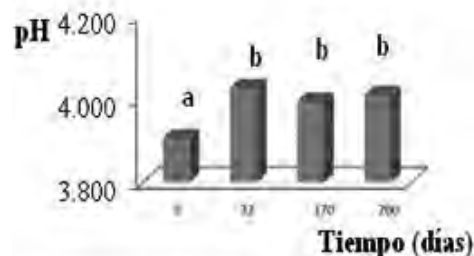


Figura 5. Comportamiento del pH en el tiempo.

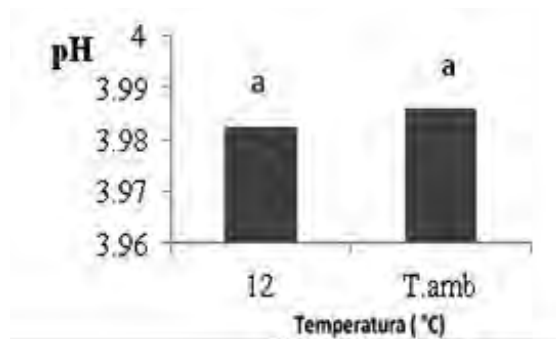


Figura 6. Comportamiento del pH con temperatura.

mente no se observan diferencias significativas. La temperatura no mostró efecto significativo

El producto Lebame es estable bajo las condiciones de trabajo estudiadas, hasta los 6 meses de almacenamiento. Se infiere que el producto puede ser almacenado a temperatura ambiente (25-30 °C), sin afectaciones, lo cual conllevaría a un ahorro desde el punto de vista económico, por no tener la

necesidad de contar con ambientes refrigerados para su almacenamiento.

CONCLUSIONES

El factor tiempo presenta efecto estadísticamente significativo sobre las pérdidas de microorganismos y sobre el pH, sin embargo la temperatura no muestra efecto significativo. Se detectan ligeras pérdidas de microorganismos, que se incrementan significativamente hasta los 32 días de almacenamiento del Lebame; con tiempos superiores no se detectan diferencias significativas. El bioproducto es estable por un período de 6 meses y se puede almacenar a temperatura ambiente.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al equipo de técnicos integrado por Gisela González, Silvia Armenteros y Emilia Bocourt, por su contribución con la ejecución de las determinaciones microbiológicas y analíticas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Salgado, L. Tecnología EM R- Microorganismos eficaces. Ecotecnologías [en línea]. <[http:// www.ecotecnologias.com.ve](http://www.ecotecnologias.com.ve)>. [2012].
2. Montañó, R. Gestión y Educación ambiental. SENA [en línea]. <<http://www.slideshare.net/Ichimande/los-microorganismos-eficientes-em#btnLast>> [2012]
3. Graswelt. Microorganismos útiles y efectivos para una agricultura sostenible y un medio ambiente saludable. <[http://www. Graswelt www.gral.de/](http://www.Graswelt.com)>. [Noviembre 2002].
4. Higa, T. Effective microorganisms: A biotechnology for mankind. In J.F. Parr, S.B. Hornick, and C.E. Whitman (ed.) Proceedings of the First International Conference on Kyusei Nature Farming. U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C., USA. p: 8-14. 1991.
5. Higa, T.; Wididana, G.N. The concept and theories of effective microorganisms.. In Parr, S.B. Hornick, and C.E. Whitman (ed.) Proceedings of the First International Conference on Kyusei Nature Farming. U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C., USA. p: 118-124.1991.
6. Bueno, G.; Díaz de Villegas, M.E.; Delgado, G.; Bell, A.; Martínez, A.; Ochoa, N. Estado del arte de la tecnología de los Microorganismos Eficientes. Informe ICIDCA. 2013.
7. ENRO. America Latina Activación del EMo1®.[en línea]. < <http://www.emla.com>> [2013a].
8. ENRO. ¿Qué es el EM-1?. EM Research Organization, Inc [en línea]., <<http://www.microorganismos-efectivos.com>>. [Marzo 2013 b].
9. ENRO. Respuestas a las primeras preguntas sobre EM. [en línea]. 2008a.
10. ENRO. Aplicación en la agricultura y beneficios de EM (pdf) [en línea]. 2008b.
11. ENRO. Prospecto Tecnología EM. EM Research Organization, Inc, <<http://www.microorganismos-efectivos.com>>. [27/Enero/2012].
12. Wordpress. Capacidades y aplicaciones de los Microorganismos Eficientes [en línea].<http://microorganismoseficientes.wordpress.com/category/microorganismos-com/activacion_del_emy1/>. php?idioma=1>. [Mayo 27,2013].
13. Vargas, M. VMEMPROTEC. Producción y Tecnología S.R.L. Microorganismos Eficaces en República Dominicana: Ficha Técnica, Información de EM-1® [en línea]. <<http://vmemprotec.blogspot.com/p/que-es-em.html>> [20 / marzo /2013].

14. Future Tech today. How would you like a non-toxic household cleaner, plant food, compost additive, and even a potential source for getting monatomic elements from rockdust. [en línea]. EMRO USA <<http://www.futuretechtoday.com/em>> [March 22. 2013.].
 15. Buenas Tareas.com. Microorganismos Eficaces-Em™. BuenasTareas.com. [en línea]. <<http://www.buenastareas.com/ensayos/Microorganismos-Eficaces-em/4739031.html>> [07/2012].
 16. Suárez Segura, D. M. Caracterización de un compuesto orgánico producido en forma artesanal por pequeños agricultores en el Departamento de Magdalena. Sede Palmira. Maestría en Ciencias Agrarias con énfasis en suelos. Universidad Nacional de Colombia. Santa Marta - Colombia. 2009.
 17. Peñafiel, B.R. Evaluación de diferentes dosis de Microorganismos Eficientes (ME) en el cultivo de pepino (*Cucumis sativus*) híbrido Atar Ha-435. [en línea]. <<http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/14617>>. [2005].
 18. Directorio de empresas ecológicas. Microorganismos efectivos [en línea]. <<http://www.ecototal.com/>> [2014].
 19. Andrew, K. Evaluación de abonos orgánicos y biofertilizantes líquidos para el desarrollo de plántulas de tomate (*Lycopersicum esculentum* Mill) bajo el sistema de cultivo protegido en Panamá. Tesis Magíster, CATIE. 2002.
 20. ICIDCA. Siembra de microorganismos en placas petri. PNO-M-En-10. Dirección Bioproductos ICIDCA. 2010.
 21. ICIDCA (a). Determinación de pH PNO-B-Eq-17. Dirección Bioproductos ICIDCA. 2010.
 22. Statgraphics. Programa Statgraphics. Centurion XV. 2007.
 23. ENRO ¿Qué es el EM-1?. [en línea]. <http://www.microorganismos-efectivos.com>. [Marzo/2015].
 24. MOA. (2003). MokitiOkada. Extracto del manual "Microorganismos Eficaces EM en la agricultura Nacional". Sp. En: "Evaluación de microorganismos eficientes autoctonos aplicados en el cultivo de cebolla blanca (*Allium fistulosum*)" de Toalombo Iza R.M. Trabajo de investigación estructurado de manera independiente presentado como requisito para optar el título de Ingeniera Agrónoma Universidad Técnica de Ambato, Facultad de Ingeniería Agronómica Cevallos-Ecuador .2012.
-

Aplicación de crudos enzimáticos de origen fúngico en la hidrólisis del bagazo de caña de azúcar

Zurima Menéndez-Ramírez, Julio Dustet-Mendoza, Iliana Sevilla-Fernández,
Lourdes Zumalacárregui-de Cárdenas, Mariam Martí-Tamayo

Grupo de Análisis de Procesos, Facultad de Ingeniería Química, Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría" (CUJAE). Calle 114 No. 11901 e/ Ciclovía y Rotonda, Marianao, La Habana, Cuba.
zmenendez@quimica.cujae.edu.cu

RESUMEN

Se evaluó la influencia de crudos de enzimas celulasas y sus mezclas sobre la producción de glucosa en la hidrólisis del bagazo de caña de azúcar (BCA), pretratado con hidróxido de sodio (NaOH) al 3 % p/v. Para esto se empleó un diseño simple centroide. Las condiciones de hidrólisis enzimática corresponden con una temperatura de 50 °C, una velocidad de agitación de 100 min⁻¹, pH = 4,8 y concentración de enzimas y crudos de 10 UPF/g de celulosa en un volumen total de mezcla de 50 mL. Como resultado la mezcla H1 formada por dos crudos enzimáticos (provenientes de las cepas J1 y C6) produjo cantidades de glucosa similares a las obtenidas con enzimas comerciales como patrón. Se seleccionó la misma como la mejor dentro de las diferentes combinaciones que se probaron.

PALABRAS CLAVE: bioetanol, celulasas, hidrólisis enzimática.

ABSTRACT

The influence of the crude cellulases enzymes and its mixtures on the production of glucose in the hydrolysis of the sugarcane bagasse (BCA), pre-treated with sodium hydroxide (NaOH) (3 % w/v) was evaluated. A simple centroid design was used. The conditions of enzymatic hydrolysis were: temperature (50°C), agitation speed (100 min⁻¹), pH= 4.8, and enzymes and crude concentration of 10 FPU/g of cellulose in a total volume of mixture of 50 mL. As a result the mixture H1 of two enzymatic crudes (from the strains J1 and C6) produce similar quantities of glucose to the obtained with commercial enzymes like standard. Selecting the same one like the best amount the different combinations evaluated.

KEYWORDS: bioethanol, cellulases, enzymatic hydrolysis.

INTRODUCCIÓN

La producción de bioetanol por vía fermentativa es una alternativa para paliar la disminución de reservas de combustibles fósiles y la formación de un ambiente con niveles altos de contaminación (1). Esta vía supone fermentar monómeros obtenidos en la hidrólisis de la celulosa y hemicelulosa. La hidrólisis enzimática es preferida por la

alta especificidad de las enzimas, entre otras ventajas, aunque es necesario reducir el costo actual de las enzimas por 4,55 L de etanol para que el proceso sea económico (2).

Se propone determinar la influencia de crudos de enzimas celulasas y sus mezclas sobre el rendimiento de glucosa en la hidrólisis del bagazo de caña de azúcar (BCA), pretratado con hidróxido de sodio (NaOH).

METODOLOGÍA

El BCA cubano se pretrató con NaOH al 3 % p/v a una relación sólido: líquido de 1:10, temperatura de 121°C durante 1 hora en autoclave. Luego se lavó cinco veces con agua destilada, a la que se añadieron unas gotas de ácido sulfúrico diluido para disminuir el pH hasta valores entre 5 y 6. Los bagazos sin tratar y tratado se caracterizaron mediante técnicas del NREL (3, 4). En la hidrólisis enzimática se utilizaron crudos de las cepas de hongos 6 y 13 aisladas (5), la cepa 27 (*Trichoderma viride*) aislada (6) y la cepa J1 (*Aspergillus niger*) aislada (7). Como control se emplearon las enzimas NS50013 y NS50010 de la NOVOZYMES (www.biomass.novozymes.com). La reacción se realizó a 50 °C, 100 min⁻¹, pH = 4,8, con solución tampón de citrato de sodio 0,05 mol/L. Se fijó una concentración de enzimas y crudos de 10 UPF/g de celulosa y un volumen total de mezcla de 50 mL. La concentración de glucosa se determinó por cromatografía líquida de alta resolución. El diseño de experimento utilizado fue simple centroeide empleando el programa computacional Design-Expert 8.0.7.1. Se realizaron 15 corridas de hidrólisis enzimática. La variable respuesta fue la concentración de glucosa a las 24 horas donde se alcanza el mayor incremento de concentración en el tiempo.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Del análisis de los valores mostrados en la tabla 1, utilizando la función deseabilidad del Design-Expert 8.0.7.1, se determinó que la mezcla H1 es la de mejor resultado. Otra de sus ventajas es que necesita solamente dos tipos de crudos para su conformación.

La comparación de medias de los resultados obtenidos en la hidrólisis enzimática utilizando la mezcla H1 y el control, mostró que no existen dife-

Tabla 1. Resultados de concentración de glucosa obtenidos a las 24 horas de hidrólisis enzimática

Mezcla de crudos y enzimas	Media de la concentración de glucosa (g/L)
H1(J1+C6)	2,31±0,14
H2(J1+C6+C13)	1,98±0,29
H3(J1+C6+C13+C27)	2,36±0,48
H4(C6)	1,55±0,09
H5(C13)	1,11±0,31
H6(C13+C27)	2,61±0,39
H7(C27)	1,92±0,17
H8(C6+C27)	1,99±0,55
H9(J1+C6+C27)	1,13±0,10
H10(J1+C13)	0,641,69±
H11(J1)	1,68±0,04
H12(J1+C13+C27)	2,48±1,78
H13(C6+C13+C27)	2,64±1,07
H14(C6+C13)	1,43±0,46
H15 (J1+C27)	0,65±0,70
Control (NS50013 + NS50010)	3,5±0,27

rencias significativas entre ellos. Este resultado es positivo teniendo en cuenta que la mezcla de enzimas de las cepas C6 y J1 está formada por crudos de enzimas de cepas de origen cubano.

CONCLUSIONES

De las mezclas de crudos enzimáticos para la producción de glucosa, se seleccionó como resultado más adecuado el de la mezcla H1 que garantiza rendimientos similares al obtenido con enzimas comerciales y favorece la economía del proceso reduciendo el número de crudos a utilizar.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Goshima, T.; Tsuji, M.; Inoue, H.; Yano, S.; Hoshino, T.; Matsushika, A. (2013). *Bosci Biotechnol Biochem*, 77(7), 1505-1510.
2. Sarkar, N.; Kumar, S.; Bannerjee, S.; Aikat, K. (2012). *Renewable Energy* 37 19-27.
3. Sluiter, A.; Ruiz, R.; Scarlata, C.; Sluiter, J.; Templeton, D. (2008). Technical Report NREL/TP-510-42619.
4. Sluiter, A.; Hames, B.; Ruiz, R.; *et al.* (2008). Technical Report NREL/TP-510-42618.
5. Ferrer, Y. (2010). Comunicación Personal.
6. Valiño, E.. (1999). Tesis de Doctorado. Instituto de Ciencia Animal, La Habana.
7. Dustet, J. (1999). Tesis de Doctorado. Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría", Ciudad de La Habana.

Tendencia de los principales parámetros del azúcar crudo durante los años 2001 a 2014

Roberto J. Rodríguez-Mambuca, Julián Rodríguez-López, Jesús Mesa-Oramas

Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar
Vía Banca 804 y Carretera Central. San Miguel del Padrón, La Habana, Cuba
roberto.rmambuca@icidca.azcuba.cu

RESUMEN

Se procesaron las muestras periódicas enviadas (la cantidad depende de los días de zafra que trabaje la empresa, con un mínimo de tres por zafra) por las diferentes unidades empresariales de base para el control de la calidad del azúcar crudo, refino y las mieles.

El objetivo de este trabajo, es mostrar la tendencia de los principales parámetros, medidores de la calidad del azúcar crudo en Cuba en el periodo 2001-2014.

PALABRAS CLAVE: azúcar crudo, calidad, análisis azucarero.

ABSTRACT

Periodic samples sent (the amount depending of the processing days of the sugar mill with a minimum of 3 samples per annum) by the different sugar mills for the quality control of raw, refined sugars and molasses produced are processed. The aim of this paper is to show the tendency of the main quality parameters for brown sugar in Cuba for the period 2001 - 2014.

KEYWORDS: raw sugar, quality, sugar analysis.

INTRODUCCIÓN

Como parte de la política de calidad del sector, el Leycal es el encargado de procesar las muestras periódicas enviadas (la cantidad depende de los días de zafra que trabaje la empresa, con un mínimo de tres) por las diferentes Unidades Empresariales de Base (UEB) para el control de la calidad del azúcar crudo, refino y las mieles producidos, a las que se les realizan las once determinaciones fundamentales del sector.

En correspondencia con lo anterior y dado el carácter global de los resultados de las determinaciones antes mencionadas se refleja el impacto del tipo de variedad, el método de corte y la transportación, entre otros. El objetivo de este trabajo, es mostrar cómo se ha comportado el promedio nacional de los principales parámetros, medidores de la calidad en el periodo 2001-2014.

MATERIALES Y MÉTODOS

El Leycal (laboratorio de ensayos y calibraciones de los alimentos) es un laboratorio de referencia nacional, por lo que el envío de muestras, está regulado por la instrucción (ins lab 9-11) que dispone que no deben ser menos de tres para aquellos que estén en producción hasta 90 días o menos y una mensual para aquellos que laboren más de 100 días.

Las muestras se anotan en un registro al respecto, con todos los datos enviados por el cliente, y reciben una clave para identificarlas, que es desconocida por los técnicos, quienes posteriormente proceden con los análisis correspondientes.

Se realizan los siguientes análisis: humedad, pol, partículas ferromagnéticas, ceniza, color ICUMSA, color Horne (no es oficial, pero se determina por su rapidez y economía y sirve de refe-

rencia), reductores, insolubles, tamaño de grano, dextrana y almidón, de acuerdo con los procedimientos de trabajo establecidos en el Sistema de Gestión de la Calidad del Leycal, según NC: ISO/IEC 17025,2006 (1).

Las técnicas empleadas, son las recomendadas por el ICUMSA o validadas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Comportamiento de los índices de calidad

Polarización y humedad

La polarización (pol) y la humedad son magnitudes que exhiben una relación recíproca (a menor humedad, mayor pol y viceversa), cuya importancia radica en que la primera disminuye por deficiencias agrícolas e industriales tales como exceso de materia extraña, corte fuera de fecha y molida de caña atrasada; en tanto el incremento en la segunda se debe a la mala calidad de la materia prima (2), el exceso de viscosidad en las masas y el deficiente trabajo en la centrifuga lo que favorece el desarrollo microbiológico y el deterioro químico (3, 4).

Para la determinación de estos indicadores se utiliza, en el caso de la pol, el método de la masa normal y el gravimétrico, para la humedad (5, 6).

Los resultados promedios en cada zafra del período 2001-2014 se muestran en la figura 1

En la figura 1 se evidencia que:

- Los años con menor porcentaje de pol son 2002 y 2003 con 98,84 °Z y 98,82 °Z, respectivamente. La empresa con el menor porcentaje de pol fue Ciego de Ávila con 98,57 °Z, en ambos años y la de mayor porcentaje de pol le correspondió a Pinar del Río con 99,10 °Z.
- El valor mayor de pol corresponde al año 2013 con 99,19 °Z, la empresa con el mayor porcentaje de pol fue Pinar del Río con 99,39 °Z y las de menor porcentaje de pol fueron Holguín y Granma., ambas con 99,10 °Z. Al año 2013 le corresponde la menor desviación típica, lo que indica que fue el mejor

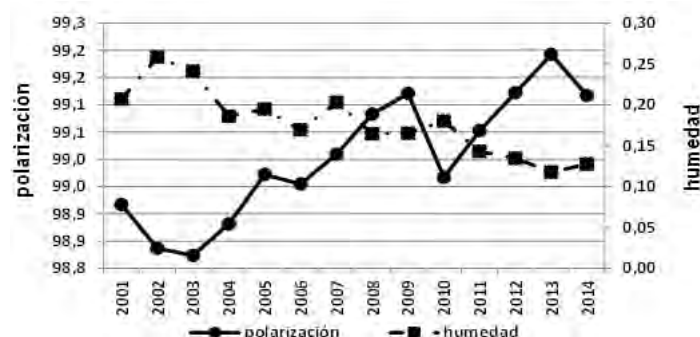


Figura 1. Comportamiento promedio nacional de la pol y la humedad (2001-2014).

año de trabajo en conjunto de todas las UEB, respecto a la polarización.

- Al evaluar las empresas, considerando el promedio 2001- 2014; la empresa de menor promedio de pol fue Granma con 98,89 °Z y la de mayor promedio le correspondió a Pinar del Río con 99,22 °Z.
- La pol cumple con la norma (mínimo de 99,00 °Z) a partir del año 2007 (excepto el año 2010).
- Los últimos cinco años muestran un incremento de la pol, a razón de 0,044 % por año.
- El año de mayor contenido de humedad fue el 2002 con 0,26 %. Ese año la empresa con el mayor porcentaje de humedad fue Ciego de Ávila con 0,34 % y la de menor porcentaje de humedad fue Pinar del Río con 0,21 %.
- El año de menor contenido de humedad fue el 2013 con 0,12 %. Ese año la empresa con el menor porcentaje de humedad fue Pinar del Río con 0,08 % y la de mayor porcentaje de humedad le correspondió a Cienfuegos con 0,15 %.
- Si se analiza el promedio 2001-2014, la empresa de mayor contenido de humedad fue Granma con 0,21 % y la de menor contenido fue Pinar del Río con 0,14 %.
- El promedio nacional de humedad cumple con la norma establecida (mínimo 0,20 % de humedad) a partir del año 2004.
- Los últimos cinco años muestran una disminución de la humedad a razón de 0,013 % por año.

Color Horne y fotocolorimétrico

El color de los azúcares, define su calidad para ser refinada (7, 8), pues este puede ser afectado por varias causas, las más frecuentes son: mala calidad de la materia prima; presencia de materias extrañas; exceso de cal; alta retención de materiales en proceso, bajo brix de la meladura y temperatura del agua de lavado.

En la práctica se utilizan dos métodos: uno menos costoso y rápido (color Horne) basado en la comparación visual de la solución de ensayo con una escala de colores preparada por dilución de una solución de caramelo, utilizada como referencia (5,6) y otro más preciso que emplea la determinación fotocolorimétrica de color en una solución de azúcar crudo (GS1-7) (5) Este último es un método catalogado como oficial por la ICUMSA. Los resultados promedios en las zafas del período 2001-2014 se muestran en la figura 2.

De la figura 2 se pueden extraer varias conclusiones:

- El año con mayor valor de color Horne le correspondió al 2002 con 20 (UCH), ese año la empresa con el mayor valor fue Ciego de Ávila con 25 UCH y las de menor color Horne fueron Pinar

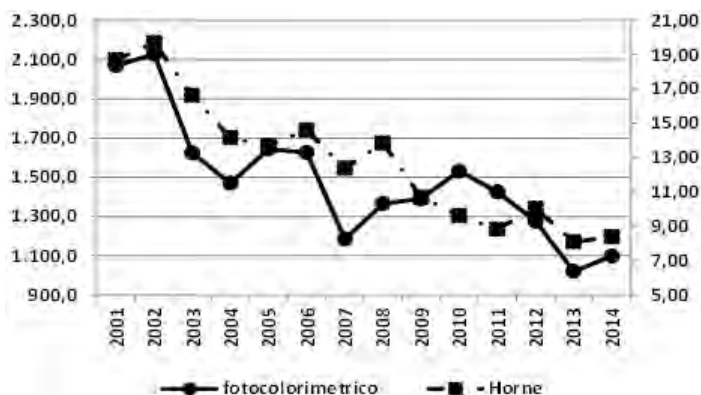


Figura 2. Comportamiento promedio nacional del color (2001-2014).

del Río y La Habana con 16 UCH cada una, seguidos de cerca por Villa Clara y Santiago de Cuba con 17 UCH, respectivamente.

- El año con el menor valor promedio de color Horne fue el 2013 con 8 UCH; la empresa con el mayor valor de color Horne fue Holguín con 10 UCH y la del menor valor de color Horne fue Pinar del Río con 6 UCH.
- Al evaluar las empresas, considerando el promedio 2001- 2014, la empresa de mayor promedio de color Horne fue Guantánamo con 16 UCH y la de menor promedio le correspondió a Pinar del Río con 9 UCH, respectivamente.
- El color Horne cumple con la norma establecida (máximo 13 UCH) a partir del año 2007 en adelante (excepto el año 2008).
- Los últimos cinco años muestran una disminución de 0,321 UCH por año.
- El año con mayor color fotocolorimétrico le corresponde al 2002 con 2 126 unidades de color ICUMSA (UCI). En dicho año la empresa con el mayor valor de color ICUMSA fue Ciego de Ávila con 2 669 UCI y la de menor valor fue La Habana con 1 727 UCI.
- El año de menor color fotocolorimétrico fue el 2013 con 1 021 UCI. En este año la empresa con el mayor valor de color ICUMSA fue Holguín con 1 253 UCI y la de menor color ICUMSA fue Pinar del Río con 822 UCI.
- Al evaluar las empresas, considerando el promedio 2001 - 2014, la empresa de mayor color ICUMSA fue Guantánamo con 1 740 UCI, la empresa de menor color ICUMSA fue Pinar del Río con 1 172 UCI.
- El promedio nacional de color fotocolorimétrico cumple con la norma nacional de un máximo de 1 500 UCI a partir del año 2007 hasta la fecha con la excepción del año 2010 que ascendió a 1 531 UCH.
- Los últimos cinco años muestran una disminución de 127 UCI por año.

Almidón y dextrana

La presencia de almidón se incrementa por mala calidad de la materia prima, exceso de cal empleada, clarificación deficiente y alto contenido de cogollo en la caña que va al basculador, en tanto la dextrana se favorece por la mala calidad de la materia prima y la falta de higiene en el central, al mismo tiempo que ocasiona diversos inconvenientes a escala industrial, tales como: el aumento de la viscosidad de los productos intermedios; la dificultad en la cristalización; el aumento del deterioro de las mieles y la afectación del proceso de refinación.

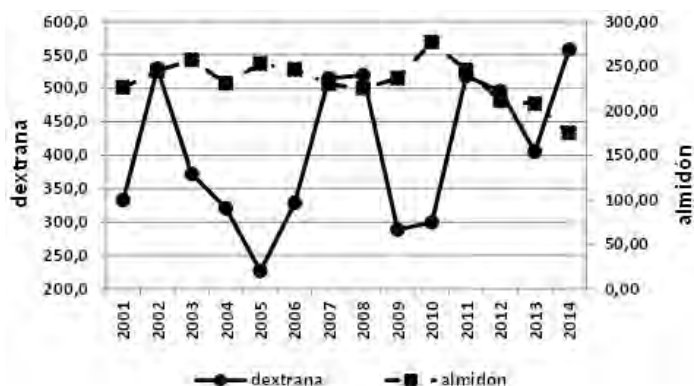


Figura 3. Comportamiento de promedio nacional del almidón y la dextrana (2001-2014).

Desde el punto de vista analítico, la determinación de almidón se basa en el método de yoduro-yodato, para formar el complejo azul almidón-yodo (5, 6), en tanto la caracterización de la presencia de dextrana se cimienta en la poca solubilidad de la dextrana en solución hidroalcohólica y su posterior medición de la turbidez (5, 6). La aplicación de estas técnicas, condujo a los resultados que se muestran en la figura 3, donde se aprecia lo siguiente:

- La concentración de almidón exhibe una cierta oscilación cíclica con un período de cuatro años y una tendencia en los últimos años a su disminución paulatina.
- El año con el mayor valor de almidón fue el 2010 con 277 mg/kg. En ese año la empresa con mayor promedio de almidón fue Cienfuegos con 410 mg/kg y la de menor promedio fue Santiago de Cuba con 190 mg/kg.
- El año con el menor valor de almidón fue el 2014 con 175 mg/kg. En ese año las empresas con mayor promedio de almidón fueron Matanzas y Cienfuegos con 218 mg/kg y la de menor promedio fue Guantánamo con 122 mg/kg.
- Al evaluar las empresas considerando el promedio 2001- 2014; las empresas de mayor promedio de almidón fueron Matanzas con 303 mg/kg y Cienfuegos con 300 mg/kg y la de

menor promedio fue Guantánamo con 162 mg/kg.

- La norma de almidón (máximo 350 mg/kg) se ha cumplido durante el período de 14 años considerado.
- Los últimos cinco años muestran una disminución del almidón a razón de 24,2 mg/kg por año.
- El comportamiento de la dextrana es cíclico, observándose tres de ellos. El primero comprende los años 2001-2006, el segundo 2007-2010 y el tercero 2011-2014 que no parece haber concluido.
- El año de mayor valor de dextrana correspondió al 2014 con 558 ppm. En ese año la empresa con mayor valor de dextrana fue Las Tunas con 1013 ppm y la de menor valor fue Pinar del Río con 239 ppm.
- El año de menor valor de dextrana fue el 2005 con 227 ppm. En ese año la empresa con el mayor valor de dextrana fue Santiago de Cuba con 426 ppm y la de menor valor fue Granma con 143 ppm.
- Al evaluar las empresas considerando el promedio 2001- 2014; la empresa de mayor promedio de dextrana le correspondió a Las Tunas con 577 ppm y la de menor promedio a Pinar del Río con 229 ppm.
- La norma de dextrana se incumple de forma generalizada con la excepción de los años 2005, (227 ppm); 2009, (289 ppm) y 2010 (299 ppm).

Azúcares reductores e insolubles

Los azúcares reductores por encima de cierto valor (>0,50 %) tienden a reducir la pol, incrementan el color, afectan la cristalización y favorecen el deterioro del azúcar almacenada, aparecen cuando se muele caña atrasada o que no haya madurado lo suficiente, cuando no se trabaja a la temperatura y vacío estipulado o no se mantienen los pH que corresponden; en tanto los insolubles que acompañan al azúcar son fundamentalmente: sales que contiene la cal que se utiliza en la clarificación, aquellas que logran pasar de los jugos al azúcar y el bagacillo, entre otros.

La presencia de cenizas influye en la mala calidad de la materia prima, el exceso de cal empleada, la clarificación deficiente y el alto contenido de cogollo que va al basculador, así como hay autores (9) que afirman que los afinados con ceniza por encima del 0,3 %, dificultan la decoloración.

Para la determinación de los azúcares reductores se emplea un método basado en la propiedad que posee el cobre II acomplejado en medio alcalino, de oxidar a los azúcares reductores (MACU-2006) (6). Para la medición de insolubles se utiliza la filtración a presión reducida (6). En la figura 4 se muestran los resultados de estas determinacio-

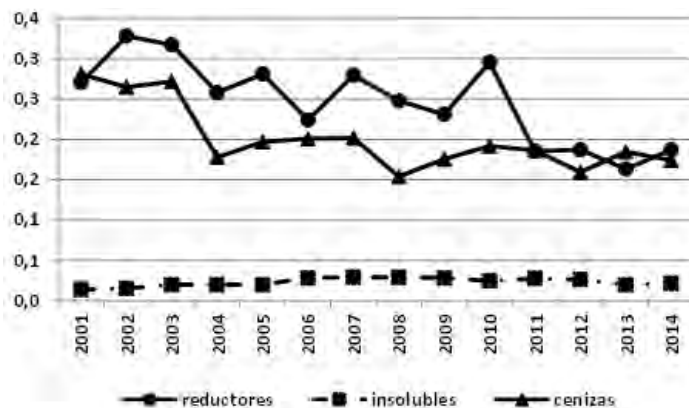


Figura 4. Comportamiento del promedio de azúcares reductores, insolubles y cenizas (2001-2014).

nes y para la ceniza se emplea la conductividad específica de una solución acuosa de la muestra (5, 6), donde se evidencia que:

- El año de mayor porcentaje de reductores le correspondió al año 2002 con 0,33 %. En dicho año la empresa con el mayor valor fue Ciego de Ávila con 0,50 % y la de menor valor Pinar del Río con 0,21 %.
- El año con el menor valor de reductores fue el 2013 con 0,16 %, en dicho año la empresa con el menor valor de reductores fue Ciego de Ávila con 0,12 % y el mayor valor le correspondió a Matanzas con 0,21 %.
- El promedio nacional de reductores cumple con la norma hasta la fecha, excepto los años 2002 y 2003.
- Los cuatro últimos años coinciden con los mejores resultados en la disminución del porcentaje de reductores: disminuyó a razón de un 0,01 % por año.
- Los años con el mayor valor de insolubles correspondió al 2007 y al 2008 con 0,029 %.
- El año con el menor valor de insolubles fue el 2001 con 0,014 %. En dicho año las empresas con los mayores valores de insolubles fueron Pinar del Río, Matanzas, Cienfuegos, Holguín y Guantánamo con 0,02 % y las de menor valor fueron La Habana, Villa Clara, Sancti Spiritus, Ciego de Ávila, Camagüey, Las Tunas, Granma y Santiago de Cuba con 0,01 %.
- Al evaluar las empresas, considerando el promedio 2001- 2014; la empresa de mayor promedio de insolubles fue Guantánamo con 0,031 % y la de menor promedio fue Granma con 0,16 %.
- Aunque el gráfico muestra una cierta tendencia a subir paulatinamente, hasta la fecha se ha cumplido ininterrumpidamente con la norma de porcentaje máximo de insolubles (0,04 %).
- Durante los últimos cinco años los valores de insolubles han oscilado entre 0,028 y 0,02 %.
- El año del mayor valor de porcentaje de ceniza correspondió al 2001 con 0,28 %, en ese año la

- empresa con el mayor valor de ceniza fue Holguín con 0,36 % y las empresas de menor valor fueron La Habana, Villa Clara, Sancti Spiritus y Camagüey con 0,25 %.
- El año del valor más bajo de la ceniza fue el 2008 con 0,15 %; en dicho año la empresa de mayor valor de ceniza fue Ciego de Ávila con 0,20 % y las de menor valor de ceniza fueron Pinar del Río y Cienfuegos con 0,12 %.
- Al evaluar las empresas considerando el promedio 2001- 2014; la empresa de mayor promedio de ceniza fue Holguín con 0,25 % y el menor promedio correspondió a Pinar del Río, Villa Clara, Camagüey y Santiago de Cuba con 0,18 %.
- Se cumple con la norma de ceniza (máximo de 0,20 %) a partir del año 2004. De ahí en adelante se muestra un comportamiento oscilante entre 0,15 y 0,19 %.

Partículas ferromagnéticas y granulometría

Estos indicadores de calidad del azúcar crudo necesitan una separación previa, empleando principios físicos que pueden resumirse como se indica en la tabla 1 y cuyo comportamiento se muestra en la figura 5, donde se aprecia lo siguiente:

- Los años del mayor valor de las partículas ferromagnéticas fueron 2001 y 2006 con 11 mg/kg. En el 2001 la empresa con el mayor valor de partículas fue Matanzas con 27 mg/kg y la de menor valor fue Santiago de Cuba con 3 mg/kg. En el 2006 la empresa con el mayor valor de partículas fue Holguín con 19 mg/kg y la de menor valor fue Villa Clara con 5 mg/kg.
- El año del menor valor de partículas fue el 2013 con 6 mg/kg; en ese año la empresa con el mayor valor de partículas fue Cienfuegos con 15 mg/kg y la de menor valor fue Guantánamo con 2 mg/kg.
- Al evaluar las empresas considerando el promedio 2001- 2014, la empresa de mayor promedio de partículas ferromagnéticas fue Matanzas con 15 mg/kg y la de menor promedio fue Villa Clara con 4 mg/kg.
- La norma de partículas ferromagnéticas se incumple en 13 años, de los 14 analizados, siendo el año 2013 la excepción.

- En partículas ferromagnéticas se observa un comportamiento oscilante entre 11 y 8 mg/kg en el período analizado.
- El año del mayor porcentaje sobre malla 20 correspondió al 2004 con 70 %. En ese año la empresa con el mayor valor fue Villa Clara con el 77 % y las de menores valores fueron Matanzas y Camagüey con el 64 %.
- Los años con el menor porcentaje sobre malla 20 son: 2008 y al 2010 con el 57 %. En el año 2008 la empresa con el mayor valor sobre malla 20 fue Sancti Spiritus con el 67 % y el menor valor fue de Matanzas con el 46 %. En el año 2010 la empresa con el mayor valor sobre malla 20 fue Sancti Spiritus con el 71 % y la de menor valor fue la empresa de La Habana con el 45 %.
- Al evaluar las empresas, considerando el promedio 2001-2014; las empresas de mayor porcentaje sobre malla 20 fueron Sancti Spiritus y Santiago de Cuba con el 68 % y el menor valor le correspondió a Matanzas con el 55 %.
- El promedio de tamaño de grano general de las empresas sobre malla 20 fue de 63 %.
- La norma establecida del porcentaje sobre malla 20 (mínimo del 60 %) solo se ha incumplido los años 2008 y 2010 con el 57 %.
- En los últimos cinco años el porcentaje sobre malla 20 alterna entre los valores de 57 y 64 %.

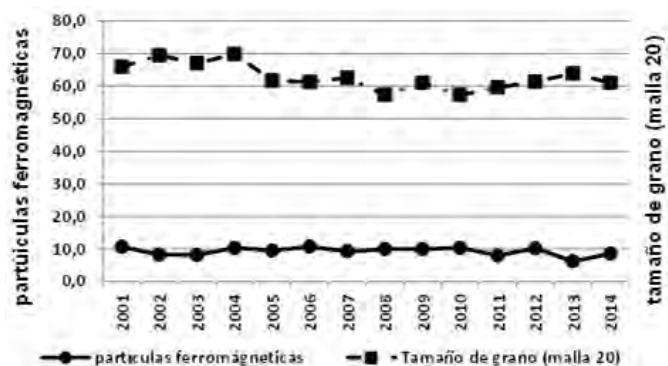


Figura 5. Comportamiento de las partículas ferromagnéticas y del porcentaje sobre malla 20 período (2001-2014).

Tabla 1. Características analíticas de las determinaciones de las partículas ferromagnéticas y de la granulometría

Índice	Tipo de separación y medición	Principales causas de incremento o disminución
Partículas ferromagnéticas	Sep. magnética Gravimetría	Limpieza deficiente. No empleo de pintura anticorrosiva. No utilización de electro imanes o deficiente limpieza de los mismos.
% sobre malla 20	Tamizado Gravimetría	Mala calidad de la materia prima. Mal trabajo en área de cristalización

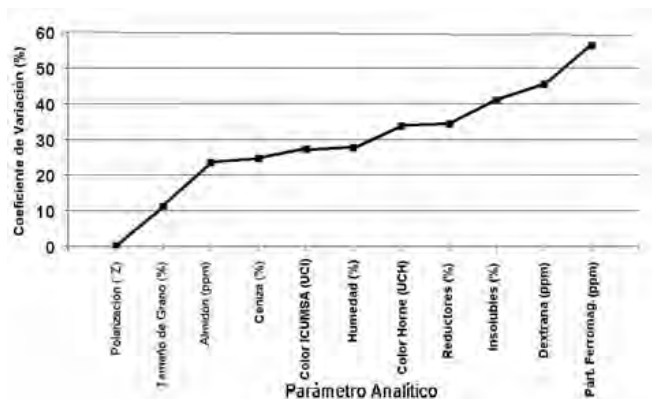


Figura 6. Comportamiento de CV promedio en las once determinaciones físico-químicas analizadas (2001-2014).

Comportamiento del coeficiente de variación

Una vez caracterizado el comportamiento promedio nacional de las determinaciones fundamentales en la calidad del azúcar crudo, se procedió a calcular el Coeficiente de Variación (CV), con vistas a estimar la variabilidad y los resultados se muestran en la figura 6, donde se evidencia que las características de los insolubles, dextrana y partículas ferromagnéticas tienen valores de CV superiores al 40 % lo cual indica que son las magnitudes sobre las que se tiene un menor control industrial. Adicionalmente la dextrana y las partículas ferromagnéticas incumplen los parámetros establecidos en la norma de especificaciones vigente.

CONCLUSIONES

Como conclusiones de este trabajo pueden señalarse las siguientes:

- Que aun cuando ha habido cambios en las especificaciones del azúcar crudo para incrementar su calidad, el promedio nacional del período 2001-2014 cumple con las especificaciones de calidad de la norma NC 85:2013 excepto partículas ferromagnéticas y dextrana.
- A partir del año 2007 se comienza a cumplir las especificaciones de la norma NC 85:2013, excepto para partículas ferromagnéticas y dextrana.
- Los valores mínimos o máximos y los promedios nacionales, se obtuvieron en el año 2013 para los siguientes parámetros: humedad (0,12 %); reductores (0,16 %), color fotolorimétrico (1021 UCI), color Horne (8 UCH), polarización (99,19 °Z) y partículas ferromagnéticas (6 mg/kg).
- Los siguientes parámetros de calidad tienen coeficientes de variación (CV) superiores al 40 %: insolubles (41 %); dextrana (45 %) y partículas ferromagnéticas (56 %), estos valores coinciden con los parámetros que aun no se encuentran en norma, excepto insolubles.
- En el 2014 todos los indicadores crecieron (aun dentro de norma) excepto el almidón en que se obtuvo el promedio nacional más bajo del período considerado.

RECOMENDACIONES

- Hacer un análisis tecnológico y de parámetros agrícolas para conocer las causas del aumento de la calidad del año 2014, respecto a los valores alcanzados en el 2013.
- Analizar las causas de los valores del coeficiente de variación de insolubles, partículas ferromagnéticas y dextrana y su dependencia de los parámetros tecnológicos y agrícolas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Requisitos generales para la Competencia de los Laboratorios de Ensayos y/o Calibraciones. NC-ISO/IEC 17025:2005.
2. Rein, P. "Cane Sugars Engineering" Verlag Dr Albert Bartens KG- Berlin p 494. 2007
3. Chen, J.C.P. "Cane Sugar Handbook" 12th Edition. John Willey And Son, 1993 pág. 344.
4. Monterde, J.; Ruso, R.; Fajardo, R. "Estudio del deterioro de Azúcares almacenadas a granel". Memorias 38 Conf. ATAC, 1968, pág 126-140
5. Methods Book, International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis, ICUMSA, 2011.
6. Manual de Métodos Analíticos para el Control Unificado. Azúcar Crudo. Instituto Cubano de Investigaciones Azucareras. Sala de Control y Análisis. Minaz. La Habana. Cuba 2006.
7. Guillet, T. R. Color y no azúcares coloreadas. Peter Honig. Principios de Tecnología Azucarera. Tomo 1 Edición Especial para Edición de Ciencia y Técnica. Instituto del Libro, Habana. España. Compañía Editorial Continental S.A. 1 junio 1969 Pág. 205-264.
8. Liggett, R. W.; Deitz, V. R. "Advances in Carbohydrate Chem.", 1954, pág 9
9. López-Oña, John V. "Initial versus Revised Raw Sugar Quality Standards" Sugar-Azúcar May . Pág. 42-49. 1979.

Evaluación del aumento de la digestibilidad en alimento para ganado bovino

Diana Isis Llanes-Gil López¹, Jorge Aurelio Lois-Correa¹, María Elena Sánchez-Pardo²

1. Centro de Investigaciones en Ciencia Aplicada y Tecnología de Avanzada, CICATA-IPN. Km 14.5 Carretera Tampico -Puerto Industrial Altamira, Tamps., México CP 89600.
diana.llanes@ymail.com
2. Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, ENCB-IPN, México DF. Unidad Profesional Lázaro Cárdenas, Prolongación de Carpio y Plan de Ayala s/n, Col. Santo Tomas C.P. 11340 Delegación Miguel Hidalgo México.

RESUMEN

Se presenta el desarrollo de un alimento base predigerido a partir de bagazo de caña, para ganado bovino, suplementado proteicamente con un subproducto de la producción de la enzima transglutaminasa. El incremento de la digestibilidad se implementó mediante un tratamiento alcalino con hidróxido de sodio (2.0 Normal). Se realizaron pruebas de digestibilidad in vitro, contenido de proteína y minerales, porcentaje de humedad, etc. Para la caracterización física de las fibras integrales y postratamiento se empleó la técnica microscopia confocal con barrido laser. Para la formulación del alimento se empleó el cuadrado de Pearson y el software CONFOR. De acuerdo a los resultados obtenidos fue posible corroborar que el tratamiento alcalino le confiere una mayor digestibilidad al bagazo y por tanto, sus resultados pueden ser aplicados en tecnologías de alimentación animal de bovinos.

PALABRAS CLAVE: alimento animal, bagazo, digestibilidad, transglutaminasa.

ABSTRACT

The development of a basic pre-digested food from bagasse, for cattle supplemented proteic with a by-product of the transglutaminase enzyme occurs. Increased digestibility was implemented by an alkaline treatment with sodium hydroxide (2.0 Normal). The tests performed in vitro digestibility, protein content and minerals, moisture, etc. For the physical characterization of fibers and comprehensive post-treatment techniques they are used: laser scanning confocal microscopy. To feed formulation Pearson Square and CONFOR software was used. According to the results it was possible to corroborate the alkali treatment gives higher digestibility bagasse and therefore their results can be applied in technologies of cattle feed.

KEYWORDS: animal feed, bagasse, digestibility, transglutaminase.

INTRODUCCIÓN

Ante el panorama de los grandes problemas de contaminación que experimenta México, surgen como alternativas, las tecnologías verdes y, dentro de estas, se encuentra el aprovechamiento de uno de los cultivos más promisorios del siglo XXI, la caña de azúcar, cuyo nombre botánico es *Saccharum officinarum*. Esta graminea produce

nueve subproductos de alto valor agregado para muchos países y muchos de ellos lamentablemente vistos como desecho y/o contaminación en nuestro país. El bagazo es el resultado de moler los tallos de la caña, de su saturación con agua y su posterior separación en parte sólida, (bagazo integral) y diluida (guarapo). Este subproducto está formado por un conjunto de partículas de diferentes tamaños cuyo promedio oscila alrededor de 2,5 mm.

Necesidad de suplementación proteica en la alimentación de ganado bovino a base de residuos de la agroindustria cañera

Puesto que el nitrógeno es un nutriente limitante en los forrajes de baja calidad, la suplementación con nitrógeno proteico o nitrógeno no proteico (NPN) se ha utilizado para suministrar el amoníaco (NH_3) a los microbios del rumen y para aumentar la ingesta voluntaria (1, 2). Sin embargo, el impacto de la suplementación de nitrógeno en forrajes de baja calidad también puede depender de la fuente y la disponibilidad de hidratos de carbono fácilmente fermentables (1). Los procesos microbianos en el rumen confieren la capacidad de convertir alimentos fibrosos y nitrógeno no proteico en nutrientes valiosos para los rumiantes (3). Debido a la necesidad de inclusión de buenas fuentes de nitrógeno, la biotecnología alimentaria moderna se está preocupando en buscar novedosas fuentes de nitrógeno que las bacterias ruminales puedan aprovechar. En el presente trabajo se exploró la suplementación proteica con un subproducto hidrolítico de la producción de la enzima MTGasa; dicho residuo resulta económico y de muy buena calidad proteica, ya que la proteína es fácilmente digestible por los rumiantes.

Hidrolizado de transglutaminasa microbiana (H-MTGasa) como aporte de nitrógeno

Se trata de un subproducto micelial obtenido durante el proceso de producción de transglutaminasa microbiana (MTGasa), como hidrolizado, en estado semiacuoso. Para su producción se utiliza glucosa obtenida de harina de sorgo la cual pasa por dos procesos: hidrólisis enzimática con amilasa y α -amilasa y centrifugación para separar la glucosa del resto de los componentes de la harina.

El subproducto derivado de esa producción, contiene una alta concentración de proteínas, considerándose por tanto un buen suplemento para alimento animal. La MTGasa es una enzima de la clase de transferasas ampliamente conocidas para modificar las propiedades funcionales de proteínas en sistemas alimentarios.

MATERIALES Y MÉTODOS

El bagazo fue donado por el ingenio SAPI, S.A. de C.V., ubicado en la ciudad de Panuco, Veracruz, México, recibiendo con una humedad aproximada de 40 %. Se utilizó hidróxido de sodio ACS de la marca Fermont con número CAS 1310-73-2 en presentación de lentejas.

El bagazo integral se sometió a un proceso de tamizado en equipos clasificadores oscilantes (*tumbling screen*). La fracción gruesa mayor de 30 mm

se separó para ser reprocesada ulteriormente; por su parte, la fracción aceptada se mezcló continuamente con una solución de hidróxido de sodio 2 Normal (figura 1), manteniéndose durante 10 min en impregnación. El mezclador debe ser del tipo de doble eje con paletas mezcladoras girando a 180 r.p.m. (*double paddle mixer*). Posteriormente, se añade una solución de miel + urea + sales minerales. El producto obtenido en esta etapa del proceso, de por sí constituye un excelente alimento de mantenimiento; sin embargo, como quiera que se trata de un alimento suplementado proteicamente, en esta tecnología se ha contemplado la inclusión de maralfalfa (*Pennisetum sp.*) y caña fresca, ambas procesadas en un molino de cuchillas con cribas girando a 300 r.p.m. Igualmente, y como aporte novedoso del proceso, se incorpora biomasa micelial resultante de la producción de transglutaminasa, incluyendo la adición de una premezcla de minerales.

RESULTADOS

Para caracterizar el subproducto de MTGasa se realizó un análisis bromatológico obteniéndose como resultados relevantes, un contenido de proteína de 11 % y cenizas de 1,7 %, cabe destacar que la muestra tenía una humedad de 7,4 %. Estos contenidos permiten la inclusión de este residuo en la alimentación animal de forma prometedora. En la tabla 1 se reflejan parámetros importantes del alimento formulado, como son la proteína cruda en la que se puede observar un aumento considerable en la formulación final BPS; debido a la correcta suplementación proteica, también se

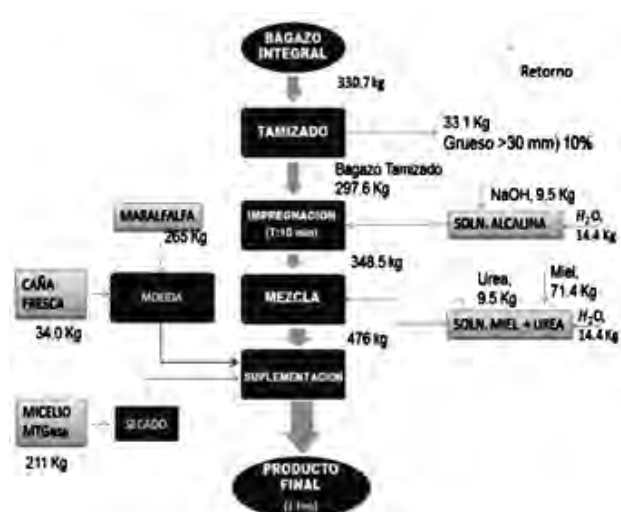
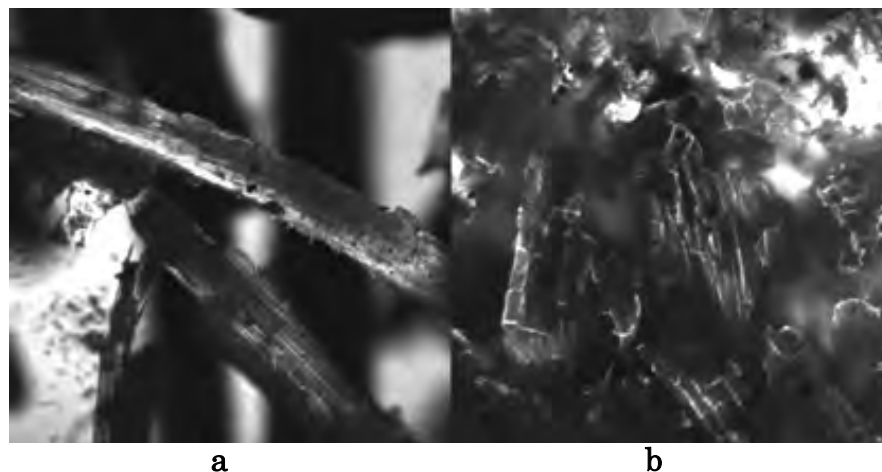


Figura 1. Diagrama de flujo de alimento animal a base de bagazo suplementado con hidrolizado de MTGasa.

Tabla 1. Análisis bromatológico de alimentos formulados

Muestra	Humedad	MS	PC Proteína	Ceniza	EE Extracto Etéreo	FC BS	ELN	FDA Fibra	LDA Lignina BS
Bagazo integral	7,4	92,5	4,2	4	1,7	80,7	2	63,89	25,36
Bagazo predigerido	8,7	91,2	6,1	7,8	1,8	46,0	29,4	50,22	13,23



alcalino en la que se aprecia la fragmentación del material fibroso como reacción al agente alcalino, se aprecia la delignificación de la fibra debido a la fluorescencia de la lignina (3) comparada con la imagen 2 a que pertenece al bagazo integral sin tratamiento.

En la prueba de digestibilidad *in vitro* DIIV se observa un aumento de la digestibilidad del bagazo integral con 32 % al bagazo predigerido con un 60,33 g/100 g, cuyos resultados son notablemente mayores al del pasto estrella, que reporta una digestibilidad de 51 g/100g.

Figura 2. Microfotografías por MCBL (a) Bagazo integral; (b) Bagazo tratado alcalinamente.(Nanociencias - IPN).

observa un aumento en el contenido de cenizas lo que significa un aumento en el contenido de minerales. Otro resultado importante es la disminución del contenido de lignina, ya que el bagazo integral contenía 25 g/100 g y se logró una disminución de 12 g/100 g de lignina.

En la figura 2, se presentan las imágenes obtenidas por la técnica de MCBL, la figura 2 b es una imagen comparativa de bagazo postratamiento

Se realizaron cuatro corridas de la rutina de ganancia en peso desarrollada. En la figura 3 se aprecia claramente un mayor aumento en peso para los individuos alimentados con la formulación final; ya que en comparación con los alimentados con bagazo integral, la diferencia en ganancia en peso por un período de 100 días es de 351 kilogramos. Si se hiciera la comparación del alimento final (Bps) vs. Zacate bufel, se observa una ganancia en peso con el alimento final de 640, 1 kg en comparación con 439,6 kg obtenidos con el Zacate bufel, lo cual equivale a 200,5 kg de carne (figura 3).

CONCLUSIONES

El pretratamiento alcalino, basado en una solución al 12,5 % de NaOH, con un tiempo de retención de 10 minutos, permitió la predigestión del componente fibroso del bagazo de caña de azúcar, mostrando en los estudios morfológicos por MCBL, cambios y rupturas en la textura de la fibra, de igual manera, en el análisis bromatológico se observa una disminución de un 12 % de lignina gracias a la delignificación del NaOH, siendo la información complementada con el aumento significativo del porcentaje de la digestibilidad en DIIV.

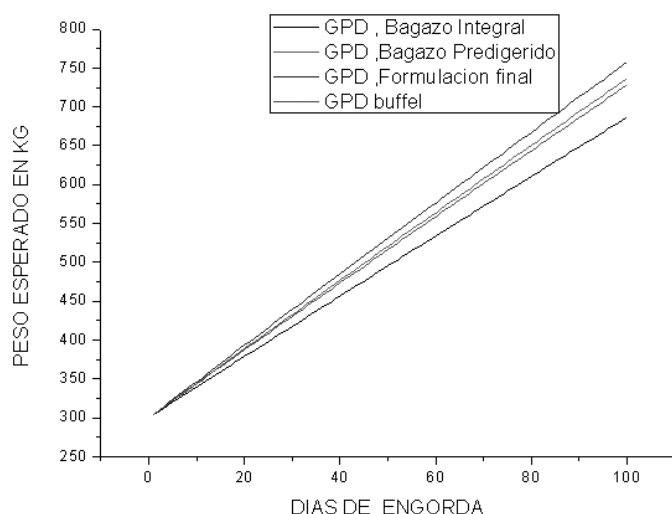


Figura 3. Gráfica peso esperado vs. días de engorda.

La inclusión de insumos no convencionales como la maralfalfa y el subproducto de la transglutaminasa MTGasa, representa un aporte novedoso en el desarrollo de un alimento proteicamente balanceado en forma de harina forrajera que, a su vez puede contribuir a paliar la influencia de factores climáticos adversos en el sector agropecuario de Tamaulipas y otras zonas del país.

AGRADECIMIENTOS

A los proyectos SIP20140206 y SIP 20151141 del Instituto Politécnico Nacional IPN, a la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas del IPN y al Instituto Tecnológico de Altamira.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Mathis, R.C. C.; *et al.* (2000). Effect of sodium hydroxide and alkaline hydrogen peroxide treatment on physical and chemical characteristics and IVOMD of mustard Straw. *Animal Feed Science and Technology* 84 (2000) 257-264.
 2. Bandyk, C.A.; Bandyk, R.C.; Cochran, T.A.; Wickersham, E.C.; Titgemeyer, C.G. Farmer, J.J. Higgs, Effect of ruminal vs post-ruminal administration of degradable protein on utilisation of low quality forages by beef steers. *J. Anim. Sci.*, 79 (2001), pp. 225-231.
 3. Dewhurst R.J , D.R. Davies, R.J. Merry. Microbial protein supply from the rumen. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 85 (2000), pp. 1-21.
 4. Tiago, A., Chimenez, Gehlen M.H, Marabezi K., Curvelo A.S (2014) Characterization of sugarcane bagasse by auto-fluorescence microscopy. *Cellulose* (2014) 21:653-664 DOI 10.1007/s10570-013-0135-9.
 5. Camolezi Gaspar Ana Luisa, Silvana Pedroso de Góes-Favoni. Action of microbial transglutaminase (MTGase) in the modification of food proteins: A review. *Food Chemistry Volume 171*, 15 March 2015, Pages 315-322 doi:10.1016/j.foodchem.2014.09.019.
 6. Ferrer, *et al.*, 2002. Kinetics of the acid hydrolysis of sugar cane bagasse pith. *Rev. Fac. Agron. La Universidad de Zulia (LUZ)*., 19: 23-33, p. 24.
 7. Heldt J.S , R.C. Cochran, C.P. Mathis, B.C. Woods, K.C. O., E.C. Titgemeyer, T.G. N., E.S. Vanzant, D.E. Johnson. Effects of level and source of carbohydrate and level of degradable intake protein on intake and digestion of low quality tall grass prairie hay by beef steers. *J. Anim. Sci.*, 77 (1999), pp. 2846-2854.
 8. ICIDCA, 1988. "Manual de los derivados de la caña de azúcar" Instituto cubano de investigaciones de los derivados de azúcar, Colección GEPLACEA, pag.3.
 9. Ortiz-Rubio M.A. E.R. Ørskov, J. Milne,, Effect of different sources of nitrogen on in situ degradability and feed intake of Zebu cattle fed sugarcane tops (*Saccharum officinarum*), *Animal Feed Science and Technology*, Volume 139, Issues 3-4, 15 December 2007, Pages 143-158. Doi:10.1016/j.anifeeds- ci.2007.01.016.
 10. Russell J.B., D.B. Wilson, Why are ruminal cellulolytic bacteria unable to digest cellulose at low pH *J. Dairy Sci.*, 79 (1996), pp. 1503-1509.
 11. Titgemeyer E.C., E.S. Vanzant, Effects of supplemental degradable intake protein on utilization of medium- to low-quality forages, *J. Anim. Sci.*, 78 (2000), pp. 224-232.
-

Predicción de la transferencia de masa en cultivos no-newtonianos de *Bacillus licheniformis*

Mariela Rizo-Porro¹, Nemecio González-Fernández², Luis B. Ramos-Sánchez¹

1. Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Camagüey "Ignacio Agramonte Loynaz". Carretera Circunvalación Norte entre Ave. 26 de julio y Camino Viejo de Nuevitás, Camagüey, Cuba.
2. Centro de Ingeniería Genética y Biotecnología. Carretera Circunvalación Norte y Ave. Finlay, Camagüey, Cuba. luis.ramos@reduc.edu.cu

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es desarrollar un modelo capaz de predecir el valor del coeficiente volumétrico de transferencia de oxígeno ($k_L a$) en cultivos de *Bacillus licheniformis*, en los cuales se utiliza la sacarosa como sustrato limitante. El proceso se realiza en cuatro etapas: la selección de expresiones que correlacionen el $k_L a$ con la viscosidad del fluido; la determinación de las características reológicas de un cultivo de esta bacteria con sobreexpresión de un exopolisacárido (EPS); la determinación experimental del $k_L a$ en diferentes condiciones de viscosidad, velocidad de agitación y flujo de aire y por último; la selección de la correlación que mejor representa los resultados experimentales. Como resultado del trabajo desarrollado se obtuvo que el modelo de Oswald de Waele representa el comportamiento pseudoplástico de un cultivo de *Bacillus licheniformis* en las condiciones estudiadas y se identificaron los coeficientes de la correlación propuesta la cual representa exitosamente el 99,45 % de los datos experimentales. Los valores de $k_L a$ experimental fueron obtenidos entre 0,0056 y 0,981 s⁻¹.

PALABRAS CLAVE: *Bacillus licheniformis*, coeficiente volumétrico de transferencia de oxígeno, exopolisacáridos, fluidos no-newtonianos.

ABSTRACT

The objective of this work is to develop a model able to predict the value of the volumetric coefficient of oxygen transfer ($k_L a$) in cultivations of *Bacillus licheniformis* in which is used the sucrose like limiting substrate. The process is carried out in four stages: the selection of expressions that correlate the $k_L a$ with the viscosity of the fluid; the determination of the rheological characteristics of a culture of this bacteria with an overexpression of an exopolysaccharide (EPS); the experimental determination of $k_L a$ in different conditions of viscosity, speed of agitation and flow of air and lastly; the selection of the correlation that better represents the experimental data. As a result it was obtained that the Oswald de Waele model represents the pseudoplastic behavior of a *Bacillus licheniformis* culture under the studied conditions. The coefficients of the proposed correlation were identified. This correlation is capable to represent the 99.45 % of the experimental data successfully. The experimental $k_L a$ values were obtained between 0.0056 and 0.981 s⁻¹.

KEYWORDS: *Bacillus licheniformis*, volumetric coefficient of oxygen transfer, exopolysaccharide, non-newtonian culture.

INTRODUCCIÓN

Las bacterias son ampliamente utilizadas para la producción industrial de polímeros biosintéticos de diversos tipos entre los que se destacan

los exopolisacáridos (EPS) (1-6) y dentro de estos, la levana.

La levana es un homopolímero de monómeros de fructosa unidos mediante un enlace β -2-6 que se encuentra de forma natural en plantas y como pro-

ducto de la fermentación microbiana en ciertos microorganismos, a partir de la acción de la enzima levanasacarasa sobre la sacarosa del medio (7, 8).

Se ha informado previamente (9, 10) que la bacteria *Bacillus licheniformis* produce levana ($C_6H_{10}O_5$)_n en presencia de sacarosa, la que utiliza no solo como fuente de carbono para producir biomasa sino además, como precursora de la síntesis de este exopolisacárido.

Por otra parte, la principal característica reológica presentada por la mayor parte de los fluidos de cultivos de polisacáridos es su extrema viscosidad en concentraciones relativamente bajas del producto, acompañada de un comportamiento pseudoplástico (11). Otros autores (12) encontraron este comportamiento en cultivos de *Microbacterium laevaniformans* productor de levana. Semejante comportamiento también fue observado para cultivos de *Bacillus subtilis* (13).

Este aumento de la viscosidad sobre los fenómenos de transporte en las fermentaciones con producción de exopolisacáridos, trae como consecuencia una pobre transferencia de oxígeno (14). Esta influencia no se conoce bien *a priori* y en pocas excepciones, ha sido posible establecer las ecuaciones de diseño para estos procesos fermentativos (15, 16). En las fermentaciones de exopolisacáridos el aumento de la concentración del producto influye sobre la capacidad de transferencia de masa y de calor del fermentador. Por consiguiente, es de fundamental importancia el estudio de los cambios en la concentración de los exopolisacáridos para el escalado de estos procesos (17, 18).

El incremento de la viscosidad aparente (μ_a) durante una fermentación aerobia puede ser compensado parcialmente por el incremento de la velocidad de agitación y el flujo de aire, con el objetivo de mantener adecuados valores del coeficiente volumétrico de transferencia de oxígeno ($k_L a$). Sin embargo, se conoce que altas velocidades de agitación provocan daños físicos en las células lo que reduce la productividad de los procesos fermentativos (19, 20).

Debido a la importancia del $k_L a$ en el desarrollo y escalado de biorreactores convencionales, en la literatura existe una vasta referencia sobre correlaciones para su determinación en fluidos newtonianos (21-23). Sin embargo, un cuidado particular debe tenerse al aplicar estas correlaciones a sistemas no-newtonianos, como es el caso de los cultivos microbianos ya que no resultan satisfactorias, por cuanto no tienen en cuenta cómo afecta la viscosidad de estos en $k_L a$ (15, 21, 22, 24).

Diversas correlaciones han sido propuestas para predecir el valor de $k_L a$ en reactores de tanque agitado con fluidos complejos (16, 25 - 27). Estas correlaciones están basadas generalmente

en el consumo de potencia (P_g/V_L), la velocidad superficial del gas (v_g) y la viscosidad aparente (μ_a). Se han propuesto expresiones extendidas de este tipo de correlación en la literatura, a las que se ha incorporado la velocidad del impulsor (N) (28, 29). No obstante, la gran mayoría de estas correlaciones han sido desarrolladas para cultivos de hongos filamentosos (21, 22, 30 y 31) y pocas para bacterias (21, 32).

Otra particularidad de las correlaciones recientemente desarrolladas para predecir el valor del $k_L a$ en fluidos no-newtonianos es que han sido desarrolladas a partir de fluidos modélicos con el mismo comportamiento pseudoplástico y no a partir del propio cultivo (11, 27, 33-36).

Es por ello que para obtener un proceso fermentativo robusto y garantizar un conveniente escalado de este se plantea, como objetivo de este trabajo, ajustar un modelo que permita predecir el $k_L a$ en fermentaciones de *Bacillus licheniformis* con formación de exopolisacáridos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ecuaciones para la predicción del coeficiente volumétrico de transferencia de oxígeno ($k_L a$)

Entre las expresiones dimensionales la más común, que incluye la influencia de la viscosidad aparente del fluido en la transferencia de oxígeno, es la propuesta previamente (37) que tiene la forma:

$$k_L a = u \cdot \left(\frac{P_g}{V_L} \right)^\alpha \cdot v_g^\beta \cdot \mu_a^\gamma \quad (\text{ec. 1})$$

Donde $k_L a$ es el coeficiente volumétrico de transferencia de oxígeno (s^{-1}), P_g/V_L es el consumo de potencia (kW/m^3), v_g es la velocidad superficial del gas (m/s), μ_a es la viscosidad aparente del fluido ($Pa \cdot s$), a es una constante empírica de proporcionalidad y α , β y γ son coeficientes empíricos adimensionales.

Correlaciones de esta forma fueron desarrolladas también (21) para predecir la transferencia de oxígeno en cultivos de *Trichoderma reesei*, así como a partir de fluidos modélicos de goma xantano y carboximetilcelulosa (CMC) (15).

Una correlación diferente a la anterior fue propuesta posteriormente (38). Esta expresión fue establecida en tres medios modélicos constituidos por agua, una solución de goma xantano y de CMC y es válida para un amplio rango de viscosidades aparentes y tamaños de recipientes (20-340 L) y tiene la forma:

$$k_L a = b \cdot \left(\frac{P_g}{V_L} \right)^\alpha \cdot v_g^\beta \cdot \left(1 + \frac{\mu_a}{\mu_c} \right)^{-1} \quad (\text{ec. 2})$$

Donde μ_c es la viscosidad crítica del fluido (Pa.s), b es una constante empírica de proporcionalidad y δ y ε son coeficientes empíricos adimensionales.

Otros autores (31) estudiaron la transferencia de oxígeno en cultivos de varias cepas de hongos realizados en biorreactores tipo tanque agitado para obtener antibióticos. Ellos establecieron una expresión para el $k_L a$ que incluía adicionalmente el efecto de la velocidad de agitación (N).

$$k_L a = c \cdot \left(\frac{P_g}{V_L} \right)^\theta \cdot \mu_g^\lambda \cdot N^\phi \left(\frac{\mu_g}{\mu_c} \right)^\omega \quad (\text{ec. 3})$$

Donde N es la velocidad de agitación (s^{-1}), μ_g es la viscosidad del aire (Pa.s), c es una constante empírica de proporcionalidad θ , λ , ϕ y ω son coeficientes empíricos adimensionales.

Correlaciones similares han sido también propuestas para una solución de glicerol y agua (36), para un sistema agua-CMC (35), para agua (33) y una solución de agua y goma xantano (11).

Las tres expresiones anteriormente descritas se emplearán para determinar cuál de ellas representa mejor los datos experimentales obtenidos.

Determinación del comportamiento reológico del cultivo de *B. licheniformis*, C-232

Con el objetivo de determinar el comportamiento reológico del cultivo de *B. licheniformis* C-232 se cultivó el microorganismo en biorreactor de 3 L (Marubishi, Japón) durante 12 horas.

La cepa fue obtenida del banco de células del Centro de Ingeniería Genética y Biotecnología de Camagüey, Cuba. Fue cultivada en un medio complejo compuesto por 75 g/L de sacarosa y 40 g/L de extracto de levadura (39) a un pH de 6,2 que se mantuvo con la adición de 50 mM de una solución de tampón fosfato. El precultivo se realizó en frascos de 100 mL que contenían 30 mL del medio, los que fueron inoculados con una colonia proveniente de una placa con agar-nutriente. Después de 15 h de crecimiento en zaranda termostatada a 250 rpm y 37 °C, el cultivo fue utilizado para inocular frascos de 2 L de volumen que contenían 270 mL del medio. El crecimiento se realizó en las mismas condiciones anteriores durante 6 horas.

El inóculo (300 mL) fue transferido al biorreactor de 3 L que contenía 2 700 mL del medio anteriormente descrito. Se realizó la fermentación con la temperatura de cultivo igual a 45 °C y el pH en 5,5 y valores óptimos para la producción de levana, responsable de los cambios en la reología observados en estudios anteriores (8, 12, 40, 41).

El cultivo fue constantemente agitado a 500 rpm y se suplementó un flujo continuo de aire igual a 3 L/min (1,0 vvm) durante 12 h, tiempo suficiente

para alcanzar la fase estacionaria. El control del pH se realizó de forma automática mediante la adición de agua amoniacal y ácido ortofosfórico al 20 %.

Al concluir el cultivo se tomó una muestra para determinar el esfuerzo cortante del fluido a diferentes velocidades de corte y luego se diluyó a razón de 50 % de agua y 50 % de cultivo con el objetivo de conocer su comportamiento reológico a dos concentraciones diferentes y a una temperatura constante igual a 45 °C. Esta determinación se realizó por triplicado en un viscosímetro Brookfield DV-III-Ultra (Estados Unidos), cuyo rango de sensibilidad se encuentra para valores de torque entre 30-60 %.

Para la predicción de la viscosidad aparente fueron analizados dos modelos: el modelo de Herschel-Bulkley (ec. 4) que considera un valor inicial del esfuerzo cortante diferente de cero ($\tau_0 > 0$) y el de Oswald de Waele o Ley de Potencia (ec. 5) que constituye un caso particular del modelo de Herschel-Bulkley y que no considera un esfuerzo cortante inicial. El primero fue considerado debido a que, aparentemente a altas concentraciones, el cultivo debía vencer una resistencia inicial para fluir. Por su parte, la Ley de Potencia fue tenida en cuenta debido a los múltiples reportes que existen sobre el comportamiento pseudo-plástico de cultivos de polisacáridos (13, 15, 19).

$$\tau = K \cdot |\dot{\gamma}|^n + \tau_0 \quad (\text{ec. 4})$$

$$\tau = K \cdot |\dot{\gamma}|^n \quad (\text{ec. 5})$$

Los valores de τ_0 fueron calculados utilizando el método de extrapolación para un valor de velocidad de deformación igual a cero (24, 25).

Para determinar la viscosidad aparente dentro del biorreactor fue necesario estimar la velocidad de deformación promedio mediante la correlación de Metzner y Otto y el esfuerzo cortante promedio (25). Esta correlación es la más comúnmente utilizada y en ella la constante de Metzner-Otto (k_s) depende del tipo de impelente y de la configuración del biorreactor. Usualmente se emplean valores entre 10 y 13,5 (26).

$$\dot{\gamma}_{prom} = k_s \cdot N \quad (\text{ec. 6})$$

En el estudio se empleó un impelente tipo turbina Rushton con seis cuchillas. El valor de k_s para este tipo de impelente es de 11,5.

El esfuerzo cortante promedio se calculó mediante los modelos de Herschel-Bulkley y el de Oswald de Waele según las expresiones anteriormente expuestas:

$$\tau_{prom} = K (\dot{\gamma}_{prom})^n \quad (\text{ec. 7})$$

$$\tau_{prom} = K(\gamma_{prom})^n + \tau_0 \quad (\text{ec. 8})$$

Con los valores del esfuerzo cortante y la velocidad de deformación promedios fueron determinados los valores de la viscosidad aparente para cada modelo, según se muestra en las siguientes ecuaciones:

$$\mu_a = \frac{\tau_{prom}}{\gamma_{prom}} \quad (\text{ec. 9})$$

$$\mu_a = \frac{\tau_{prom}}{\gamma_{prom}} + \tau_0 \quad (\text{ec. 10})$$

Un análisis de regresión no lineal realizado con ayuda del programa GraphPad Prism 6.01 (42), permitió conocer los valores del índice de comportamiento de flujo (n) y del índice de consistencia (k) para las dos concentraciones estudiadas.

Determinación de las constantes reológicas del cultivo

En las ecuaciones 1, 2 y 3, $k_L a$ depende del consumo de potencia por unidad de volumen P_g/V_L . Para cuantificar este término fue necesario calcular la potencia de gaseo (P_g) la que se determinó mediante la ecuación propuesta por Michel y Miller (43) que ha sido ampliamente referenciada en la literatura:

$$P_g = \left(\frac{P_o^2 \cdot N \cdot D_i^3}{Q_g^{0.56}} \right)^{0.45} \quad (\text{ec. 11})$$

Donde P_g es la potencia de gaseo (kW), P_o es el consumo de potencia en la agitación (kW), N es la velocidad de agitación (s^{-1}), D_i es el diámetro del impelente (m) y Q_g es la velocidad de flujo volumétrico de aire (m^3/s).

El consumo de potencia en la agitación se calculó según la siguiente expresión (28):

$$P_a = N_p \cdot N^3 \cdot D_i^5 \cdot \rho \quad (\text{ec. 12})$$

Donde N_p es el número de potencia y ρ es la densidad del fluido (kg/m^3).

La velocidad de flujo volumétrico específico de aire se calculó como:

$$Q_g = q_w \cdot V_L \quad (\text{ec. 13})$$

En este término, la variable a medir fue el flujo de aire alimentado al reactor (q_a).

La velocidad superficial del gas (v_g) se calculó según la ecuación (28):

$$v_g = \frac{Q \cdot V_L \cdot 4}{\pi \cdot D_T^2} \quad (\text{ec. 14})$$

Donde Q es el flujo específico de aire alimentado al reactor ($m^3/m^3.s$), V_L es el volumen del líquido dentro del fermentador (m^3) y D_T es el diámetro interno del fermentador (m).

De las ecuaciones 11-14 se obtiene que las variables a considerar en un diseño experimental serían la velocidad de agitación (N) y el flujo de aire alimentado al reactor (q_a). Por otra parte, el primer objetivo en el escalado de un proceso fermentativo de alta densidad celular que involucra fluidos no-newtonianos es caracterizar la transferencia de oxígeno y la reología a la escala de laboratorio. Es por ello que resulta imprescindible la introducción de la viscosidad aparente dentro de las correlaciones para predecir la transferencia de oxígeno en cultivos no-newtonianos. Al igual que para cultivos de *T. reesei* donde la viscosidad aparente máxima se ubica en los 0,12 Pa.s (21), en el cultivo de *B. licheniformis* esta se incrementa desde valores iniciales similares al agua, hasta valores propios de fluidos no-newtonianos. Por esta razón, la tercera variable a considerar en el diseño experimental será la viscosidad aparente del cultivo.

Determinación experimental del $k_L a$ como función de la viscosidad para un cultivo de *B. licheniformis*, C-232

Para determinar el coeficiente volumétrico de transferencia de oxígeno ($k_L a$) se diseñó un experimento factorial 2^k en el que los factores considerados fueron la velocidad de agitación, el flujo de aire y la viscosidad aparente. Se estudiaron dos niveles para cada una de las variables cuya selección se realizó a partir de una amplia revisión de la literatura disponible.

En este sentido, ciertos autores (44) estudiaron la influencia de la agitación y la aireación en niveles entre 250-800 rpm y flujos de aire de 1 a 2 L/min para incrementar la producción de un polímero a partir de *B. licheniformis* hasta concentraciones de 23 g/L. Sin embargo, otros autores (45) lograron aumentar la concentración de este polímero empleando una velocidad de agitación de 1000 rpm y un flujo de aire de 5 L/min. En ambos casos lo que se desea es incrementar la concentración de este producto. Por otra parte, se conoce que para producir altas concentraciones de levadura a partir de sacarosa empleando *B. subtilis* es necesario suministrar un flujo de aire constante igual a 30 L/min y una agitación de 300 rpm (10). Todo esto sugiere que altos niveles de aireación y de agitación favorecen el aumento de la producción de exopolímeros y disminuyen la formación de la biomasa.

Por estas razones se tomó un nivel máximo de velocidad de agitación igual a 800 rpm y un mínimo de 500 rpm. Por su parte, los niveles del flujo de aire fueron establecidos entre 1,5 y 4,5 L/min.

Los niveles de la viscosidad incluidos en el diseño fueron los obtenidos según la metodología planteada en el tercer acápite de los materiales y métodos.

El diseño factorial arrojó ocho corridas y fueron realizadas tres réplicas.

El coeficiente volumétrico de transferencia de oxígeno (k_La) se determinó por el método dinámico (46).

Se emplearon electrodos polarográficos de oxígeno disuelto (Ingold), los cuales tienen un tiempo de respuesta del orden de las centésimas de segundo y que fueron previamente calibrados. Se establecieron las condiciones iniciales de cultivo de acuerdo a las más favorables encontradas en el experimento anterior: temperatura, 45 °C; pH, 6,2 y la velocidad de agitación, el flujo de aire y la viscosidad aparente, según el diseño del experimento. Se inyectó nitrógeno gaseoso hasta que la concentración de oxígeno disuelto en el medio de cultivo fue mínima y posteriormente se estableció el flujo de aire al valor deseado (según diseño de experimento). Se midió la concentración de oxígeno disuelto en el medio cada diez segundos hasta que se hizo constante.

La concentración saturada de oxígeno en el equilibrio a presión atmosférica se determinó experimentalmente para cada corrida.

La variación de la concentración de oxígeno en la fase líquida se expresó mediante la siguiente ecuación de balance general:

$$\frac{dO_2}{dt} = k_La(O_2^* - O_2) - (Q_{O_2} \cdot X) \quad (\text{ec. 15})$$

Donde k_La es el coeficiente volumétrico de transferencia de oxígeno determinado experimentalmente (s^{-1}), O_2^* es la concentración saturante de oxígeno (mg/L), O_2 es la concentración de oxígeno disuelto medida (mg/L) y $Q_{O_2} \cdot X$ es el consumo específico de oxígeno (mg/L.s).

Un caso particular de esta expresión se obtiene al cortar el suministro de aire en el biorreactor por lo que el término de transferencia se iguala a cero. La expresión resultante es:

Reagrupando la ec. 15 se obtiene:

$$\frac{dO_2}{dt} = -Q_{O_2} \cdot X \quad (\text{ec. 16})$$

$$dO_2 = -Q_{O_2} \cdot X \cdot dt \quad (\text{ec. 17})$$

Si se hace:

$$\frac{dO_2}{dt} = [k_La \cdot O_2^* - Q_{O_2} \cdot X] - k_La \cdot O_2 \quad (\text{ec. 18})$$

Entonces:

$$m_{O_2}(t) = \frac{dO_2}{dt} \quad (\text{ec. 19})$$

$$b_{01} = [k_La \cdot O_2^* - Q_{O_2} \cdot X] \quad (\text{ec. 20})$$

Si se representa gráficamente la pendiente de

$$m_{O_2}(t) = b_{01} - k_La \cdot O_2(t) \quad (\text{ec. 21})$$

la dinámica del oxígeno *versus* su concentración se obtendrá una manera de calcular k_La y O_2^* , previa determinación del término asociado al consumo.

Ajuste de los parámetros de las expresiones de correlación según las expresiones seleccionadas

Para ajustar los parámetros de las expresiones de correlación (ver ec. 1, 2 y 3) se empleó un análisis de regresión no lineal con ayuda del programa StatGraphics Centurion XVI (47). La variable independiente utilizada en la regresión fue el k_La determinado experimentalmente según la metodología descrita en el acápite anterior.

RESULTADOS

Resultados de la determinación del comportamiento reológico del fluido

La representación del esfuerzo cortante que ejerce el cultivo de *B. licheniformis* a las dos concentraciones analizadas contra diferentes velocidades de corte y para los dos modelos considerados se muestran en la figura 1.

Como resultado del análisis de regresión no lineal realizado se obtuvieron los valores del índice de consistencia K y del de flujo n para las dos concentraciones de cultivo. Estos resultados se muestran en la tabla 1.

Los valores del índice de flujo menores que uno ($n < 1$) sugieren un comportamiento pseudoplástico característico de las cultivos que contienen altas concentraciones de polímeros lo que permite seleccionar el modelo de Oswald de Waele o Ley de Potencia para determinar la viscosidad aparente en un cultivo de *B. licheniformis* en las condiciones estudiadas (48).

Resultados de la determinación experimental del k_La

La determinación del k_La experimental se desarrolló según la metodología descrita al final del penúltimo acápite de la sección de materiales y métodos para cada una de las condiciones de las

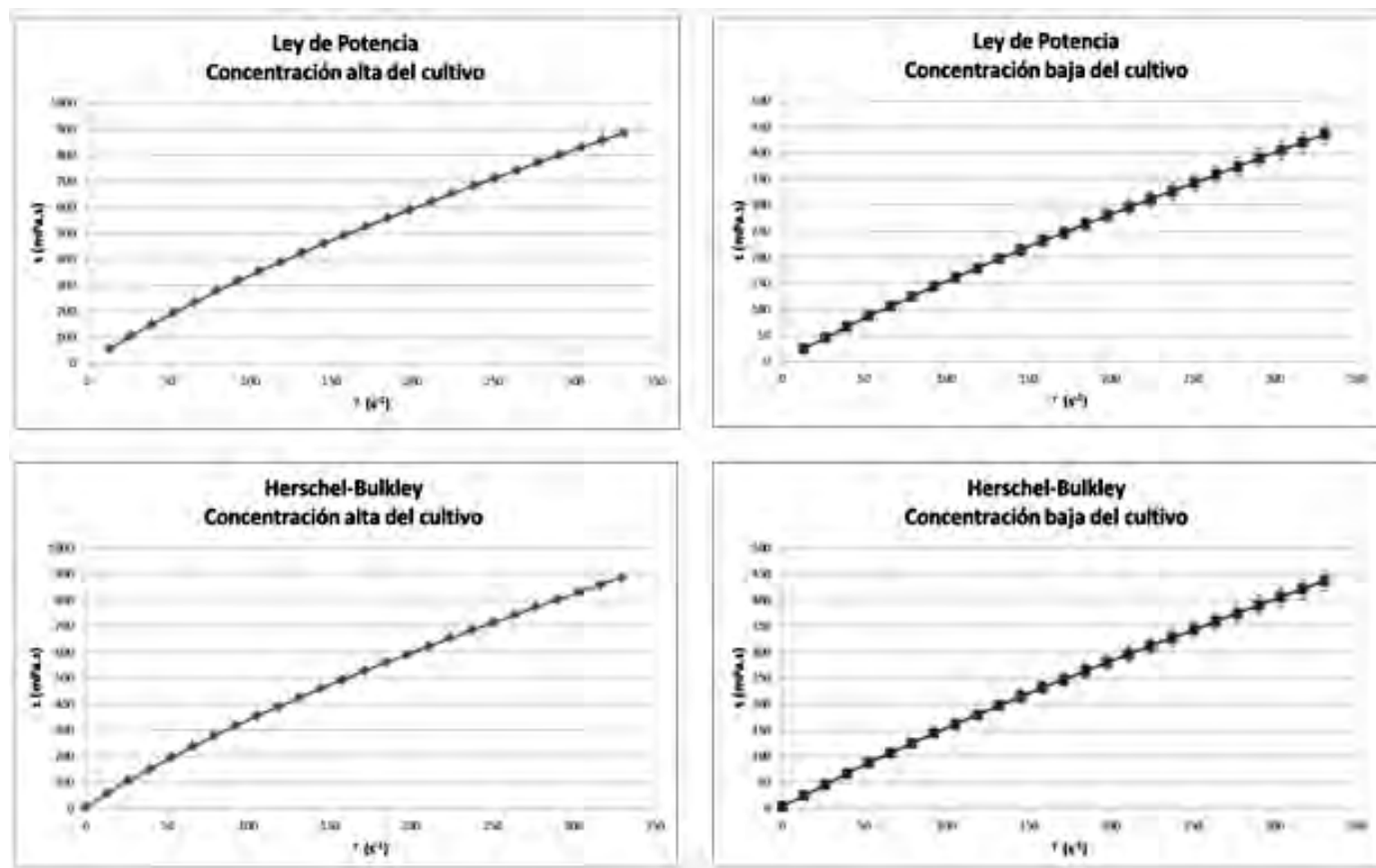


Figura 1. Curvas de flujo para dos concentraciones de cultivo de *B. licheniformis* según dos modelos reológicos.

Tabla 1. Constantes reológicas obtenidas experimentalmente para dos concentraciones de cultivo de *B. licheniformis*

Conc. de cultivo	Modelo	$K(\text{mPa.s})$	n	$\tau_0(\text{mPa})$	R^2
Alta	Ley de Potencia	7,990	0,8130	---	0,9996
Alta	Herschel-Bulkley	7,687	0,8191	3,33	0,9995
Baja	Ley de Potencia	2,751	0,8739	---	0,9928
Baja	Herschel-Bulkley	2,521	0,8879	3,33	0,9927

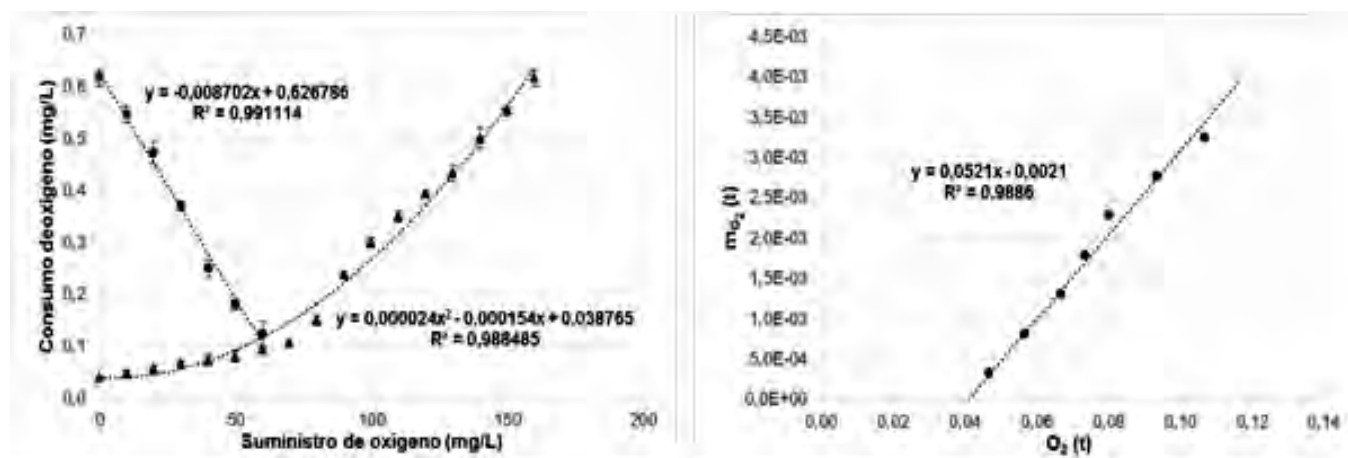


Figura 2. Resultados de la determinación experimental del $k_L a$. a) dinámicas de suministro (\blacklozenge) y consumo de oxígeno (\bullet) en el cultivo de *B. licheniformis*. b) gráfico de la pendiente de la dinámica del oxígeno vs su concentración.

Tabla 2. Resultados de la determinación experimental del $k_L a$ según el diseño experimental

N (s ⁻¹)	q_a (m ³ /m ³ .s)	μ_a (mPa.s)	k_{Laexp} (s ⁻¹)	R^2
8,3	0,008	3,4067	0,00560	0,98160
13,3	0,008	3,4067	0,05214	0,98860
8,3	0,025	3,4067	0,01423	0,98552
13,3	0,025	3,4067	0,98100	0,97930
8,3	0,025	1,4589	0,02709	0,97357
13,3	0,025	1,4589	0,01971	0,97395
8,3	0,008	1,4589	0,05863	0,95028
13,3	0,008	1,4589	0,05995	0,94400

corridas experimentales. Un ejemplo del procedimiento seguido y de los resultados alcanzados para una corrida experimental ($N=8,3$ s⁻¹; $q_a=0,025$ m³/m³.s y $\mu_a=3,4067$ mPa.s) y sus réplicas se muestran en las figuras 2a y 2b. En la primera, se representan gráficamente las dinámicas de suministro y consumo de oxígeno, determinadas experimentalmente mediante el método dinámico, se muestran las ecuaciones que las describen y los coeficientes de determinación R^2 que demuestran la calidad del ajuste entre los datos experimentales y las ecuaciones obtenidas. En la segunda se muestra la representación gráfica de la pendiente de la dinámica del oxígeno contra su concentración así como la ecuación lineal que representa mejor los datos experimentales.

Los valores del k_{La} experimental, obtenidos mediante la representación gráfica de la pendiente de la dinámica del oxígeno versus su concentración, se muestran en la tabla 2.

Resultados del análisis de regresión no lineal para el ajuste de las correlaciones seleccionadas

Los resultados de la regresión no lineal para determinar los coeficientes de los modelos seleccionados (ec. 1-3) mediante la correlación con los valores del k_{La} experimental se presentan a continuación:

$$k_L a = 8488,18 \left(\frac{P_g}{V_L} \right)^{1,85724} \cdot \vartheta_s^{3,0757} \cdot \mu_a^{-3,56826} \quad (\text{ec. 22})$$

$$k_L a = 2,14031 \left(\frac{P_g}{V_L} \right)^{-0,59271} \cdot \vartheta_s^{0,63622} \cdot \left(1 + \frac{\mu_a}{2,04546E-10} \right)^{-1} \quad (\text{ec. 23})$$

$$k_L a = 309,162 \cdot \left(\frac{P_g}{V_L} \right)^{-0,125733} \cdot \vartheta_s^{0,253056} \cdot N^{-0,050192} \cdot \left(\frac{\mu_a}{\mu_g} \right)^{1,63527} \quad (\text{ec. 24})$$

De acuerdo con los resultados obtenidos, el modelo que mejor predice el valor de $k_L a$ para un cultivo de *B. licheniformis* es el del tipo de la expresión propuesta por Ryu y Humphrey (37) que es capaz de explicar el 99,45 % de la variabilidad en el $k_L a$ experimental.

DISCUSIÓN

Como puede observarse en las curvas de flujo (figura 1) así como en los resultados de la tabla 1, ambos modelos estudiados (Herschel-Bulkley y Ley de Potencia) representan estadística y correctamente los datos experimentales obtenidos con un alto porcentaje del coeficiente de determinación. En el caso del modelo de Herschel-Bulkley, el valor del esfuerzo cortante inicial es bajo ($\tau_0=3,33$ mPa) y pudiera considerarse dentro del rango de error permitido. Debido a su sencillez se toma el modelo de Oswald de Waele o Ley de Potencia para determinar el comportamiento reológico de un cultivo de *B. licheniformis* a las condiciones estudiadas.

El comportamiento encontrado para ambas concentraciones de cultivo con presencia de EPS fue el de un fluido pseudoplástico que concuerda con informes previos para *Bacillus licheniformis* (40), en *Bacillus subtilis* (13) y en la producción de levana a partir de *Halomonas sp.* (19)

Las viscosidades aparentes encontradas para ambas concentraciones de cultivo fueron iguales a 3,41 y 1,46 mPa.s, respectivamente. Estos valores son relativamente bajos en comparación con cultivos de hongos filamentosos (30) y con fluidos poliméricos a altas concentraciones (15, 21).

Las dinámicas representadas gráficamente en la figura 2a muestran que los polinomios ajustados representan exitosamente los datos

Tabla 3. Exponentes de las ecuaciones 1-3

Sistema	Pg/V	v_s	μ_a	N	μ_a/μ_g	Referencia
Agua-glicerol	0,80	0,30	-0,40	2,20	-	(36)
Agua-CMC	0,80	0,33	-0,50	2,40	-	(35)
Agua/Agua-goma xantano	0,60	0,5-0,67	-0,67	2,00	-	(11)
Agua/Agua-goma xantano	0,60	0,5-0,67	-1,00	2,00	-	(33)
Cultivo de <i>T. reesei</i>	0,50	0,15	-0,50	-	-	(21)
Goma xantano y CMC	0,45	0,50	-0,32	-	-	(15)
Goma xantano y CMC	0,44	0,47	-1,00	-	-	(15)
Cultivo de <i>B. licheniformis</i>	1,86	3,07	-3,57	-	-	Este trabajo
Cultivo de <i>B. licheniformis</i>	-0,59	0,66	-1,00	-	-	Este trabajo
Cultivo de <i>B. licheniformis</i>	-0,13	0,35	-	-0,66	0,63	Este trabajo

experimentales de suministro de oxígeno con un $R^2 = 98,85 \%$ y de consumo ($R^2 = 99,11 \%$) para el caso del ejemplo mostrado. El ajuste para el resto de las corridas experimentales es similar. Nótese en la figura 2b, la tendencia lineal en la representación de la pendiente de la dinámica del oxígeno contra su concentración ($R^2 = 98,86 \%$).

Los valores del k_La experimental obtenidos mediante esta metodología y que se muestran en la tabla 2 varían desde un mínimo de 0,0056 hasta un valor máximo de 0,981 s^{-1} . Algunos de estos valores son superiores a los reportados para cultivos de *Aspergillus awamori* (30) y de *Tsukamurella paurometabola* (49).

En la tabla 2 puede observarse que el valor de k_La es máximo cuando la viscosidad aparente, el flujo de aire y la agitación se encuentran en el nivel mínimo. La viscosidad aparente ejerce una fuerte influencia en k_La lo que puede observarse en esta propia tabla ya que para los mismos valores de N y Q el aumento de la μ_a disminuye el valor de k_La de 0,981 a 0,01971 s^{-1} . Este mismo comportamiento fue observado para cultivos de *Aspergillus awamori* en un fermentador convencional de 10 L (30).

Diversas correlaciones para predecir el coeficiente de transferencia de masa en fluidos no newtonianos similares a las obtenidas en este trabajo, han sido propuestas por diferentes autores en reactores de tanque agitado. Los valores de los exponentes para estas correlaciones así como los obtenidos en este trabajo empleando las tres correlaciones propuestas, se muestran en la tabla 3.

Como puede observarse en esta tabla los valores de los exponentes obtenidos en este trabajo difieren a los encontrados por los autores referenciados en ella, particularmente para las dos últimas correlaciones que no muestran un nivel de ajuste significativo con los datos experimenta-

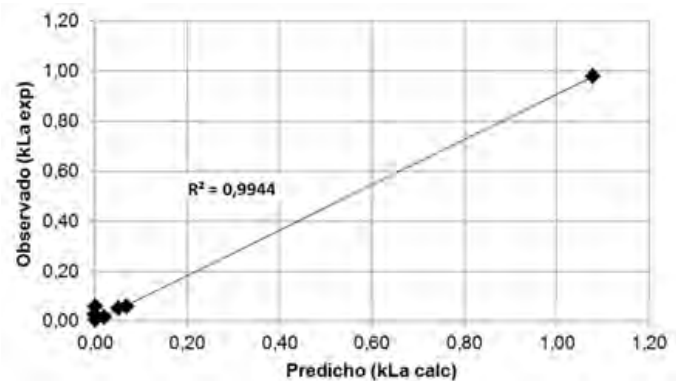


Figura 3. Valores del k_La experimental vs. el predicho por el modelo seleccionado

les lo que pudiera deberse a que se trabajó con un cultivo real. Sin embargo, la ecuación 22 resultó capaz de representar con éxito el 99,45 % de los datos experimentales lo que puede observarse en la figura 3. Los parámetros obtenidos para esta ecuación constituyen el principal aporte de este trabajo.

CONCLUSIONES

El modelo de Oswald de Waele representa el comportamiento pseudoplástico de un cultivo de *B. licheniformis* a las condiciones estudiadas. En estas condiciones, los valores del k_La experimental obtenidos se encuentran fuertemente influenciados por la viscosidad aparente y se ubican dentro de un amplio rango que varía desde un mínimo de 0,0056 hasta un valor máximo de 0,981 s^{-1} . La correlación propuesta resultó ser capaz de representar exitosamente el 99,45 % de los datos experimentales.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer al Centro de Ingeniería Genética y Biotecnología de Camagüey, perteneciente al Ministerio de Ciencia, Tecnología

y Medio Ambiente y a la Universidad de Camagüey "Ignacio Agramonte Loynaz", perteneciente al Ministerio de Educación Superior de la República de Cuba por el apoyo material y financiero recibido para la ejecución de este trabajo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Silbir, S.; Dagbagli, S.; Yegin, S.; Baysal, T.; Goksungur, Y. Levan production by *Zymomonas mobilis* in batch and continuous fermentation systems. *Carbohydr Polym* 99: 454-461, 2014.
2. Salehizadeh, H.; Yan, N. Recent advances in extracellular biopolymer flocculants. *Biotechnol Adv En prensa*, 2014.
3. Porras, J.R.; Ávila, Á.; Rodríguez, M.E.; Miranda, A.; Escalante, A.; González, R.; Olvera, C.; López, A. Levan-type FOS production using a *Bacillus licheniformis* endolevanase. *Process Biochem* 49: 783-790, 2014.
4. Nakapong, S.; Pichyangkura, R.; Ito, K.; Iizuka, M.; Pongsawasdi, P. High expression level of levansucrase from *Bacillus licheniformis* RN-01 and synthesis of levan nanoparticles. *Int J Biol Macromol* 54: 30-36, 2013.
5. Jin, M.; Zhao, K.; Huang, Q.; Xu, C.; Shang, P. Isolation, structure and bioactivities of the polysaccharides from *Angelica sinensis* (Oliv.) Diels. A review. *Carbohydr Polym* 89: 713-722, 2012.
6. Donot, F.; Fontana, A.; Baccou, J.C.; Schorr-Galindo, S. Microbial exopolysaccharides. Main examples of synthesis, excretion, genetics and extraction. *Carbohydr Polym* 87: 951- 962, 2012.
7. Zhang, T.; Li, R.; Qian, H.; Mu, W.; Miao, M.; Jiang, B. Biosynthesis of levan by levansucrase from *Bacillus methylotrophicus* SK 21.002. *Carbohydr Polym* 101 975-981, 2014.
8. Shih, I.-L.; Wang, T.-C.; Chou, S.-Z.; Lee, G.-D. Sequential production of two biopolymers-levan and poly- γ -lysine by microbial fermentation. *Bioresource Technol* 102: 3966-3969, 2011.
9. Ghaly, A.E.; Arab, F.; Mahmoud, N.S.; Higgins, J. Production of levan by *Bacillus licheniformis* for use as a soil sealant in earthen manure storage structures. *Am J Biotech Biochem* 3(2): 47-54, 2007.
10. Wu, F.-C.; Chou, S.-Z.; Shih, I.-L. Factors affecting the production and molecular weight of levan of *Bacillus subtilis* natto in batch and fed-batch culture in fermenter. *J Taiwan Inst Chem E* 44: 846-853, 2013.
11. García, F.; Gomez, E. Mass transfer coefficient in stirrer tank reactors for xanthan solutions. *Biochem Eng J* 1: 1-10, 1998.
12. Bae, I.Y.; Oh, I.-K.; Lee, S.; Yoo, S.-H.; Lee, H.G. Rheological characterization of levan polysaccharides from *Microbacterium laevaniformans*. *Int J Biol Macromol* 42: 10-13, 2008.
13. Choi, S.-H.; Park, J.-S.; Whang, K.-S.; Yoon, M.-H.; Choi, W.-Y. Production of microbial biopolymer, poly(γ -glutamic acid) by *Bacillus subtilis* BS 62. *Agr Chem Biotechnol* 47(2), 2004.
14. Freitas, F.; Alves, V.D.; Reis, M.A.M. Advances in bacterial exopolysaccharides. From production to biotechnological applications. *Trends Biotechnol* 29(8): 388-398, 2011.
15. Gabelle, N. C.; Augier, F.; Carvalho, A.; Rousset, R.; Morchain, J. Effect of tank size on k_La and mixing time in aerated stirred reactors with non-Newtonian fluids. *Can J Chem Eng* 89: 1139-1153, 2011.
16. Schaepe, S.; Kuprijanov, A.; Sieblist, C.; Jenzsch, M.; Simutis, R.; Lübbert, A. k_La of stirred tank bioreactors revisited. *J Biotechnol* 168: 576-583, 2013.
17. Takors, R. Scale-up of microbial processes. Impacts, tools and open questions. *J Biotechnol En prensa*, 2012.
18. Moucha, T.; Linek, V.; Erokhin, K.; Rejl, J.F.; Fújasová, M. Improved power and mass transfer correlations for design and scale-up of multi-impeller gas-liquid contactors. *Chem Eng Sci* 64: 598-604, 2009.
19. Poli, A.; Kazak, H.; Gürleyenda?, B.; Tommonaro, G.; Pieretti, G.; Öner, E.T. and Nicolaus, B. High level synthesis of levan by a novel *Halomonas* species growing on defined media. *Carbohydr Polym* 78: 651-657, 2009.
20. Radchenkova, N., Vassilev, S., Martinov, M., Kuncheva, M., Panchev, I., Vlaev, S. and Kambourova, M. Optimization of the aeration and agitation speed of *Aeribacillus palidus* 418 exopolysaccharide production and the emulsifying properties of the product. *Process Biochem* 49: 576-582, 2014.
21. Albaek, M.O. Evaluation of the efficiency of alternative enzyme production technologies. Denmark: Technical University of Denmark; 2012.
22. Gabelle, J.-C., Jourdir, E., Licht, R.B., Ben Chaabane, F., Henaut, I., Morchain, J. and Augier, F. Impact of rheology on the mass transfer coefficient during the growth phase of *Trichoderma reesei* in stirred bioreactors. *Chem Eng Res Des* 75: 408-417, 2012.

23. Mendes, C.E. ; Badino, A.C. Oxygen transfer in different pneumatic bioreactors containing viscous Newtonian fluids. Chem Eng Res Des in press, 2014.
24. Steffe, J.f. Rheological Methods in Food Process Engineering. 2nd ed. East Lansing, MI, USA: Freeman Press; 428. 1996.
25. Chhabra, R.P.; Richardson, J.F. Non-Newtonian Flow in the Process Industries. Oxford, Great Britain: Butterworth-Heinemann; 1999.
26. Nienow, A.W.; Elson, T.P. Aspects of mixing in rheologically complex fluids. Chem Eng Res Des 66(1): 5-15, 1988.
27. García, F.; Gómez, E. Bioreactor scale-up and oxygen transfer rate in microbial processes. An overview. Biotechnol Adv 27: 153-176, 2009.
28. Doran, P.M. Bioprocess Engineering Principles. Sydney, Australia: Elsevier Science & Technology Books; 1995.
29. Michel, B.J.; Miller, S.A. Power requirements of gas-liquid agitated systems. AIChE J 8: 262-267, 1962.
30. Badino Jr., A.C., Facciotti, M.C.R. and Schmidell, W. Volumetric oxygen transfer coefficients (kLa) in batch cultivations involving non-Newtonian broths. Biochem Eng J 8: 111-119, 2001.
31. Gavrilescu, M., Roman, R.V. and Efimov, V. The volumetric oxygen mass transfer coefficient in antibiotic biosynthesis liquids. Acta Biotechnol 13(1): 59-74, 1993.
32. Xie, M.-h., Xia, J.-y., Zhou, Z., Zhou, G.-z., Chu, J., Zhuang, Y.-p., Zhang, S.-l. and Noorman, H. Power consumption, local and average volumetric mass transfer coefficient in multiple-impeller stirred bioreactors for xanthan gum solutions. Chem Eng Sci 106: 144-156, 2014.
33. García, F. ; Gómez, E. Estimation of oxygen mass transfer coefficient in stirrer tank reactors using artificial neuronal networks. Enzyme Microb Tech 28: 560-569, 2001.
34. García, F., Gomez, E., Santos, V.E. and Merchuk, J.C. Oxygen uptake rate in microbial processes. An overview. Biochem Eng J 49: 289-307, 2010.
35. Nishikawa, M., Nakamura, M. and Hashimoto, K. Gas absorption in aerated mixing vessels with non-Newtonian liquid. J Chem Eng Jpn 14(3): 227-232, 1981.
36. Yagi, H. and Yoshida, F. Gas absorption by Newtonian and non-Newtonian fluids in sparged agitated vessels. Ind Eng Chem Process Des Dev 14: 488-493, 1975.
37. Ryu, D.D.Y. and Humphrey, A.E. A reassessment of oxygen transfer rate in antibiotic fermentation. J Biosci Bioeng 50: 424-431, 1971.
38. Gabelle, J.-C., Augier, F., Carvalho, A., Rousset, R. and Morchain, J. Effect of tank size on kLa and mixing time in aerated stirred reactors with non-newtonian fluids. The Canadian Journal of Chemical Engineering 89(5): 1139-1153, 2011.
39. Rizo, M.; González, N.; Ramos, L.B.; Pérez, A. Optimización de un medio de cultivo con base en sacarosa para la producción de un probiótico para camarones. Rev ICIDCA En prensa, 2014.
40. Haireen, N. Screening of factors influenced exopolymer production by *Bacillus licheniformis* using 2-level factorial design [Bachelor of Science]. Malaysia: Universiti Teknologi Malaysia; 2009.
41. Poli, A., Kazak, H., Gürleyendag, B., Tommonaro, G., Pieretti, G., Toksoy Öner, E. and Nicolaus, B. High level synthesis of levan by a novel Halomonas species growing on defined media. Carbohydr Polym 78: 651-657, 2009.
42. GraphPad Software Inc. GraphPad Prism. 6.00 for Windows ed. La Jolla, California, USA: GraphPad Software, Inc.; 2012.
43. Michel, B.J.; Miller, S.A. Power requirements of gas-liquid agitated systems. AIChE J 8: 262-266, 1962.
44. Cromwick, A.M., Birrer, G.A. and Gross, R.A. Effects of pH and aeration on γ -poly(glutamic acid) formation by *Bacillus licheniformis* in controlled batch fermentor cultures. Biotechnol Bioeng 50: 222-227, 1996.
45. Yoon, S.H., Do, J.H., Lee, S.Y. and Chang, H.N. Production of poly-glutamic acid by fed-batch culture of *Bacillus licheniformis*. Biotechnol Lett 22: 4, 2000.
46. Wang, D.I.C., Cooney, C.L., Demain, A.L., Dunnill, P., Humphrey, A.E. and Lilly, M. Fermentation and Enzyme Technology. New York: John Wiley and Sons; 1979.
47. StatPoint Technologies Inc. Statgraphics Centurion XVI. 16.1.10 ed. Warrenton, VA, USA: StatPoint Technologies Inc.; 2010.
48. García, F.; Gómez, E. Prediction of gas-liquid mass transfer coefficient in sparged stirred tank bioreactors. Biotechnol Bioeng 92: 761-772, 2005.
49. González, N. Tecnología de fermentación del agente biológico activo del bionematicida HeberNem. Camagüey, Cuba: Universidad de Camagüey "Ignacio Agramonte Loynaz"; 2010.

La quimiometría y la industria del azúcar y sus derivados

Estrella P. Zayas-Ruiz¹, Magdalena Lorenzo-Izquierdo², Felipe O. Fragoso-Concepción¹

1. Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría" (CUJAE). Facultad de Ingeniería Química. 114 No. 11901 e/ Ciclovía y Rotonda. Marinao, La Habana, Cuba. estrella@quimica.cujae.edu.cu
2. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar. Vía Blanca 804 y Carretera Central. San Miguel del Padrón, La Habana, Cuba

RESUMEN

Se presentan en el trabajo resultados obtenidos en la aplicación de la quimiometría a diferentes datos experimentales de caracterización de rones cubanos y mieles finales de caña de azúcar. Se utilizan dos softwares para estos fines y los principales resultados fueron la identificación de adulteraciones de rones añejos y añejos extra con ron carta blanca, utilizando la espectroscopía ultravioleta visible y la posibilidad de separar e identificar por regiones de Cuba las mieles finales de caña, debido a su diferente composición química.

PALABRAS CLAVE: ron añejo, mieles finales, quimiometría, adulteración.

ABSTRACT

Results are presented in the work achieved in the implementation of chemometrics to different experimental data for characterization of Cuban rums and final sugar cane molasses. Two softwares were used for this purpose and the main results were identifying adulteration of aged and extra- aged rums with white rum using visible UV spectroscopy and the possibility of separating and identifying the final sugar cane molasses by regions of Cuba due to their different chemical composition.

KEYWORDS: rum , final molasses , chemometrics , adulteration.

INTRODUCCIÓN

La quimiometría o estadística multivariable es una herramienta fundamental en los trabajos orientados a determinar la autenticidad de los alimentos o comprobar adulteraciones. Entre las técnicas estadísticas más utilizadas están: análisis de componentes principales (PCA), análisis de clúster jerárquico (HCA), análisis discriminante canónico, redes neuronales artificiales, métodos de clasificación y técnicas de minería de datos en general. También se desarrollan modelos estadísticos multivariables para la predicción de parámetros analíticos a partir de mediciones indirectas, lo cual agiliza y simplifica la detección de una adulteración o un error de calidad.

En la actualidad en Cuba se trabaja en estas temáticas en el Centro de Referencia de Alkoholes y Bebidas que pertenece al Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar, y en la Facultad de Ingeniería Química de la Cujae, en dos líneas fundamentales: ron cubano y mieles cubanas. El objetivo de este trabajo es exponer algunos de los resultados alcanzados (1-3).

MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizaron estudios de espectros UV en muestras de rones añejos, añejos extra y muestras adulteradas con un 20 y 50 % de un ron carta blanca. Se empleó el programa UNSCRAMBLER

v. 8.0 (CAMO ÅS, N-7401) (4) para realizar el análisis de estos componentes y se utilizó la técnica de validación cruzada para determinar el número de componentes principales que se necesitan en el modelo.

Para realizar un estudio del análisis de exploración de datos de melazas de caña de diferentes regiones del país: occidental (OC), central (C) y oriental (O), se tomaron 21 muestras de cada región y a cada una se les determinaron experimentalmente 13 variables de composición físico-química: cenizas (%), sacarosa (%), glucosa (%), fructosa (%), viscosidad, polisacáridos + oligosacáridos (%), azúcares reductores (HPLC) (%), lodos (%), cristales (%), azúcares totales HPLC, brix (%), pureza (%), relación impureza/agua (I/W). Mediante el programa Quimiometrix v1.0 (5) se evalúa la posibilidad de identificar las melazas cubanas de diferentes regiones del país utilizando el análisis exploratorio de componentes principales (PCA).

Se utilizó un espectrofotómetro UV-VIS ULTROSPEC 2000 y HPLC Knauer con columna intercambiadora de catión EuroKat C.

RESULTADOS DISCUSIÓN

La adulteración de muestras se analiza teniendo en cuenta la comparación de los espectros UV-visible de los rones añejos, añejo extra y ron carta blanca con las mezclas realizadas de estos rones añejos, con la adición del 20 y 50 % de ron carta blanca. En el análisis de componentes principales (figura 1) se observa cómo el ron carta blanca se encuentra bien separado de los añejos, así como las muestras adulteradas que se separan de sus añejos originales de acuerdo al nivel de adulteración. La separación entre carta blanca y añejo la da el componente 1, mientras que el componente 2 explica el nivel de adulteración (1).

La identificación de productos alimenticios ha sido ampliamente documentada en la literatura científica y ejemplo de ello son los trabajos de Santos y Rech en café y en bebidas saborizadas a base de soja respectivamente (6 y 7) siendo numerosas las técnicas analíticas empleadas por los diferentes autores.

Similares resultados se obtienen utilizando la espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (1), a pesar de que no se muestren en este trabajo los resultados, se han llegado a obtener modelos de clasificación de rones empleando en este caso cromatografía de gases (2).

La figura 2 muestra un gráfico de puntos, del análisis de componentes principales, en el que puede observarse cómo se logra la separación de

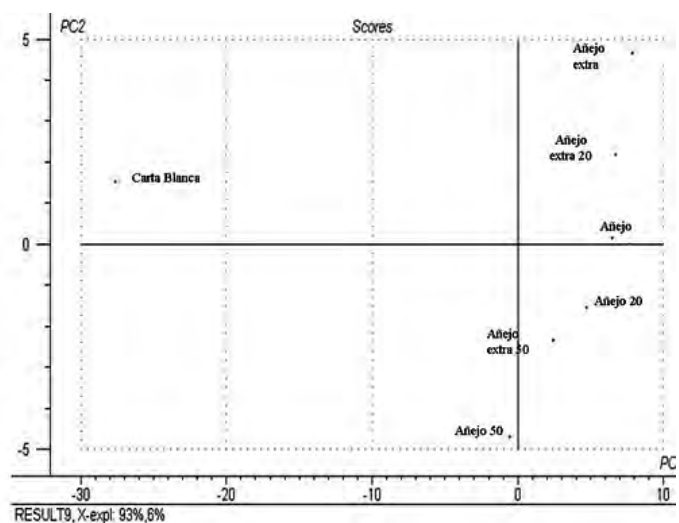


Figura 1. Análisis de componentes principales (PCA) con datos originales de los espectros UV visible.

Legenda:

Añejo 20: ron añejo adulterado con 20 % de carta blanca

Añejo 50: ron añejo adulterado con 50 % de carta blanca

Añejo extra 20: ron añejo extra adulterado con 20 % de carta blanca

Añejo extra 50: ron añejo extra adulterado con 50 % de carta blanca.

Carta blanca: ron carta blanca.

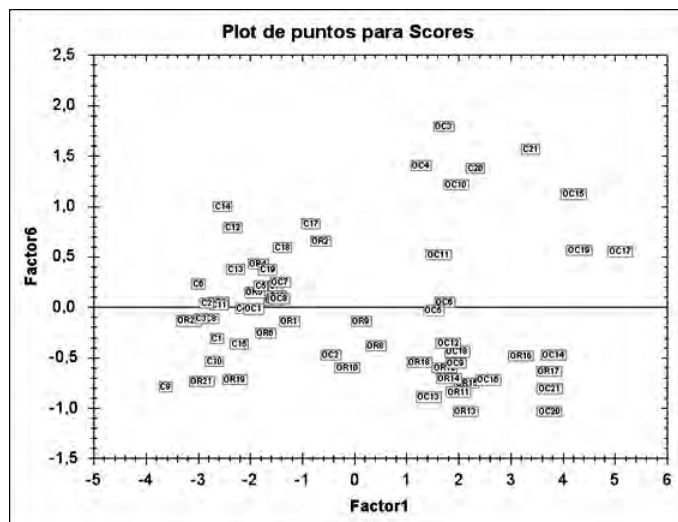


Figura 2. Separación de las mieles de la región occidental mediante los factores 1 y 6.

las melazas de la región occidental (OC) con los factores 1 y 6 mediante un análisis exploratorio realizado con la utilización del software Quimiometrix, desarrollado en Cuba (8). Existe una concentración de las mieles de la región occidental a la derecha, ya que en esa región se tie-

nen 17 de las 21 muestras que fueron analizadas, siendo el factor 1 el que logra la separación con el factor 6.

Se pudo determinar mediante el gráfico de puntos de cargas que las variables que más influyen en la separación de estas melazas son: porcentaje de glucosa, de reductores, de fructosa, de azúcares totales HPLC, de cristales, de poli+oligosacáridos, de lodos, y de sacarosa. Mediante un procedimiento similar se puede lograr la separación de las melazas de la región central (C) con los factores 1 y 13, siendo las variables viscosidad, relación impureza / agua, brix y pureza HPLC, las que más influyen en esta separación. Trabajos similares pero con miel de abejas fueron realizados por Nates y Zuluega (9 y 10).

CONCLUSIONES

Se pueden identificar las muestras de añejos adulterados con ron carta blanca mediante el empleo de la espectroscopía ultravioleta-visible y el

análisis de componentes principales. La mejor separación de los grupos se logra cuanto más adulterado haya sido el ron. Utilizando la espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier es posible obtener resultados similares a los anteriores.

Las técnicas experimentales de determinación de la composición físico química utilizadas, sirven para diferenciar melazas de diferentes regiones de Cuba. Se logra separar la región occidental con el factor 1 al combinarlo con el 6. Además se separa la región central con el factor 1 al combinarlo con el 7, así como con el factor 1 al combinarlo con el 13. Todos estos factores, que son combinaciones de las variables medidas experimentalmente, aparecen identificados mediante el análisis de componentes principales al aplicar el análisis exploratorio de datos.

A partir de los resultados obtenidos que se presentan así como los que aparecen en la literatura consultada, se puede apreciar que la quimiometría es una herramienta muy útil en el estudio de adulteraciones e identificación de productos derivados de la caña de azúcar.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Lorenzo, M.; *et al.* Uso de algunas herramientas analíticas en la determinación de la autenticidad de ron añejo. Revista ICIDCA. Sobre los derivados de la caña de azúcar, 2011, Vol. 45, No.3 septiembre-diciembre, páginas 55-59. ISSN 0138-6204
2. Zayas, E. P.; *et al.* Clasificación multivariante de rones añejos cubanos. Revista cubana de ingeniería Vol. V, No. 2, mayo - agosto, 2014, pp. 62 - 67. ISSN 2223 -1781.
3. Fragoso Concepción, Felipe Orestes, Zayas Ruiz, Estrella Patricia, Cedrón Mola, María Herminia. Identificación de mieles finales cubanas por regiones usando Quimiometría. 17 Convención de Ingeniería y Arquitectura, 2014, Memorias del evento. CD-ROM . ISBN 978-959-261-463-3
4. Næs, T.; *et al.* A user-friendly guide to multivariate calibration and classification. Edited by NIR Publications. Chichester, UK.2002. ISBN 0952866625, 9780952866626
5. Talavera, I.; *et al.* Centro de Aplicaciones de Tecnologías de Avanzada (CENATAV). Quimiometrix. CD-ROM Versión 1.0, La Habana, Cuba: 2013.
6. Santos, M. C. Utilização da espectroscopia na região do infravermelho (FTIR) e Quimiometria na identificação do café torrado e moído adulterado on line . Dissertação (Mestrado em Agronomia)- Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2005. Páginas 1-77. <http://repositorio.ufla.br/handle/1/2204>. 15 de mayo de 2015 .
7. Rech, A. Avaliação da espectroscopia no infravermelho combinada a análise multivariada para caracterização e controle de qualidade de bebidas saborizadas a base de soja. on line . Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Química. Curso de Química, 2014. Páginas 1-47 Industrial. <http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/110010> 15 de mayo de 2015 .
8. Talavera, I. *et al.* Quimiometrix II, una plataforma automatizada para el procesamiento multivariante de datos químicos y bioquímicos. Revista Cubana de Química, 2013, Vol XXV, No. 3 Septiembre-diciembre, pp. 257-265.
9. Nates-Parra, G.; *et al.* Origen geográfico botánico de mieles de *Apis mellifera* (APIDAE) en cuatro departamentos de Colombia. Acta Biológica Colombiana, 2013, Vol. 18, No. 3, páginas 427-438. ISSN 1900-1649.
10. Zuluega, C. M.; Díaz, C.; Quizacán, C. Quimiometría aplicada a la diferenciación por origen de productos de las abejas. Revista Alimentos Hoy, 2011, Vol. 20, No 24, páginas 24-46. ISSN 2027-291X.

La generación y uso del hidrógeno para el suministro de caña a la industria azucarera

Antonio Valdés-Delgado

Cubaenergía

20 No. 4111 e/18 A y 47, Playa, La Habana, Cuba

avaldes@cubaenergia.cu

RESUMEN

Tecnologías disponibles actualmente posibilitan generar en fábricas de azúcar más de 100 kW-h de energía eléctrica por toneladas de caña procesada. Una fábrica de azúcar consume entre 25-30 kW-h/t caña, por lo que pudiera existir una disponibilidad de energía eléctrica de unos 75 kW-h/t caña.

Siendo la electrólisis una de las tecnologías disponibles para la obtención de hidrógeno, significa la posibilidad de producir este combustible en una fábrica de azúcar. Se analizan alternativas de producción de hidrógeno que posibilitan disponer del combustible necesario para el suministro de la caña a las fábricas.

PALABRAS CLAVE: cogeneración, generación, hidrogeno, electrolisis

ABSTRACT

Actual technologies allows generation of more than 100 kW-h of electric energy per ton of processed cane. A sugar factory consume between 25-30 kW-h/ton cane, so it is possible to achieve a surplus of around 75 25-30 kW-h/ton cane

One of available technologies to produce hydrogen is by electrolysis which signifies the possibility of its production at sugar factories. Alternatives for hydrogen production are analyzed for allowing a disposal of the necessary fuel to supply the sugar cane to factories.

KEYWORDS: cogeneration, generation, hydrogen, electrolysis

INTRODUCCIÓN

Las tecnologías energéticas disponibles en la industria azucarera de la caña de azúcar posibilitan producir más de 100 kW-h por toneladas de caña procesada; si se utilizan además los residuos agrícolas de la cosecha este valor casi se puede duplicar (1).

La fábrica de azúcar consume de 25 - 30 kW-h / t caña (2), luego se puede apreciar cómo existe una disponibilidad de energía eléctrica hasta de 75 kW-h / t caña. En instalaciones actuales esta energía se

entrega a la red nacional para suplir necesidades de la población o de otras industrias.

Siendo la electrólisis una de las tecnologías disponibles para la obtención de hidrógeno, significa la posibilidad de producir este combustible a partir de la electricidad generada en una fábrica de azúcar. Este trabajo analiza la posibilidad de satisfacer las necesidades de combustible automotor de la fábrica de azúcar a partir del uso del hidrógeno producido por electrólisis (3). La energía eléctrica empleada se obtiene de su sobrante del proceso de producción del azúcar.

MATERIALES Y MÉTODOS

Alternativas organizativas y tecnológicas

Estudios de un caso

La posibilidad de sustituir el combustible fósil en el transporte de la caña, a partir del uso del hidrógeno, (4, 5). producido utilizando la energía eléctrica generada en la fábrica de azúcar, para ello se analiza una fábrica con una capacidad de procesar 10 000 toneladas de caña, en un período de cosecha de 180 días y un rendimiento de 80 toneladas de caña por hectárea.

Etapa de cosecha

Se considera un sistema de cosecha con un suministro directo de caña a la fábrica (TD) por medio de camiones, se estima una distancia máxima de 12 kilómetros de transportación. Se emplean camiones con capacidad de carga de 10 toneladas y un remolque con similar capacidad, para un total de 20 toneladas por viaje-camión y un consumo de diesel de 0,55 litros/kilómetro (6).

Considerando la distancia media de 12 kilómetros, significa un recorrido de 24 km / viaje-camión y considerando la capacidad de caña procesada diariamente, significa un recorrido total diario de 12 000 kilómetros. Sobre la base del consumo fijado, se necesitan 5,6 toneladas de diesel diariamente, o sea, 1 008 t/zafra. En la tabla 1 se exponen los datos recopilados.

Tabla 1. Consumo combustible para la transportación de caña a la fábrica de azúcar

Sistema	Distancia a recorrer por camión día (km)	Consumo de combustible camiones (t / zafra)
Tiro directo	12 000	1 008

Tabla 2. Cantidad de energía eléctrica producida

Presión de vapor (kg /cm ²)	Energía eléctrica generada	
	kW · h	kW · h/t caña
28	21 157	50,7
42	25 728	61,7
56	28 470	68,3
84	32 012	76,7

Etapa de generación de electricidad

En el caso considerado se analizan cuatro valores de presión: 28, 42, 56 y 84 kg/cm², con una presión de escape o extracción de 1,8 kg/cm² (7). En la tabla 2 se muestra la cantidad de energía eléctrica posible de producir para un consumo de 50 kg vapor/t caña en el proceso tecnológico, empleando un turbogenerador de contrapresión y una generación de vapor de 2,0 t / t bagazo.

Se puede observar cómo se producen incrementos significativos en la generación por el efecto del aumento en la presión de vapor.

Etapa de producción y consumo de hidrógeno

La producción de hidrógeno por el procedimiento de la electrólisis consume unos 5 kW · h / m³ (8). La cantidad necesaria para el caso en estudio se expone en la tabla 3.

Tabla 3. Hidrógeno necesario para el sistema de cosecha estudiado

Sistema cosecha	Cantidad total diesel		Hidrógeno necesario	
	t / día	t / zafra	m ³ /día (10 ³)	m ³ /zafra (10 ⁶)
Tiro directo	5,6	1 008	19,96	3,59

La energía eléctrica necesaria para satisfacer la producción del hidrógeno, se expone en tabla 4

Tabla 4. Energía eléctrica necesaria para producir el hidrógeno empleado

Sistema	Consumo de energía eléctrica	
	MW / día	GW / zafra
Tiro directo	99,8	17,96

En relación con la cantidad de energía eléctrica que se necesita consumir en función de la cantidad generada y considerando las alternativas estudiadas en la tabla 5 se muestran las magnitudes de esta energía. Es de señalar que se establece un consumo de 30 kW·h / t caña para la producción del azúcar.

Incidencia del uso del hidrógeno sobre la producción de gases del efecto invernadero

El hidrógeno usado en motores de combustión interna produce como residual el vapor de agua, no aportando gases que contribuyan al efecto invernadero. La sustitución del combustible fósil -

Tabla 5. Cantidad de energía eléctrica consumida para la generación de hidrógeno del total producido para las alternativas estudiadas

Presión de vapor (kg/cm ²)	Energía eléctrica			Cantidad consumida en la producción del hidrógeno disponible de la producción de azúcar (%)
	Generada MW / día	Disponible a partir del consumo		
		en fábrica de azúcar MW / día	en la producción de hidrógeno MW / día	
28	507,8	207,8	108,0	48,0
42	617,5	317,5	217,7	31,4
56	683,3	383,3	283,5	26,0
84	768,3	468,3	368,5	21,3

el diesel - que consumen los camiones para la transportación de la caña, usando este combustible ecológico, permite eliminar el envío de estos gases a la atmósfera.

CONCLUSIONES

La cantidad de energía eléctrica que se genera en una fábrica de azúcar de caña es suficiente

para cubrir sus propias necesidades y se puede obtener una cantidad adicional para generar un combustible automotor: el hidrógeno.

La cantidad de combustible necesario para la transportación actual de la caña indica cifras tales que empleando solo una parte de la energía eléctrica que se puede producir en la fábrica de azúcar en la generación de hidrógeno, se pueden satisfacer totalmente las necesidades de combustible para la transportación de la caña.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Valdés, A. Alternativas generación y cogeneración de energía eléctrica. Memorias Seminario Energía en la Industria del Azúcar y el Alcohol Itajuba Brasil (2004) Julio.
2. Hugot, E. Handbook of cane sugar engineering. Durod, París 1970 pág. 949.
3. Valdés, A. La potencialidad de la biomasa cañera para la producción de hidrogeno. HYPOTHESIS VI Symposium Internacional La Habana Cuba (2005) Mayo.
4. Agro energía Un Desafío para Chile Valdés A. Capitulo X Generación y almacenamiento de Hidrogeno Fuentes Alternativas y Potencial pp. 121-136 Universidad de Chile Serie Ciencias Agronómicas (2006) No. 11.
5. Valdés, A. Alternativas para la producción de Hidrogeno a partir de la industria azucarera. HYPOTHESIS VII Symposium Internacional. (2007) Ciudad de Mérida, México.
6. Valdés, A. Generación y uso del Hidrogeno para el suministro de la caña a la industria azucarera. Memorias de la XII Conferencia Mundial del Hidrogeno como Combustible. (1998) Argentina.
7. Valdés, A. La cogeneración en industrias de la caña de azúcar. Experiencias y perspectivas. Memorias Jornadas Iberoamericanas. Antigua . (2006) Guatemala.
8. Arguimbau, F. Combustible y combustión. De. José Monteso, Barcelo.

25 años de experiencia en la evaluación comparativa de la determinación de sacarosa por polarimetría y cromatografía líquida de alta eficiencia (HPLC) en miel final

Estuardo Edmundo Monroy-Benítez

Consultorías Especializadas Monroy, S. A.
ingmonroy1@yahoo.com

RESUMEN

El presente trabajo es una investigación basada en la recopilación y análisis histórico para evaluar la concentración de sacarosa en miel final a partir de los datos recopilados durante 25 años, realizando comparaciones metodológicas entre polarimetría y cromatografía líquida de alta eficiencia.

La presentación de los resultados de la investigación entre las dos metodologías actualmente utilizadas, se enfoca en confirmar que el método de polarimetría no es exacto para determinar la concentración de sacarosa en muestras de miel final o melaza de caña de azúcar, pero sigue siendo el más utilizado y creíble por la mayoría de los técnicos azucareros en fabricación.

A partir de estos estudios se plantea que se utilice la metodología HPLC como un método exacto y preciso para determinar la concentración de sacarosa en miel final, que conllevará a mejores decisiones de recuperación y de eficiencia industrial, y que los resultados por "polarimetría" sean un enfoque rutinario de control, utilizado en muchos casos como referencia en sistemas de pago/compra de melaza a clientes, pero que no debe ser la base de toma de decisiones precisas en mejoras del proceso de agotamiento industrial.

PALABRAS CLAVE: miel final, cromatografía líquida de alta eficiencia, polarimetría, sacarosa.

ABSTRACT

This is a research based on the collection and historical analysis to evaluate the concentration of sucrose in molasses from 25 years carrying out methodological comparisons between Polarimetry and high efficiency liquid chromatography (HPLC).

The approach or presentation of the results of the investigation between the two methodologies currently used, focuses on confirming that the method of Polarimetry is failed or analytically invalid, to determine the concentration of sucrose in samples of final honey or molasses of sugar cane, but is still the most widely used and credible by a majority of the technical sugar in manufacturing.

The recommendation raises that used the methodology HPLC as the reference accurate and precise to determine measurements of concentration of sucrose in final honey, which will lead to better decisions recovery and industrial efficiency, and that be finally clear that the results by "Polarimetry" are a focus of routine control, used in many cases as a reference on systems of payment/purchase of molasses to customers, but should not be the basis of accurate decision-making in exhaustion industrial process improvements.

KEYWORDS: final molasses, high efficiency liquid chromatography, polarimetry, sucrose.

INTRODUCCIÓN

El método de polarimetría es el oficial o internacionalmente reconocido en la industria azucarera mundial por ICUMSA (1). El análisis científico de su principio de medición, basado en el poder rotatorio de los carbohidratos, y la experiencia de mediciones comparativas contra métodos más precisos y exactos, como lo es en este caso el HPLC (cromatografía líquida de alta eficiencia), ha demostrado que el método de polarimetría no es exacto para la determinación de mieles finales debido principalmente a la existencia de altos niveles de otros azúcares (invertidos), con diferentes poderes rotatorios (figuras 1 y 2).

$C_{12}H_{22}O_{11} + H_2O = C_6H_{12}O_6 + C_6H_{12}O_6$			
Sacarosa	agua	glucosa	fructosa
$[\alpha]_D^{20} +66,53^\circ$		$[\alpha]_D^{20} +52,70^\circ$	$[\alpha]_D^{20} =92,40^\circ$

Figura 1. Azúcares y sus diferentes índices de rotación.

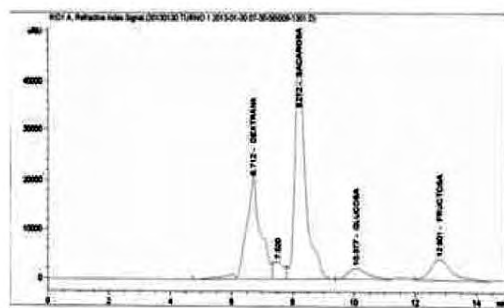


Figura 2. Cromatograma de HPLC.

El método de HPLC provee la exactitud y veracidad requerida para análisis de miel final, ya que su principio está basado en una separación de los componentes azúcares, en base a sus propiedades de intercambio iónico, así como por exclusión por tamaño molecular. Dependiendo de su geometría, el grupo hidroxilo de los diferentes azúcares interactúan con el catión, los cuales eluyen del sistema presentando diferentes tiempos. Se utiliza principalmente para el análisis de moléculas de bajo peso molecular, como lo son glucosa, fructosa, y sacarosa, las cuales entran dentro del poro de una resina existente en una columna de intercambio iónico y establece un enlace temporal con el ion, mientras que las grandes moléculas no entran fácilmente en el poro y por ello su elusión es más rápida (polisacáridos como la dextrana) (2).

Los resultados de la determinación de sacarosa y ante todo “pureza de miel final”, vino a romper el paradigma de valores de purezas de miel final de 30 a 35° cuando en realidad están entre 40 y 45°, y ello conlleva a cálculos “falsos” de agotamiento y eficiencias de extracción industrial, y todo un trabajo de regular o malo de recuperación de sacarosa en el proceso industrial.

El autor, ha trabajado durante 25 años apoyando diferentes laboratorios de ingenios azucareros en Centro América, especialmente en Guatemala y El Salvador, en mediciones paralelas entre polarimetría y cromatografía.

Hoy día, con la gran cantidad de resultados como evidencia técnica, se pretende demostrar que el método de polarimetría, no debe ser recomendado, para determinar sacarosa en miel final, ya que las falsas mediciones generan grandes pérdidas económicas a la industria azucarera al no cuantificar correctamente la sacarosa y hacer un proceso industrial ineficiente.

MATERIALES Y MÉTODOS

Metodologías analíticas

La calidad de un método analítico está altamente asociada a la precisión y exactitud de los resultados que logran una gestión eficaz, por lo que se hace necesario validar y/o verificar el método (3).

Para efectuar estas evaluaciones se preparan estándares nuevos de referencia en tres niveles de concentración, que se inyectan como muestra desconocida, para luego evaluar estadísticamente su precisión como repetibilidad, reproducibilidad, exactitud, en este caso “porcentaje de diferencia absoluta entre el valor medido y el de referencia”. Se calculan desviaciones estándares relativas de los “tiempos de retención”, “áreas de picos”, “linealidad”, “porcentaje de recuperación del analito” para lograr demostrar que el método es apto con alta confiabilidad, como lo define la norma ISO 17025:2005 (3).

La cromatografía líquida de alta eficiencia (HPLC)

Este método normalizado en ICUMSA, desde 1990 y oficializado en 2002, GS7/4/8/23, se basa en la separación cromatografía de sacarosa, glucosa y fructosa (1).

El procedimiento o protocolo analítico de laboratorio sigue siendo el mismo diseñado en los años 80-90 por la Dra. Margaret Clark en SPRI (Sugar Process Research Institute) de Louisiana, EE.UU. (2).

RESULTADOS DISCUSIÓN

Experimentalmente desde el año 1989 (hace 26 años), el autor ha aplicado la metodología de HPLC en paralelo con polarimetría, cuantificándose las diferencias entre valores reales y aparentes, con diferencias en pureza real vs. aparente, que pueden ir desde 8 hasta 20 %, no existiendo una correlación matemática bien ajustada, ni en un mismo ingenio-laboratorio, ni comparable entre otros ingenios, ya que el resultado “real”, depende totalmente de los tipos y cantidades de azúcares que contenga la miel final (figuras 3, 4 y 5)

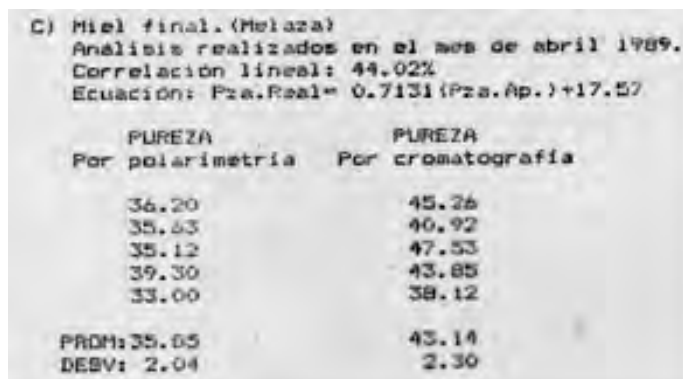


Figura 3. Guatemala 1989/1990.



Figura 4. Guatemala 1992/1993.

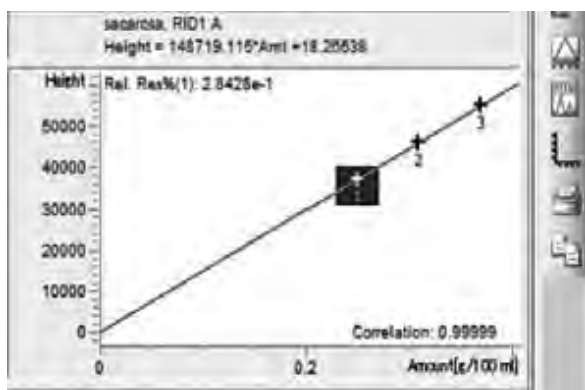


Figura 5. Curva de calibración de sacarosa.

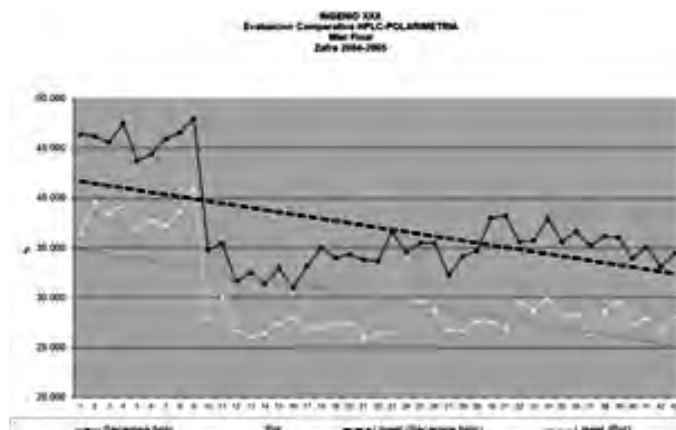


Figura 6. El Salvador 1989/1990.

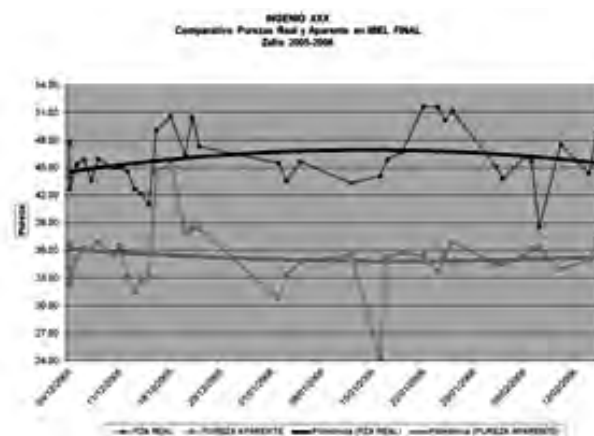


Figura 7. El Salvador 2005/2006.

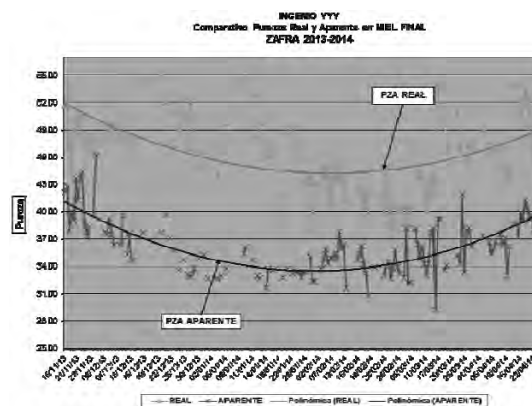


Figura 8. El Salvador 2013/2014.

Aunque existe información de todos los años desde la zafra de 1989-1990 hasta la de 2014-2015, en las figuras 6 a la 9, se puede observar algunos de los resultados experimentales comparativos de cuantificar miel final por HPLC y polarimetría en las zafras 1989/1990, 2005/2006, 2013/2014 y 2014/2015.

Las experiencias de los últimos 25 años, confirman resultados de SPRI (Sugar Processing Research Institute, Louisiana, EE.UU. 1990), y

CENGICANÑA zafra 2004-2005, sobre el rango de purezas reales en la miel final, y su comparación con la polarimetría, como se puede observar.

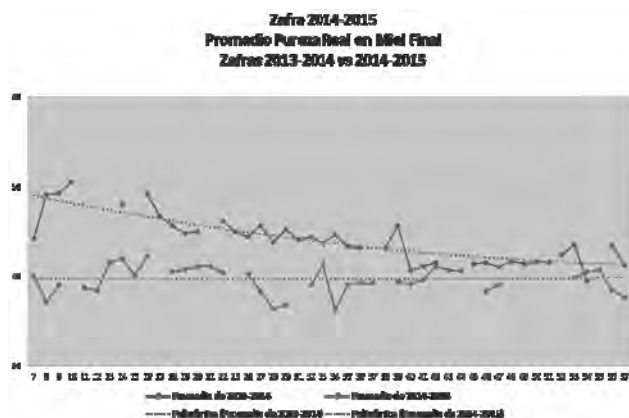


Figura 9. El Salvador 2014/2015.

CONCLUSIONES

El estudio y resultados de más de 25 años, han probado científicamente a través de pruebas de validación de métodos, que el método oficial de polarimetría no es exacto para el análisis de miel final, y el método HPLC sí provee la exactitud y veracidad requerida para dichos tipos de análisis, confirmando que existe como promedio más de 10 % de sacarosa en las mieles finales, no reportadas en sistemas polarimétricos. La causa principal es el efecto de niveles considerables de las diferentes concentraciones de glucosa, fructosa y otros azúcares con poderes rotatorios ópticos diferentes, unos negativos, y otros positivos en la miel final, los cuales generan lecturas polarimétricas falsas y típicamente bajas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ICUMSA, Libro de Métodos. Comisión Internacional para la Uniformidad de los Métodos de Análisis de Azúcar, Berlín, Alemania (2007).
 2. Clarke, M. A. Analysis of Sugars in Foods , Sugar Processing Research Institute , Inc , New Orleans, Louisiana, EE.UU., (1992).
 3. ISO 17025:2005. Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y de calibración.
-

Acercamiento a la automatización de la producción de Fitomas-E en el Icidca

Marlen Lorenzo-Maiquez, Gilberto Mesa-Mena, Félix Borroto-González

Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar
Vía Blanca 804 y Carretera Central, San Miguel del Padrón, La Habana, Cuba.
marlen.lorenzo@icidca.azcuba.cu

RESUMEN

Se presenta un acercamiento a la automatización de la planta para la producción de Fitomas-E construida en el Icidca. El Fitomas-E se obtiene por reacción química, con la incorporación de sales minerales y otros compuestos en un proceso a lotes (*batch*), donde se utilizan dos tanques enchaquetados y agitados (uno en función de reactor y otro como formulador). En este proceso el comportamiento de las variables es transitorio y requiere de la medición y control de variables analógicas y digitales, para lo cual se concibió un sistema de control automático con estructura jerárquica de tres niveles (nivel de campo, de control y de supervisión). En el nivel de campo, se utilizaron instrumentos inteligentes con salida de 4 a 20 miliamperes. En el nivel de control, se utiliza un autómatas programable diseñado para controlar procesos secuenciales en tiempo real. En el nivel de supervisión, se utiliza una PC con un software de aplicación que permite la comunicación con el autómatas, para que el operador pueda supervisar el proceso y accionar también en caso de que sea necesario.

PALABRAS CLAVE: automatización, Fitomas-E, autómatas programable.

ABSTRACT

An approach to the automation of the Fitomas-E production plant built in Icidca is made in this article. The Fitomas-E is obtained by chemical reaction, with the incorporation of mineral salts and other compounds in a batch process where two jacketed and agitated tanks are used (one as reactor and the other one as mixer). The behavior of the variables in this process is transitory and requires of the measuring and control of analogical and digital variables for which an automatic control system was conceived with hierarchical structure of three levels (field level, control level and supervision level). In the field level, intelligent instruments are used with 4 to 20 miliampers output. In the control level, a PLC is used which is designed to control sequential processes in real time. In the supervision level, a PC with an application software is used that allows the communication with the PLC, so that the operator can supervise the process and to manipulate if it is necessary.

KEYWORDS: automation, Fitomas-E, PLC.

INTRODUCCIÓN

Se conoce que desde la antigüedad se automatizaban algunas actividades repetitivas, pero su aplicación en la industria comenzó a reportarse a principios del siglo XIX. La automatización industrial inicialmente se restringía a la implementación de sistemas mecánicos que permitían controlar maquinarias o regular alguna variable física

en un proceso tecnológico, lo que se mantuvo en pequeña escala hasta mediados del siglo XX (1). Sin embargo, el surgimiento y desarrollo de la electrónica, particularmente de las computadoras digitales, provocó una revolución en la automatización; su flexibilidad para adaptarse a cualquier tarea, velocidad de respuesta, poder de cómputo, tamaño y precio, hizo verdaderamente práctica la automatización de casi todos los procesos. Con lo

que se garantiza la estabilidad en la calidad del producto y la eficiencia en el uso de los materiales y la energía; es por ello que se justifica el costo de inversión inicial, generalmente alto, requerido en la automatización de las fábricas (2, 3).

En el Icidca, a partir de la investigación, se ha logrado desarrollar diferentes tecnologías para la obtención de derivados de la caña de azúcar, con las que posteriormente se han construido plantas para su producción en mayor escala (4). Esas tecnologías comprenden las características fundamentales de los equipos tecnológicos para la planta a construir, los valores requeridos de los parámetros involucrados en el proceso y la tarea técnica con la concepción de la automatización, para garantizar el resultado. Entre las tecnologías desarrolladas en los últimos tiempos está la del bioestimulante de uso agrícola Fitomas-E (5), a partir de la cual se construyó en el propio Icidca una planta para su producción; donde la obra fue ejecutada por la empresa de servicios técnicos a la industria azucarera (ZETI) con la automatización (proyección, montaje y puesta en marcha) por parte de su unidad de asistencia técnica a la industria azucarera (ATIZ).

Este artículo se refiere a la concepción de la automatización de la planta de Fitomas-E, comentándose de manera general las soluciones técnicas implementadas finalmente.

DESARROLLO

El Fitomas-E es un producto en suspensión acuosa, obtenido por hidrólisis de una fuente pro-

teica, al que se incorporan sales minerales y otros compuestos que lo enriquecen. La hidrólisis se realiza en un reactor químico y el producto obtenido pasa a un tanque de formulado donde se mezcla con el resto de los componentes. El producto final va a un tanque agitado de almacenamiento, del que se suministra a la línea de envase (diseñada para envases plásticos de 20 litros y adquirida con su automatización incorporada). La figura 1 muestra un diagrama de los equipos tecnológicos fundamentales.

El equipo clave en la producción de Fitomas-E es el reactor. Los reactores químicos están diseñados de manera que permitan dar uniformidad a la composición de la masa reaccionante, con regulación del suministro de los materiales y de las variables físicas involucradas, para garantizar la eficiencia.

En una planta de producciones químicas, los reactores constituyen frecuentemente las unidades más difíciles de controlar, especialmente si las reacciones son exotérmicas. En esos casos, un incremento de unos pocos grados, en la temperatura, puede hacer que la velocidad de reacción se incremente más allá de los límites necesarios y provoque cambios significativos en los resultados; que pueden resultar incluso peligrosos. Para evitar ese efecto es necesario actuar rápidamente, realizando acciones de control que mantengan la temperatura dentro de los límites previstos en el proceso (6).

En dependencia del diseño del reactor y del tipo de reacción que se produce en ellos, los reactores pueden ser autorregulables o no. Si la reacción es exotérmica y la cantidad de calor generada

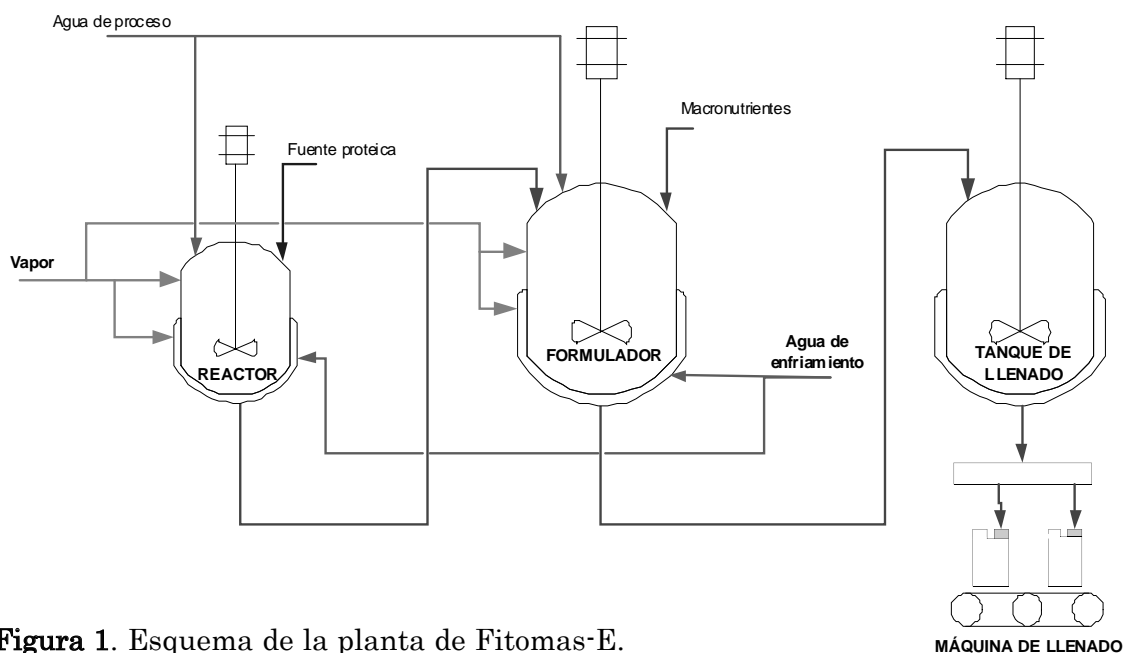


Figura 1. Esquema de la planta de Fitomas-E.

es superior a la cantidad de calor disipada, el reactor no es autorregulable; aunque se pudiera controlar automáticamente. Los reactores comerciales, por razones económicas, se diseñan frecuentemente cerca de la inestabilidad y eso hace que la automatización tenga una alta responsabilidad para evitar las consecuencias de una reacción fuera de control (7).

La reacción para la producción de Fitomas-E es endotérmica y por lo tanto no hay dificultad con la estabilidad. Sin embargo, el reactor se opera de forma discontinua (*batch*) y esto complica la automatización. En un reactor *batch*, los valores de las variables cambian durante el proceso desde el inicio hasta el final del lote y por ello se dice que su comportamiento es transitorio. Este es el caso del proceso de hidrólisis, en la producción de Fitomas-E: el nivel del reactor parte de cero y aumentará con la carga de agua hasta alcanzar el volumen de trabajo, se suministra calor para aumentar la temperatura de la masa reaccionante, cuya concentración y pH variarán también con la adición de la fuente proteica y del catalizador.

El aumento de la temperatura en la masa reaccionante se produce con el propósito de acelerar la reacción y para ello se suministra vapor a la chaqueta del reactor. Esto se realiza de manera controlada, para lograr el perfil de ascenso requerido, hasta alcanzar el valor en que se estabiliza la temperatura durante un tiempo. Posteriormente, mediante el suministro de agua a la chaqueta, se produce el enfriamiento también con régimen controlado. En la figura 2 se muestra el gráfico correspondiente.

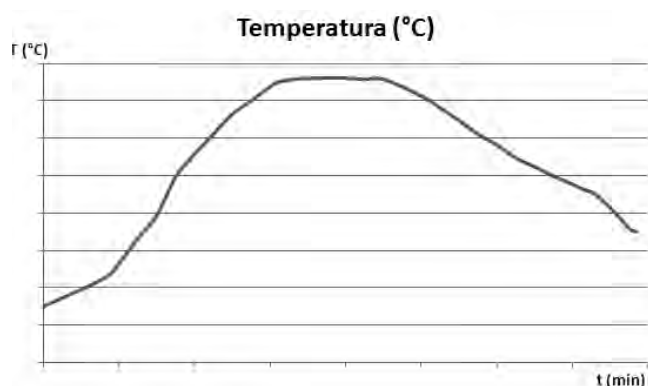


Figura 2. Comportamiento de la temperatura durante la reacción.

La automatización de un reactor tipo *batch*, requiere de la medición y control de variables analógicas, pero también de la vigilancia de variables discretas y el accionamiento de dispositivos digitales. Cuando se requiere controlar variables analógicas y digitales, como en este caso, se utiliza un sistema de automatización híbrido. Hace algunos

años, la implementación de este tipo de sistema comprendía un controlador-indicador (PID) por cada lazo de regulación analógica, un secuenciador lógico programable y un módulo de detección y señalización de alarmas. Sin embargo, con el desarrollo de los autómatas programables (PLC) toda la automatización de un proceso tecnológico puede estar centrada en un solo autómata, que se estructura con los módulos requeridos para la aplicación y permite, sin grandes dificultades, el control de los sistemas híbridos.

Para la automatización de la producción de Fitomas-E, primeramente se analizó las características del proceso tecnológico, determinándose las variables fundamentales que requieren vigilancia y/o control y que se relacionan a continuación (8):

Mediciones analógicas

- Temperatura dentro del reactor.
- Presión de vapor dentro del reactor.
- Temperatura del agua a la entrada de la chaqueta del reactor.
- Temperatura del agua a la salida de la chaqueta del reactor.
- Presión de vapor a la entrada de la chaqueta del reactor.
- Flujo integrado de agua al reactor.
- Temperatura en el formulador.
- Presión del vapor de entrada.

Indicaciones digitales

- Nivel dentro del formulador.
- Funcionamiento de la bomba de trasiego al formulador.
- Activación de la válvula de entrada de agua al reactor.
- Activación de la válvula de extracción del condensado.
- Activación de la válvula de salida del agua de enfriamiento.
- Activación de la válvula de entrada de agua de enfriamiento.
- Activación de la válvula de entrada de vapor de calentamiento.
- Funcionamiento del agitador.
- Activación de la válvula de entrada del catalizador de la reacción.
- Activación de la válvula de descarga del reactor.
- Nivel máximo dentro del formulador.
- Nivel máximo del tanque de almacenamiento de Fitomas.
- Funcionamiento del agitador en el tanque de almacenamiento.
- Funcionamiento de la bomba de suministro a la línea de envase.
- Funcionamiento de la línea de envase.

- Confirmaciones de accionamiento de las distintas válvulas de mando a distancia.

Mandos analógicos

- Regulación del flujo de vapor y agua (para controlar la temperatura de la masa reaccionante).

Mandos digitales

- Control del flujo de agua (para controlar el volumen en el reactor).
- Arranque/parada de la bomba de trasiego al formulador.
- Abre/cierre de la válvula de entrada de agua al reactor.
- Abre/cierre de la válvula de extracción del condensado.
- Abre/cierre de la válvula de salida del agua de enfriamiento.
- Abre/cierre de la válvula de entrada de agua de enfriamiento.
- Abre/cierre de la válvula de entrada de vapor de calentamiento.
- Arranque/parada del agitador en el reactor.
- Abre/cierre de la válvula de descarga del reactor.
- Arranque/parada del agitador en el formulador.
- Abre /cierre de la válvula de agua al formulador.
- Abre /cierre de la válvula descarga del formulador.
- Arranque/parada de la bomba de descarga del formulador.
- Arranque/parada del agitador del tanque de almacenamiento.

La automatización de la producción de Fitomas-E comprende acciones sobre diferentes partes del proceso y trata de garantizar dos principios básicos: la seguridad del personal que labora en la planta y la calidad del producto a obtener.

Se concibió para la planta un sistema de control con una estructura jerárquica de tres niveles interconectados (figura 3):

1. Nivel de campo, donde se encuentran los sistemas de medición y accionamiento sobre el proceso.
2. Nivel de control, compuesto por un autómata que garantiza la adquisición de los datos y el control del proceso.
3. Nivel de supervisión, conformado por una PC que funciona como estación de nivel superior y permite al operador, desde el cuarto de control, supervisar el proceso y actuar sobre las válvulas y bombas cuando considera pertinente.

Nivel de campo

La medición de la mayoría de los parámetros del proceso de producción de Fitomas-E se realiza con instrumentos industriales, robustos y electrónicos, con señales estandarizadas (norma 4 a 20 mA) con protección contra polvo, agua, sustancias corrosivas, vibraciones e interferencias electromagnéticas; de acuerdo a las especificaciones normativas de los instrumentos. Para la selección de los rangos y los principios de funcionamiento se tuvo en cuenta los parámetros tecnológicos y las características propias de los fluidos a medir.

Algunas mediciones se realizan con instrumentos no electrónicos, los cuales funcionan utilizando la energía que se genera en el mismo proceso y que permiten la vigilancia del proceso en caso de fallos de energía eléctrica. Estos dispositivos se utilizan fundamentalmente en la medición de variables cuyo descontrol puede ser riesgoso para la seguridad del personal que labora en la planta, como por ejemplo la presión y la temperatura.

Las válvulas de control (reguladoras y de mando a distancia) son robustas y seguras. Las válvulas de regulación cuentan con posicionadores electroneumáticos inteligentes y autoajustables. Las válvulas de mando a distancia tienen incorporada las correspondientes válvulas solenoides, requeridas para su operación y los interruptores de límite de carrera que permiten la confirmación del accionamiento.

Nivel de control

Todas las operaciones que se realizan en el nivel de control, las garantiza un autómata programable, del que se hace una breve descripción a continuación.

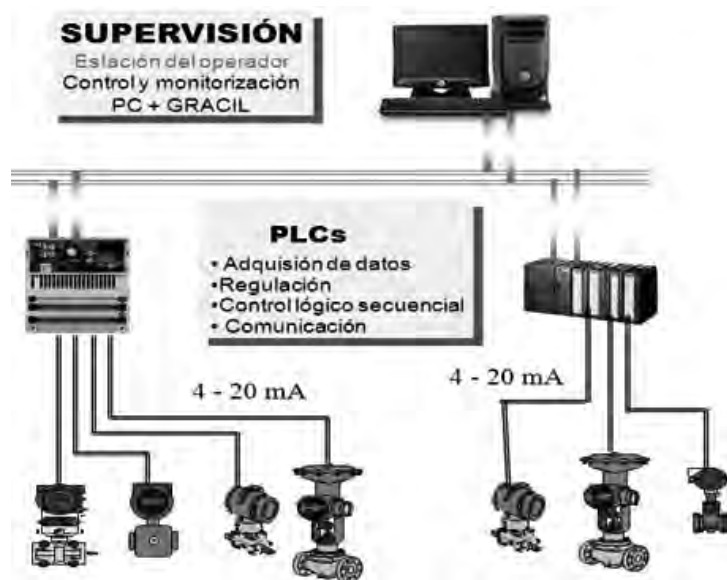


Figura 3. Estructura jerárquica del sistema de control de la planta de Fitomas-E.

El autómata programable (PLC) es un equipo electrónico, programable en un lenguaje que no requiere de un especialista en informática. Está diseñado para controlar procesos secuenciales en tiempo real y en condiciones industriales. Su estructura fundamental se compone de la unidad central de proceso (CPU), la memoria y el sistema de entradas y salidas (E/S).

La CPU está basada en un microprocesador que se encarga del control total del autómata, mediante la interpretación que realiza de las instrucciones del programa y de los datos que recibe a través de las entradas.

La memoria se compone de dos tipos: una es la memoria de lectura solamente (ROM) en la que se almacena los programas de puesta en marcha y de diagnósticos; la otra es la memoria de lectura y escritura (RAM) en la que se almacena el programa de la aplicación con el que trabajará el autómata y los datos sobre el estado de las entradas, salidas y de las variables del trabajo interno.

El sistema de entradas y salidas es el que permite el intercambio de información entre el autómata y su entorno; tanto las entradas como las salidas pueden ser analógicas o digitales. A través de las entradas se recoge la información de las señales del proceso y las salidas son las que permiten al autómata actuar sobre el mismo.

Cuando se habla de entradas analógicas, se refiere a la posibilidad de leer la información de las señales del proceso que tienen una variación de amplitud continua en el tiempo entre dos valores definidos. Ejemplos de estas son las de temperatura, presión, nivel y flujo.

Mediante las salidas analógicas el autómata puede gobernar dispositivos que actúan sobre el proceso, haciendo que el elemento de acción final adopte muchos estados diferentes. Ejemplo son las válvulas de regulación y los servomotores.

Las entradas digitales son las que permiten detectar el estado de las variables discretas; es decir, las que solo pueden tener dos estados (encendido o apagado, vacío o lleno, etc.) y las salidas digitales son a través de las que el autómata puede accionar dispositivos de dos estados, como el arranque y parada de motores y la abertura o cierre de válvulas solenoides.

Existen diferentes modelos de autómatas y cada fabricante establece una estructura diferente para su configuración. En dependencia de la cantidad de entradas y salidas disponibles en los módulos del autómata seleccionado y de las variables de cada tipo involucradas en el proceso, se determina los módulos de entrada-salida que compondrán el sistema.

Cuando los ingenieros de ATIZ realizaron el proyecto de automatización para la planta de

Fitomas-E, seleccionaron un autómata "Momentum" (9). Este autómata dispone de 512 Kb de memoria RAM, puerto ETHERNET para la comunicación del PLC con la computadora e I/O bus para la comunicación entre los distintos módulos de E/S y el CPU.

A partir de las variables concebidas para la automatización de la producción de Fitomas-E (relacionadas anteriormente) el sistema de entrada/salida del autómata fue estructurado de la siguiente forma (10):

1. Un módulo de 16 entradas analógicas.
2. Un módulo de 4 salidas analógicas.
3. Dos módulos con 32 entradas digitales cada uno.
4. Un módulo de 16 salidas digitales.

Para la selección de estos módulos de E/S, se tiene en cuenta las normas de transmisión y el tipo de señal de entrada de los instrumentos. Además, para la flexibilidad del sistema, se deja al menos un 30 % de entradas y salidas libres, que permiten la incorporación futura de nuevas señales sin necesidad de modificar el diseño original.

Nivel de supervisión

La supervisión la realiza desde una PC, un operador entrenado, con la ayuda de un sistema SCADA (supervisión, control y adquisición de datos).

El SCADA es una aplicación software especialmente diseñada para funcionar sobre una PC, en el control de la producción, a través de la comunicación con los dispositivos de campo (controladores autónomos, autómatas programables, etc.) que actúan sobre el proceso de forma automática. Mediante el SCADA se muestra en la pantalla del ordenador, toda la información generada por la instrumentación de la planta, permitiendo al operador supervisar y actuar sobre el proceso cuando lo considere necesario.

Cualquier SCADA debe ofrecer las siguientes prestaciones:

- Adquisición y almacenamiento de datos.
- Representación gráfica y animada de variables de proceso y monitorización de estas por medio de alarmas.
- Control, que actúa sobre autómatas y reguladores autónomos (consignas, alarmas, menús, etc.) o bien directamente sobre proceso a través de E/S remotas.
- Arquitectura abierta y flexible con capacidad de ampliación y adaptación.
- Creación de paneles de alarma con registro de incidencias.
- Generación de registros históricos de las señales de planta, que pueden ser procesados en una hoja de cálculo.

- Ejecución de programas para modificar la ley de control, incluso anular o modificar las tareas asociadas al autómatas (bajo ciertas condiciones de operación).

En la planta de Fitomas-E se utiliza el GRACIL (generador de aplicaciones industriales) que es un sistema SCADA desarrollado en el departamento de sistemas automatizados de dirección del Instituto Cubano de Investigaciones Azucareras (ICINAZ), con una aplicación específica incorporada por ATIZ.

Para garantizar la calidad del FitoMas-E, por tratarse de un proceso a lotes, en la automatización de la producción se controla:

1. La dosificación de las materias primas: control de volumen de agua al reactor, dosificación de las materias primas líquidas y peso de las materias primas sólidas.
2. El perfil de temperatura en el reactor para garantizar el adecuado comportamiento de la reacción: control de la temperatura en el reac-

tor, actuando sobre los flujos de vapor y de agua.

3. El volumen del producto final a obtener: nivel en el formulador con la adición de agua.

CONCLUSIONES

1. Para garantizar la eficiencia y estabilidad en la calidad de un producto, es necesario automatizar el proceso productivo.
2. Las características del proceso de producción de Fitomas-E hacen que para su automatización se requiera un sistema híbrido y esto se ha solucionado con el empleo de un autómatas programable.
3. La automatización de la planta de producción de Fitomas-E se concibió con una estructura jerárquica de tres niveles: nivel de campo, de control y de supervisión.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Sanfeliu, A. "Evolución histórica de la automatización de los procesos industriales". <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/21319/Capitulo1.pdf>
 2. "Automatización". <http://www.ecured.cu/Automatizaci%C3%B3n>
 3. Mesa, G.; Pavón, J. "Ventajas del uso de la instrumentación digital en las destilerías de alcohol". *International Sugar Journal*, Vol. 101 No. 1209: pp 450-452, 1999.
 4. Saura, G.; García, R.; Otero, M.; Martínez, J.; Bello, D.; Pérez, I. "Experiencias en la producción de etanol a partir de jugos de caña mezclados". *Revista ICIDCA sobre los derivados de la caña de azúcar*, Vol 43 No. 2: pp 42-46, 2009.
 5. Montano, R.; Zuaznabar, R.; García, A.; Viñals, M.; Villar, J. "FITOMAS E: Bionutriente derivado de la industria azucarera". *Revista ICIDCA sobre los derivados de la caña de azúcar*, Vol 41 No. 3: pp 14-21, 2007.
 6. Levenspiel, O. "Ingeniería de las reacciones químicas". 1987 Ediciones Repla, S.A. ISBN 968616503-7 ISBN 64291-73250, 1987.
 7. Smith, C. A.; Corripio, A. "Principles and practice of automatic process control". Wiley; 3 edition (August 5, 2005). ISBN-13: 978-0471431909. ISBN-10: 0471431907.
 8. "Tarea Técnica de Automatización de la planta de FitoMas-E del ICIDCA". ICIDCA, (marzo 2008).
 9. Momentum. "M1 Processor Adapter and Option Adapter" User Guide. Volume 1. 870 USE 101 10 Version 2.0
 10. "Momentum Catalog". © Copyright Schneider Automation 2002.
-

Evaluación energética de la integración del proceso de obtención de biobutanol en una destilería autónoma

Electo Eduardo Silva-Lora¹, José Carlos Escobar-Palacios¹, David L. Vargas-Nuncira¹, Arnaldo Martín Martínez-Reyes¹, Oscar Almazán del Olmo²

1. Núcleo de Excelencia en Generación Termoeléctrica y Distribuida (NEST, Brasil)
esl43@yahoo.com, jocesobar@gmail.com, ammr451111@yahoo.es
2. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar
Vía Blanca 804 y Carretera Central. San Miguel del Padrón, La Habana, Cuba
oscar.almazan@icidca.azcuba.cu

RESUMEN

En este trabajo se realiza un análisis energético del proceso de producción de bioetanol, utilizando el bagazo como materia prima en una destilería autónoma convencional, mediante la modelación del sistema en el software HYSYS v 6.0, determinándose los consumos energéticos y de agua para dos escenarios: destilería convencional de bioetanol y con la integración del proceso de producción de biobutanol. Se consideraron las diferentes etapas del tratamiento del bagazo, y otros procesos. Los resultados muestran un incremento en los consumos energéticos de (54,7 MJ/l) debido a las etapas de pretratamiento del bagazo y la purificación del biobutanol, y un consumo de agua de 3,0 t agua/t caña. Por otro lado, la integración de los procesos y la diversificación de los productos condujeron a un aumento del aprovechamiento de la energía primaria de la caña de 58 %, un potencial de electricidad generada de 146 kWh/t caña, y una productividad energética de 248 GJ/ha de caña cultivada.

PALABRAS CLAVE: biobutanol, bioetanol, biorefinería

ABSTRACT

The objective of this study is to perform an energetic analysis of the integration of the biobutanol production from bagasse in a bioethanol distillery. The proposal includes process simulation on HYSYS 6.0 software to obtain mass and energy balances. By the energy consumption side, were simulated the alternative solvents recovery, characterized by high energy consumption on distillation process. This study proposes a comparison, from the energy point of view, between a conventional bioethanol distillery and the same distillery with biobutanol process integration. Those scenarios will have a cogeneration system to supply heat and power. This analysis showed high energy consumption (54,7 MJ/L) during the bagasse treatment and biobutanol purification stage and high consumption of water (3.0 t water/t cane) in substrate washing and hydrolysis. A process integration and product diversification lead to rise of 58 % of primary energy from sugarcane, 146 kWh/t cane of energy generated and 248 GJ/he of liquid energy productivity.

KEYWORDS: biobutanol, bioethanol, biorefinery.

INTRODUCCIÓN

Los trabajos de I&D sobre la conversión energética de materias primas lignocelulósicas permitirán la expansión de la producción de biocombustibles con una perspectiva sustentable, ofreciendo ventajas de seguridad

energética, reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, así como de la polución del aire (1).

En años recientes, existe gran interés en la producción de biobutanol como combustible, utilizando bagazo de caña, como es el caso de una planta de 100 000 t/año, en Brasil (2).

Por otro lado, el biobutanol es uno de los alcoholes refinados de mayor comercialización en el mundo de la industria química para solventes, pinturas y adhesivos (3).

El biobutanol, respecto al bioetanol, presenta mayor poder calorífico (30 % más), baja afinidad con el agua (disminuye la corrosión), puede utilizarse en los motores de combustión interna con una relación aire/combustible similar a la de la gasolina, las destilerías de bioetanol pueden ser adaptadas para incorporar la producción de biobutanol, con bajo costo y flexibilidad, lo que evidencia la importancia de los estudios en torno a la obtención del mismo, de lo que forma parte el presente trabajo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Este estudio de la producción de biobutanol se realiza mediante la modelación y simulación con el software HYSYS v 6.0 y considera dos escenarios. Escenario 1: una destilería convencional que tiene como productos: vinaza, bioetanol anhidro y bioetanol hidratado. Escenario 2: se analiza la incorporación a dicha destilería, de una planta en la que el bagazo y la paja excedentes se someten a un pretratamiento, se realiza el proceso de hidrólisis enzimática, luego la fermentación y - por último - la destilación, obteniéndose biobutanol y acetona, en tanto que parte del bagazo se deriva hacia el sistema de cogeneración (4,5).

Los cálculos se realizan para 500 t/h de caña y el sistema de cogeneración con 85 bar y 480 °C en la entrada a la turbina y 0,1 bar en el condensador, tiene 3 extracciones, a diferentes presiones del proceso productivo y otra para el desaereador.

Los principales indicadores para evaluar el efecto de la integración de la planta de biobutanol son: la eficiencia global, que es la energía obtenida en los productos y los excedentes, respecto a la contenida en la caña, y que se determina por la productividad energética del cultivo de ella (7,3 GJ/t caña) y la productividad agrícola (68,9 t caña/ha) según Leal (6); el potencial de generación de energía eléctrica y el consumo de agua.

La productividad de energía líquida por hectárea (GJ/ha) es la variable que representa la fracción de la energía de la caña que fue efectivamente convertida en energía en los productos de la planta (etanol, butanol, electricidad, etc.).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La figura 1 muestra los principales resultados de los consumos de combustible y de vapor obtenidos en la simulación de la planta para el Escenario 2, así como de las cantidades de productos y residuos, todos referidos a cada tonelada de caña.

Los dos procesos de mayor consumo de vapor fueron el pretratamiento con explosión de vapor y

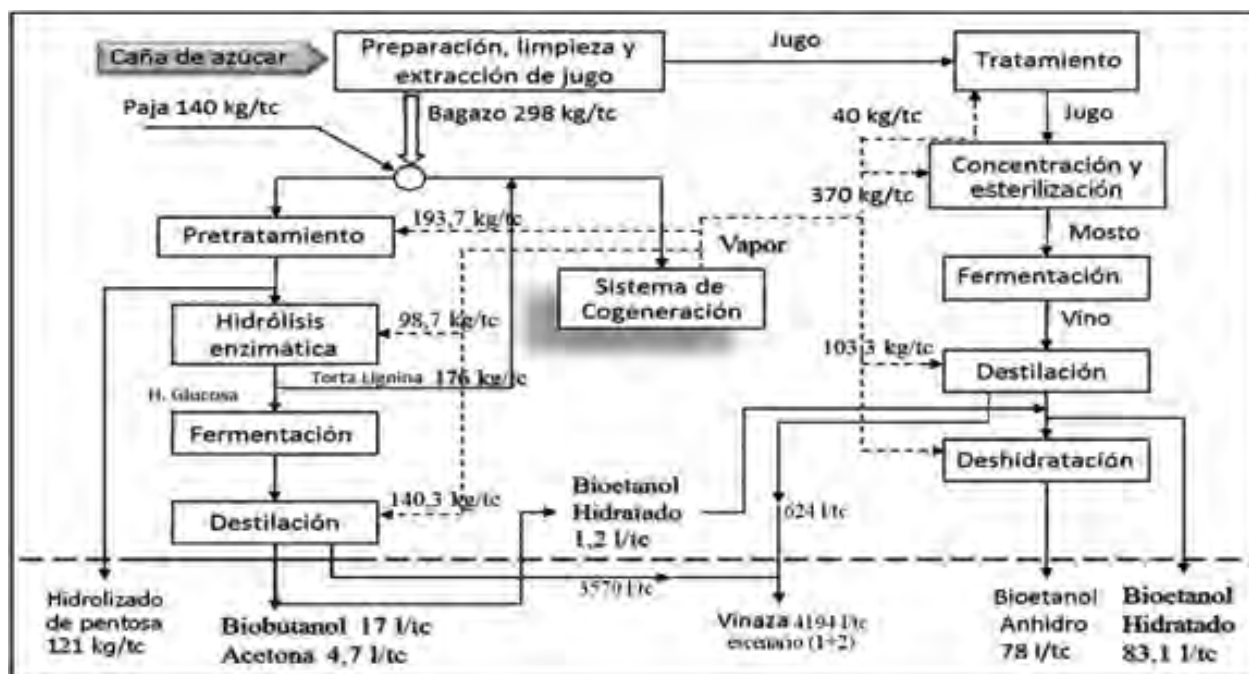


Figura 1. Esquema de los insumos, consumos y productos de los procesos de la planta integrada.

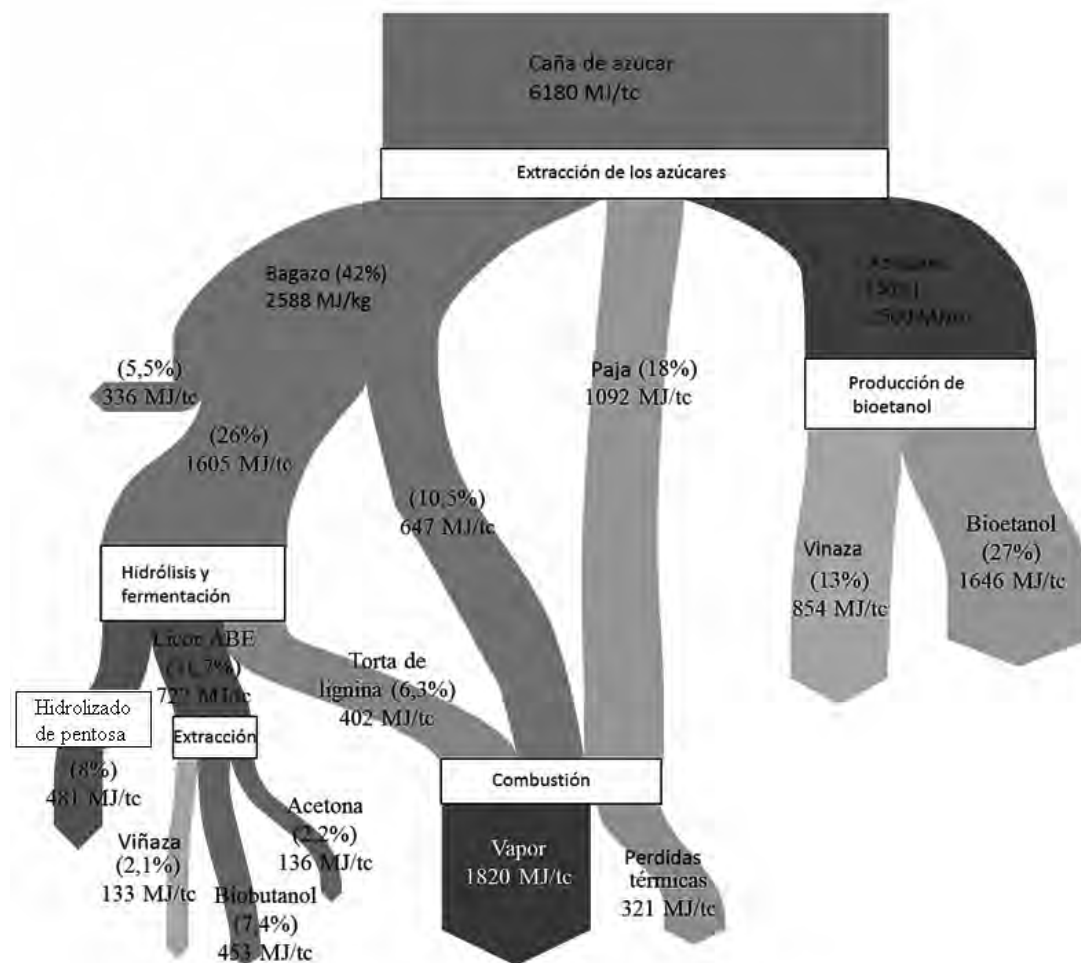


Figura 2. Diagrama de Sankey de la conversión de la energía primaria de la caña en energía útil de los productos y las pérdidas térmicas.

la destilación para la purificación del biobutanol (193,7 y 140,3 kg/t caña, respectivamente).

La eficiencia global en el Escenario 1 fue de 41 %, a lo que corresponde una productividad energética de 174 GJ/t caña, y la electricidad generada 174,5 kWh /t caña; mientras que en el Escenario 2 la eficiencia es 58, 2 % y la generación eléctrica es de 146,5 kWh/t caña, lo que conduce a una productividad en el cultivo de 248 GJ/ t caña.

El consumo de agua es uno de los problemas fundamentales cuando se analizan ambos escenarios, ya que para la destilería convencional es de 0,5 t agua/t caña y para el sistema ya integrado alcanza 3,0, debido - principalmente - a la hidrólisis de la celulosa, que consume más del 60 % del total. Según el protocolo agroambiental del sector sucroalcoholero del estado de São Paulo, Brasil, el consumo de agua en los centrales azucareros no debe superar 1,45 t/t caña (7), por lo que en el escenario 2 se duplica ese consumo

La figura 2 muestra el diagrama de Sankey del Escenario 2 con la distribución de la energía proveniente de la caña de azúcar y los procesos de conversión de los principales productos y los porcentajes que representan de la energía disponible de la caña de azúcar.

Estos resultados evidencian que la diversificación del proceso permite una mayor utilización de la energía primaria en la transformación a energía secundaria útil, cuyo valor es superior a 34 %.

Se observa que la torta de lignina contribuye como combustible con el 6,3 % al sistema de cogeneración y que la energía de los diferentes componentes de la vinaza (15 %) podría ser reutilizada en los cultivos.

La inclusión del proceso de producción de biobutanol representó un aumento de 20 % en la utilización de la energía contenida en la materia prima.

CONCLUSIONES

La simulación efectuada en HYSYS v 6.0 de la producción de bioetanol y biobutanol permitió estimar los balances de masa y energía, donde se destacan los consumos energéticos y de agua en el Escenario 2, por causa del pretratamiento del bagazo.

El biobutanol y el bioetanol representan, en conjunto, el 34 % de la energía primaria de la caña, lo cual es una cifra satisfactoria, ya que el primero constituye un 20 % más en el aprovechamiento de la energía de la materia prima. La eficiencia global mejora en un 17 % para el Escenario 2 respecto al 1, aunque desde el punto de vista de consumo de agua es seis veces mayor.

Los resultados generales confirman la posibilidad de la integración de plantas de biobutanol a las refinerías convencionales existentes, desde el punto de vista energético

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Consejo Nacional de Pesquisas Científicas (CNPq), a la Coordinación de Perfeccionamiento de Personal de Nivel Superior (CAPES) y a la Fundación de Apoyo y Pesquisas de Minas Gerais (FAPEMIG), de Brasil, por el financiamiento de los trabajos de investigación cuyos resultados se reportan en este artículo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Elbehri, A.; Segerstedt, A.; Liu, P. (2013), Biofuels and the sustainability challenge: A global assessment of sustainability issues, trends and policies for biofuels and related feedstock. Rome, Italy, pp, 188
 2. Silva Lora, E. E.; Almazan del Olmo, O.; Vargas Nuncira, D. L. (2012), Biobutanol: La marcha hacia el futuro de los biocombustibles. Revista de la Asociación de Técnicos Azucareros de Cuba, 73(2), pp, 33-36.
 3. Yuan, L. I. U.; Hui-feng, X. U. E. (2012), OXO Market Supply and Demand Forecast & Investment Economic Analysis. Finance Research, 1(2), pp, 1-7.
 4. Escobar, J. C.; Lora, E. S.; Venturini, O. J.; Santos, V. A.; Renó, M. L. (2011), Cogeneration options for improving the competitiveness of a cane-based ethanol plant in Brazil. International Sugar Journal, 113(0000), pp, 56-62.
 5. Dias, M. O. S.; Junqueira, T. L.; Cavalett, O.; Cunha, M. P.; Jesus, C. D. F.; Mantelatto, P. E.; Bonomi, A. (2013). Cogeneration in integrated first and second generation ethanol from sugarcane. Chemical Engineering Research and Design, 91(8), pp, 1411-1417
 6. Leal, M. R. L. (2010). Cana energia. In CGEE (Ed.), Bioetanol de Cana-de-Açúcar: P&D para produtividade e sustentabilidade. São Paulo, SP. Blucher, pp, 751-760
 7. Salazar, K. J. M. (2012). Uso de água e análise exérgica na produção integrada de etanol de primeira e segunda geração a partir de cana de açúcar (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Campinas, UNICAMP.
-

Modelo con algoritmo genético para el diseño óptimo de una planta de producción de biogás a partir de cachaza

Erdwin García-Alvarez¹, José P. Monteagudo-Yanes², Julio R. Gómez-Sarduy²

1. UEB Central Azucarero "Ciudad Caracas",
Carretera a Sta. Isabel de las Lajas, Batey Caracas, Lajas, Cienfuegos, Cuba
erdwin@caracas.azcuba.cu

2. Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente (CEEMA), Universidad de Cienfuegos.

RESUMEN

Como una alternativa de diversificación de la industria azucarera está la producción de biogás y biofertilizante a partir de la cachaza. Dentro de los residuos sólidos de mayor disponibilidad para la producción de biogás se encuentra la cachaza. En este trabajo se plantea el desarrollo de un modelo para el diseño de biodigestores de cúpula fija para la producción de biogás, a partir de la cachaza, basado en un algoritmo genético simple. La función de costo garantiza que se diseñe un número de biodigestores capaces de satisfacer las necesidades de cocción de una comunidad, a la vez que se maximiza el Valor Presente Neto (VAN) de la inversión requerida. El modelo fue desarrollado considerando como caso de estudio la Unidad Empresarial de Base, Central Azucarero "Ciudad Caracas". Los resultados de la simulación muestran la factibilidad económica de dicho proyecto.

PALABRAS CLAVE: diversificación, biogás, cachaza, algoritmo genético, biodigestores.

ABSTRACT

The biogas and biofertilizers production from filter cake is an alternative for the sugarcane agro-industry diversification. The filter cake is one of the solid residues with the highest availability for the biogas production. This work presents the development of a model for the design of a fixed dome biodigester for the production of biogas, based on a simple genetic algorithm. The cost function guaranty that it'll be designed a number of biodigester that will ensure the satisfaction of the cooking demands of a community and at the same time the Net Present Value of the investment will be maximized. The model was developed considering as a case of study the UEB "Ciudad Caracas" Sugar Mill. The results of the simulation confirm the economic feasibility of the mentioned project.

KEYWORDS: diversification, biogas, filter cake, genetic algorithm, biodigesters.

INTRODUCCIÓN

Como una alternativa de diversificación de la industria azucarera está la producción de biogás y biofertilizante a partir de la cachaza. En la literatura consultada, la mayoría de los reportes acerca de producción de biogás se basan en el empleo de residuos orgánicos provenientes de la actividad agropecuaria (1, 2).

Otra posibilidad es el empleo de residuos biodegradables procedentes de instalaciones industriales sometidos a digestión anaerobia. En Cuba se han realizado varios estudios al respecto, y se plantea que dentro de los residuos sólidos de mayor disponibilidad y que pueden utilizarse para generar biogás se encuentra la cachaza (3).

Lugones también realiza un análisis de los biodigestores existentes en Cuba y las materias orgánicas

utilizadas para la producción de biogás mencionando entre ellas la cachaza proveniente de la producción azucarera, pero se limita a dar información general sin elementos que permitan elaborar una metodología para su empleo en la industria azucarera (4).

Otros autores (5) realizan un estudio bibliográfico sobre la situación de las energías renovables en el mundo y en Cuba, haciendo énfasis en algunos aspectos relacionados con el biogás y ofrecen una metodología para calcular una planta de biogás que puede ser utilizada en comunidades de poca densidad poblacional para la cocción de alimentos, pero no consideran el empleo de la cachaza sino de residuos de cosecha y estiércol.

Un trabajo que destaca las potencialidades de la cachaza para la producción de biogás se reporta en la referencia 6. Estos autores afirman haber obtenido índices de generación de gas metano con cachaza de 120 m³/t. Otros investigadores refieren índices en un rango de 73,7 a 129,5 ml/g (7).

A pesar de que el tema ha sido ampliamente abordado para el escenario internacional y de la industria azucarera cubana, no se reporta ninguna evaluación de alternativas para inversiones de sistemas de este tipo empleando criterios para su optimización económica. El objetivo de este trabajo es presentar el desarrollo de un modelo para optimizar el diseño de digestores de biogás utilizando como caso de estudio la Unidad Empresarial de Base (UEB) central azucarero "Ciudad Caracas", ubicada en el batey de igual nombre del municipio de Lajas, provincia de Cienfuegos.

MATERIALES Y MÉTODOS

El modelo se concibe para diseñar biodigestores que satisfagan las necesidades de cocción de la población, así como para el comedor obrero de la UEB. El volumen de combustible necesario se calcula según las ecuaciones (1) y (2):

$$V1 = 7,08 + 0,073 * Ct \quad (m^3) \quad \text{ec. 1}$$

donde: V1 es la demanda de biogás para cocción en comedores industriales, en metros cúbicos (6) y Ct es el total de comensales.

$$V2 = 0,25 * Nump * Nuc \quad (m^3) \quad \text{ec. 2}$$

donde: V2 es la demanda de biogás para uso doméstico considerando un índice de consumo por persona de 0,25 m³/día, Nump es el número de personas promedio por núcleo y Nuc es la cantidad de núcleos.

La demanda total para cocción (Vol_cocción) se determina como la suma de (1) y (2).

El volumen de construcción del digestor (Vcd)

se determina según la ecuación (3) como:

$$Vcd = 1,3 * Vd \quad (m^3) \quad \text{ec. 3}$$

donde: Vd es el volumen de digestión calculado como:

$$Vd = \frac{(Cachaza + 3 * Cachaza) * 1000 * 30}{\rho_{mezcla}} \quad \text{ec. 4}$$

siendo: Cachaza la cantidad de cachaza necesaria para generar el volumen de biogás para cocción, considerando un índice de generación de biogás de 120 m³/t de cachaza y ρ_{mezcla} la densidad de mezcla cachaza-agua en kg/m³

Para satisfacer la demanda de cocción calculada, se diseña un número de biodigestores de cúpula fija cuyo volumen total sea igual al volumen de construcción del digestor, calculado por la ecuación 3.

En el dimensionamiento de los biodigestores de cúpula fija (figura 1) se consideran las proporciones dadas en la referencia 7.

Estas proporciones fijan las dimensiones hc: altura cúpula, hp: altura de pared, R: radio básico, D: diámetro (2 x R) y ht: altura del cono de base.

El volumen del biodigestor es:

$$V_{digestor} = R^3 * \pi * 1,121 \quad (m^3) \quad \text{ec. 5}$$

El volumen total (VT) es:

$$VT = N * V_{digestor} \quad (m^3) \quad \text{ec. 6}$$

Cálculo del costo de la inversión

Para calcular el costo capital de la inversión se determinan los materiales fundamentales necesarios a partir de ecuaciones obtenidas con información publicada por Guardado (8).

El costo total de la inversión es:

$$Ko = (N * Costo Materiales) + Compresor * 1,15 \quad \text{ec. 7}$$

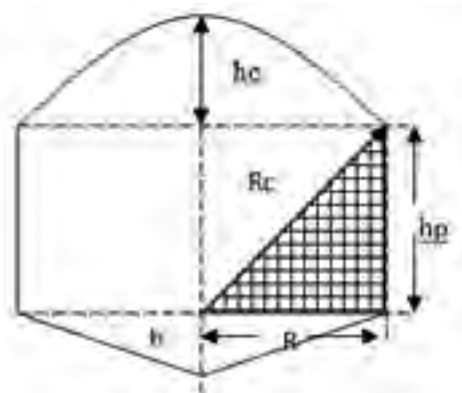


Figura 1. Dimensiones del digestor de cúpula fija.

donde:

N : Número de biodigestores

Compresor: costo de la estación de compresores.
Se estima 7000 pesos en MT.

El factor 1,15 de la ecuación 7 se utiliza para considerar los costos de construcción y montaje.

Flujos de caja anuales

Para el cálculo económico se utilizan métodos de flujo descontados para considerar el valor del dinero en el tiempo. Un indicador económico utilizado en el análisis de rentabilidad de una inversión es el valor actual neto (VAN). Para calcular el VAN es necesario determinar los flujos de caja anuales a partir de los ingresos y gastos que tienen lugar en la instalación. El flujo de caja anual es:

$$FC_i = (I_i - G_i - Dep) \cdot (1 - t/100) + Dep \quad \text{ec. 8}$$

donde: t es la tasa de impuestos en porciento.

Con los flujos de caja anuales se calcula el VAN como:

$$VAN = -K_0 + \sum_{t=1}^n FC_t \quad \text{ec. 9}$$

Aplicación del AG a la optimización del diseño de biodigestores

El método propuesto permite determinar el número de biodigestores y el radio básico a partir del cual se calcula el resto de las dimensiones del biodigestor de cúpula fija, garantizando satisfacer las necesidades de cocción de una comunidad, a la vez que se maximiza el valor presente neto (VAN) de la inversión requerida.

Para el algoritmo propuesto se genera una población inicial de 1000 soluciones candidatas representadas por los pares $(X(1), X(2))$ donde $X(1)$ es el número de biodigestores y $X(2)$ es igual al radio básico (R).

Durante el proceso evolutivo, el algoritmo genético (AG) genera una nueva población de tamaño 1000, a partir de la población actual y evalúa el desempeño de los nuevos individuos en cada generación.

El objetivo de la optimización con AG es minimizar el error entre los valores necesarios de volumen de construcción del digestor (V_{cd}) y el volumen total calculado (VT), a la vez que se maximiza el VAN de la inversión. Como el AG solo busca valores mínimos, se hace necesario entonces minimizar el inverso del VAN. Por lo tanto la función de adaptación del AG es:

$$fitness = |V_{cd} - VT| + 1/VAN \quad \text{ec. 10}$$

El cálculo de esta función se repite para cada nuevo individuo (nuevo conjunto de número de digestores y radio básico) hasta que se cumplan los requisitos de parada del AG.

El diagrama de bloques del procedimiento propuesto se muestra en la figura 2.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como caso de estudio se muestra el diseño de una estación de biodigestores en la UEB central azucarero "Ciudad Caracas", con una norma potencial de 4025 toneladas de caña por día.

Para el diseño se considera un número de comensales en el comedor de la industria $Ct=300$ y una población en el batey compuesta por 385 núcleos de 4 personas como promedio.

Las variables económicas para el diseño son: vida útil de la inversión, 20 años; tasa de impuestos sobre la ganancia, 30 %; tasa de interés bancario, 15 %; precio del gas para cocción, 0,50 pesos/m³ y precio del bioabono, 275 pesos/t. Como el AG por naturaleza no converge a una solución óptima, sino a una solución cercana al óptimo, es recomendable realizar varias corridas

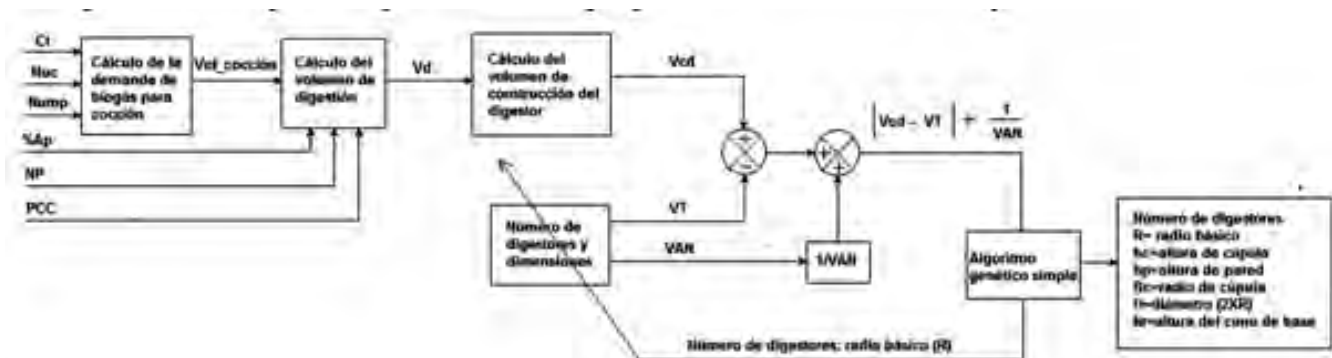


Figura 2. Diagrama de Sankey de la conversión de la energía primaria de la caña en energía útil de los productos y las pérdidas térmicas.

Tabla1 . Variantes de diseño de estación de biodigestores

Variante	Vcd	N	hc	hp	Rc	D	ht	VT	Vdigestor	VAN*	VAN**
I	538,17	2	2,12	3,18	5,3	8,49	1,27	538,17	269,09	2 349 MP	104 MP
II	538,17	3	1,85	2,78	4,63	7,41	1,11	538,17	179,39	2 348,5 MP	103,8 MP
III	538,17	4	1,68	2,53	4,21	6,74	1,01	538,17	134,54	2 348 MP	103,5 MP

VAN*: Valor presente neto teniendo en cuenta los ingresos por venta de bioabono.

VAN**: Valor presente neto sin considerar la venta de bioabono.

y obtener un conjunto de buenas soluciones para que los decisores seleccionen la variante que consideren adecuada. En la tabla 1 se muestran tres variantes resultantes de cinco corridas a partir de los datos anteriormente mostrados.

El período de recuperación de la inversión (PRI), cuando se considera la venta de bioabono y el gas para la cocción es inferior a 1 año. Este resultado concuerda con lo obtenido por Barrera (9), que para una inversión mayor, con el objetivo de aprovechar en cocción y generación eléctrica obtiene un PRI de 2,2 años.

La mejor variante desde el punto de vista económico es la I

CONCLUSIONES

- Se ha desarrollado un modelo para el diseño de una estación de generación de biogás a partir de la cachaza utilizando un algoritmo genético simple que permite encontrar un conjunto de buenas soluciones cercanas al óptimo.
- Para el caso de estudio analizado, se encontraron tres soluciones con 2, 3 y 4 biodigestores respectivamente. la variante mejor desde el punto de vista económico es la I con un VAN igual a 2 349 MP.
- Este trabajo demuestra la factibilidad económica de la generación de biogás para cocción aun sin considerar la alternativa de vender el bioabono obtenido como subproducto de la digestión anaerobia.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Filippín, C.; Follario, J.; Vigil, J. (s.f.). Diseño de un biodigestor para obtener gas metano y fertilizantes a partir de la fermentación de excrementos de vacas lecheras en la facultad de agronomía de la Universidad nacional de La Pampa. Recuperado el 10 de febrero de 2012.
2. Botero, R.; Preston, T. R. (1987). Biodigestor de bajo costo para la producción de combustible y fertilizantes a partir de excretas. Manual para su instalación, operación y utilización.
3. Torres, M.; Villa, P. M., Montalvo, S. J.; Escobedo, R. (s.f.). Incidencia del pretratamiento de residuos sólidos en la flora microbiana de reactores anaerobios. Recuperado el 10 de febrero de 2012.
4. Lugones, B. (s.f.). Análisis de biodigestores en Cuba. Recuperado el 10 de 2 de 2012, de <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia22/HTML/articulo04.htm><http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia22/HTML/articulo04.htm>
5. Zamora, L.; Cisneros, Y.; Macías, I.; López, A. (s.f.). Consideraciones sobre la utilización del biogás. Metodología para la construcción de una pequeña planta de biogás. Recuperado el 10 de 2 de 2012, de www.monografias.com/trabajos15/utilizacion-biogas/utilizacion-biogas.shtml
6. Hermida, O.; López, L. (s.f.). Diseño y evaluación de un biodigestor para obtener gas metano y biofertilizante a partir de la fermentación de cachaza y residuos agropecuarios. Recuperado el 10 de 2 de 2012, de <http://www.energia.inf.cu/Sitio%20Taller%20Nacional%20GCE/tercer%20taller/3%20Energias%20renovables/Biogas/Biogas%20Taller%20Nacional/Dise%C3%B1o%20y%20evaluaci%C3%B3n%20de%20un%20biodigestor%20para%20obtener%20gas%20metano.pdf>
7. Fonte, A.; Tabla, Y. (1999). generación de biogás a partir de cachazas con diferentes características. *tecnología Química*, 19(1), 10-17.
8. Guardado, J. A. Diseño y construcción de plantas de biogás sencillas. Editorial Cubasolar, La Habana, 2007
9. Barrera, E.L. Propuestas tecnológicas para producir biogás con fines energéticos. Un estudio de caso en la granja Remberto Abad Alemán. Tesis de Maestría. Universidad de Cienfuegos, 2007.