

Producción de etanol directamente de caña de azúcar en diferente estado de desarrollo

Carlos E. Rolz Asturias
Luis Roberto de León
Fajardo

Resumen

Se presentan datos experimentales de la producción de etanol directamente de caña de azúcar. Tres muestras de segmentos de cañas de diferente edad, de 133, 174 y 229 días después de plantada, fueron molidas y puestas en contacto, por un tiempo fijo a temperatura constante y a escala de frasco de laboratorio, con una suspensión acuosa de levaduras de procedencia conocida. La cantidad de etanol producida no dependió de la cepa de levadura empleada, aunque se observó un efecto en una de las cepas de levadura que fue más evidente al emplear caña precoz en su desarrollo. Se produjo más etanol al emplear la caña más desarrollada, ya que la misma contenía más azúcar total y materia sólida. Los valores promedio del rendimiento de etanol respecto al azúcar consumido fueron ligeramente bajos.

Abstract

Ethanol production directly from sugarcane is presented and the results discussed. Stalks from sugarcane in three developmental stages, 133, 174 and 229 days after sowing, were milled and exposed, in laboratory flasks, to a yeast aqueous suspension for a limited time period at constant temperature. The amount of ethanol produced was not a function of the strain of yeast employed, although a significant difference was observed for one of the yeast strains, effect that was more evident with the younger cane. A larger amount of ethanol was produced with the more developed cane, as this material contained higher amounts of total sugar and solid matter. Ethanol yields relative to the sugar consumed were slightly lower than expected.

Introducción

En países productores de caña de azúcar las melazas, o mieles finales del ingenio, se utilizan como materia prima para producir etanol empleando levaduras alcoholeras. La demanda actual de etanol carburante en el mercado internacional, dado el incremento en el precio del petróleo, es mayor que la oferta de etanol producido únicamente a partir de melazas, y es por esto que en Brasil, por ejemplo, se utiliza la caña entera como materia prima en la producción del etanol (Wheals, Basso et al. 1999). El rendimiento de etanol absoluto a partir de la caña fresca puesta en fábrica depende del contenido inicial de azúcares fermentables en la caña y de la eficiencia del proceso, pero puede estimarse entre 70 a 95 litros por tonelada (Wheals, Basso et al. 1999).

No se ha encontrado en la literatura disponible alguna publicación que informe sobre una posible relación entre el rendimiento de etanol y el grado de desarrollo de la caña en el campo. De hecho, el indicador de la madurez de la caña en el punto de corte lo establece el contenido de sacarosa. En cada país productor, y en las diferentes zonas productoras de un mismo país, esas condiciones se encuentran ya definidas.

Las exigencias de la calidad de esa caña empleada para producir azúcar no necesariamente deben ser las exigencias de calidad requeridas para caña destinada únicamente a producir etanol.

La sacarosa es el producto directo de la fotosíntesis en todas las plantas, exportándose de las hojas hacia el resto de la planta y sirviendo de fuente de carbón y energía. Por otro lado, la

sacarosa se almacena en algunas plantas, por ejemplo, el tallo de la caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) y en las raíces de la remolacha (*Beta vulgaris*). Experimentalmente se ha comprobado en años recientes que la acumulación de la sacarosa es un proceso dinámico que está acompañado por un metabolismo continuo de utilización y de síntesis de la molécula conformando un sistema bioquímico en el cual están involucradas varias enzimas. El cuadro metabólico es complejo porque se ha encontrado también, que la sacarosa es una molécula con una función controladora que modula la expresión de genes involucrados en la síntesis proteica y de moléculas transportadoras, en la división y diferenciación celular, y en procesos de desarrollo de la planta, por ejemplo la inducción del florecimiento, el desarrollo de la semilla y la acumulación de metabolitos. Expresado en otras palabras, la concentración momentánea de sacarosa en cualquier planta controla su propio destino final (Koch & Zeng 2002; Lunn & MacRae 2003; Koch 2004; Schäfer, Rohwer et al. 2004; Lisson, Inman-Bamber et al. 2005; Moore 2005; Rae, Grof et al. 2005; Walsh, Sky et al. 2005; McCormick, Cramer et al. 2006).

A una edad dada de una planta existe una distribución del contenido de azúcares libres, principalmente sacarosa, glucosa y fructuosa, y de la actividad de las enzimas que controlan dicho contenido. La caña de azúcar al momento de ser cosechada en los ingenios contiene el máximo de sacarosa (Batta & Singh 1986; Muchow, Robertson et al. 1996; Whittaker & Botha 1997). Al emplear la caña directamente en una industria de fermentación, es hasta cierto punto

inmaterial la distribución de los azúcares, ya que en principio una levadura es capaz de metabolizar, siempre y cuando estén disponibles biológicamente, en forma consecutiva o simultánea, la sacarosa, la fructosa, y la glucosa para producir etanol (Luyen, Riou et al. 2002; Guillaume, Delobel et al. 2007).

Es una regla general que en la producción de etanol directamente de la caña, la primera etapa es la extracción del jugo, norma que ha sido extrapolada directamente de la estructura tradicional de los ingenios de azúcar. El rendimiento industrial en la extracción del azúcar es del 95 % (Wheals, Basso et al. 1999), en el mejor de los casos. En este estudio, no se ha seguido dicha ruta, en su lugar se ha procedido fermentando directamente la caña molida, siguiendo la tecnología ExFerm (Rolz, de Cabrera et al. 1979), en la cual, a escala de laboratorio la utilización del azúcar disponible en la caña llegó a ser >99 % (Rolz & de Cabrera 1980; Rolz 1981).

A continuación se presentan datos de producción de etanol empleando caña en tres estados de desarrollo. Lamentablemente el 1 de febrero de este año, en el lugar de ensayo, colocado en una plantación comercial perteneciente el Ingenio Madre Tierra, dentro de la propiedad del campo de la UVG-PROESUR, el cañaveral fue incendiado sin conocerse su origen, terminándose, entonces, abruptamente el ensayo y evitando que se obtuvieran dos muestras más de caña. El siniestro puede apreciarse en la foto.

Métodos

Caña de azúcar. Se sembró la variedad NA-56 proporcionada por el Ingenio Madre Tierra, en 10 surcos de 1.5 m. de ancho y 10 m. de largo, en terrenos de PROESUR, Km. 92.5 Finca Camantulul carretera a Mazatenango, Santa Lucía Cotzumalguapa, Escuintla, el 31 de mayo del 2,007.

Muestras de caña. Se obtuvieron muestras de caña a los 68, 105, 133 y 174 días después de la fecha de siembra. La muestra consistió en tres tallos cortados a ras de suelo antes del primer nudo. Los tallos no eran de una sola planta sino que se escogieron tres plantas al azar con un similar desarrollo, estimado en forma visual. Los tallos se limpiaron manualmente del follaje y se realizó el corte en el nudo en donde se iniciaba la elongación superior. La longitud del tallo se midió empleando una cinta métrica y las lecturas fueron aproximadas cuando el tallo había



iniciado una curvatura, situación que prevaleció en la última muestra. Luego se pesó en una balanza (*Kingship modelo SW-3*). Finalmente se contaron el número de nudos y se midió con cinta la circunferencia del nudo mayor, que con regularidad fue el más cercano al suelo (de la circunferencia se calculó el diámetro)

gramos de material fresco en un recipiente de vidrio de peso conocido; luego se colocó en un horno incubador (*Fisher Scientific Isotemp Incubator*) a 65 °C hasta peso constante, el cual se logró entre las 24 a las 36 horas. El azúcar total se determinó por el método colorimétrico del fenol-sulfúrico empleando un espectrofotómetro

Preparación de la caña. La caña de las muestras de 105, 133 y 174 días se procesó de la manera siguiente. Los segmentos del tallo escogidos (del 2 al 5 comenzando a contar desde abajo) se partieron en secuencia con una pequeña sierra de mano (foto de la izquierda y del centro) y se pulverizaron en un molino de laboratorio (*IKA Works A11*) (foto de la derecha) Este equipo se escogió por la fragilidad relativa de los tallos de caña en las primeras muestras.



La caña de la última muestra (229 días) se partió en segmentos con una pequeña sierra de mano y se pulverizó en un molino combinado de cuchillas y martillos de escala de planta piloto, marca *Eterna* de fabricación local (Tecún).

El tamaño final de partícula fue similar para los dos casos, aunque más homogéneo al emplear el molino de planta piloto.

Determinaciones analíticas en la caña molida. La humedad se obtuvo procediendo de la manera tradicional en la forma siguiente: se pesaron dos

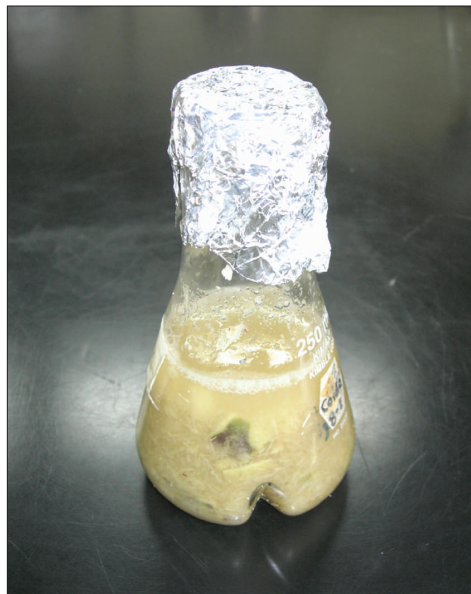
(*Shimadzu modelo mini UV 1240*), procediéndose de la manera siguiente. A la totalidad de los sólidos secos en donde se determinó la humedad, se les

agregó agua hirviendo. Se dejó enfriar por varias horas y luego se almacenó en la refrigeradora a 12 °C por 24 horas. Luego se filtró en papel filtro (Whatman 1004-110) y el total del volumen filtrado se llevó a 250 mL. Una alícuota se centrifugó a 10 °C y 4,000 rpm. y un mL se llevó a un volumen de 1000 mL. Finalmente, un volumen de esta dilución se llevó a una dilución apropiada para obtener una lectura confiable en el espectrofotómetro con el objeto de cuantificar los azúcares totales. Las lecturas se hicieron por duplicado. Para la cuantificación se empleó el modelo de una regresión lineal, obtenido previamente entre la densidad óptica y la concentración de soluciones patrón de sacarosa grado reactivo. El modelo se elaboró cada vez que se realizaba un conjunto de pruebas.

Levaduras utilizadas. Se emplearon cuatro levaduras en los ensayos de producción de etanol. Estas eran *Saccharomyces cerevisiae* CBS 381, CBS 400, CBS 422 y CBS 459.¹

Además, en algunos ensayos, se incluyó una levadura de panificación comercial (identificada como Pan).

Producción de etanol. Para la preparación de los inóculos se sembró la cepa de levadura en un frasco con 30 g/L del medio de *Caldo Sabouraud* y 2 % glucosa, más un 1 % de sacarosa adicional. El cultivo se realizó en agitación por 48 horas a 27 °C. El contenido de los frascos se centrifugó a 10 °C y 4,000 rpm. La biomasa recuperada se lavó una vez con agua. Se llevó a un volumen conocido con agua destilada. Una alícuota sirvió para determinar la cantidad de levadura seca en la suspensión, colocándola en un horno incubador (*Fisher Scientific Isotemp Incubator*) a 65 °C hasta peso constante, el resto se agregó a un frasco de 250 mL en donde previamente se había pesado una cantidad apropiada de caña. Puede observarse en las fotos que la proporción de agua a caña empleada, especificada más adelante, aseguraba que el líquido cubriera las



¹Centraalbureau voor Schimmelcultures, Utrecht, The Netherlands.

partículas sólidas. Debido a la liberación de CO₂ en forma de burbujas durante la fermentación era común encontrar partículas de caña pegadas en la pared interna del frasco arriba de la interfase.

Para cada levadura se prepararon dos frascos, con excepción de la muestra de 229 días en donde se preparó solo un frasco para cada cepa. Los frascos se incubaron en condiciones estáticas por 72 horas a 27 °C para asegurar una utilización completa de los azúcares, ya que ese tiempo es tres veces el requerido para lograr dicho objetivo en este tipo de fermentaciones (Rolz & de Cabrera 1980; Rolz 1981). El contenido de los frascos se filtró en papel filtro (*Whatman 1004-110*) y el total del volumen filtrado se llevó a 250 mL. Se centrifugó una alícuota a 10 °C y 4,000 rpm. En esta dilución se determinó el contenido de etanol, empleando un cromatógrafo *Agilent 6890N*, una columna *HP-Plot/Q* de 30 metros de largo, con un diámetro interno de 32 mm. y una cubierta interna de 20 μm. La temperatura inicial del horno fue de 150 °C por 3 minutos para luego incrementarse hasta 210 °C a una tasa de 15 grados por minuto. La temperatura del inyector fue de 250 °C y la del detector de 300 °C. Se empleó nitrógeno como gas de arrastre a una presión de 15.27 libras por pulgada cuadrada manométricas y el flujo en la columna fue de 1.5 mL por minuto. Bajo esas condiciones el tiempo del análisis por muestra fue de 7 minutos. Un mL de la dilución anterior se llevó a un volumen apropiado para obtener una lectura adecuada en el espectrofotómetro con el objeto de cuantificar los azúcares totales residuales.






Análisis estadístico. El análisis de variancia de un factor y la prueba de múltiples comparaciones con la corrección de Bonferroni se llevaron a cabo empleando Prism® versión 4.03 (GraphPad). Las gráficas también fueron elaboradas empleando este logicial.

Resultados y su discusión

Desarrollo de la caña. Los cambios en las características observadas de las muestras de caña durante su desarrollo se presentan en el Cuadro 1. Los datos muestran el promedio de tres mediciones individuales y la desviación estándar. En la primera columna se ha incluido una fotografía de una de las plantas de la muestra respectiva, la cual ilustra y resalta el cambio en el desarrollo respecto al tiempo después de siembra.

Cuadro 1

Caña en desarrollo: longitud y peso del tallo limpio de follaje, el número de nudos y el diámetro del nudo más cercano al suelo

Foto	Días de sembrada	Longitud de tallo limpio, cms.	Peso de tallo limpio, kg.	Número de nudos	Diámetro nudo mayor, cms.
	68	31 ± 4	n.s.d ¹	n.s.d ¹	n.s.d ¹
	105	102 ± 4	0.46 ± 0.10	6 ± 0	3.21 ± 0.42
	133	125 ± 13	0.74 ± 0.09	10 ± 2	3.31 ± 0.00
	174	195 ± 6	1.03 ± 0.28	13 ± 1	3.13 ± 0.46
	229	225 ± 15	1.77 ± 0.21	19 ± 1	3.49 ± 0.23

¹ No se determinó

Como era de esperarse la longitud, el peso y el número de nudos en el tallo aumentaron conforme transcurrió el tiempo. No así el diámetro del nudo mayor cercano al suelo que mostró poca variación después de los 105 días.

Cambios en la humedad y el contenido de azúcar total. Los cambios observados se ilustran en el Cuadro 2 para cuatro muestras de caña. La muestra a los 68 días no se analizó. Las cifras mostradas son el promedio de tres tallos y la desviación estándar. Como era de esperarse la humedad disminuyó y el azúcar total aumentó de acuerdo con el desarrollo de la planta.

Cuadro 2

Contenidos de agua y azúcar total en las muestras de caña

Días de sembrada	Humedad, %	Azúcar total, % en base seca	Azúcar total, % en base húmeda
105	89.12 ± 1.95	8.79 ± 1.42	0.96
133	82.61 ± 0.25	19.88 ± 2.76	3.46
174	77.33 ± 2.66	43.19 ± 8.88	9.79
229	73.50 ± 0.22	60.61 ± 3.18	16.06

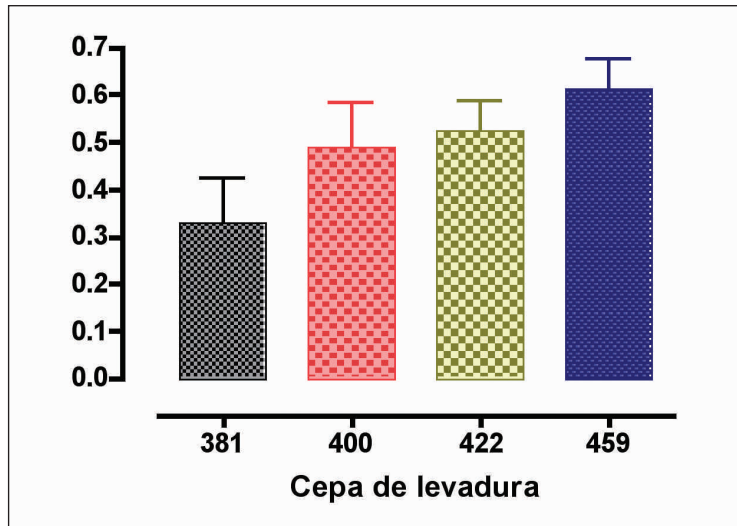
Proporción de agua, levadura y sólidos. En el Cuadro 3 se anotan, para cada cepa de levadura y para las fermentaciones llevadas a cabo con caña de 133, 174 y 229 días, la proporción de agua, biomasa de levadura (en base seca) y partículas de cañas molidas (en base seca) utilizadas en los frascos. Las proporciones se han expresado en términos de dos cocientes, los litros de agua requeridos inicialmente por kg. de caña (en base seca) y los gramos de biomasa de levadura (en base seca) agregados inicialmente por kg. de caña (en base seca).

Cuadro 3

Proporción de agua y levadura (en base seca) en relación a sólidos (en base seca).

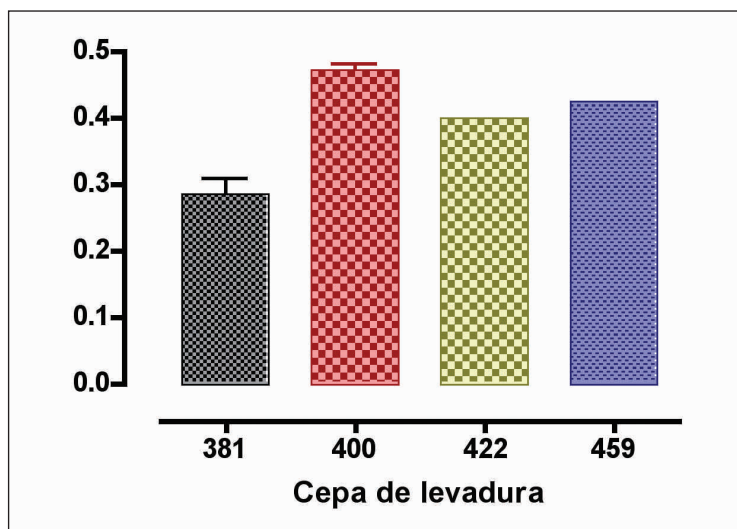
Cepa de levadura	Litros de agua por kg. de caña (base seca)	Gramos de levadura (base seca) por kg. de caña (base seca)
Caña de 133 días		
381	3.09	32.11
400	3.16	35.26
422	3.59	50.60
459	3.59	42.12
Caña de 174 días		
381	10.96	6.47
400	11.51	54.35
422	11.03	73.16
459	11.55	89.30
Pan	11.74	158.30
Caña de 229 días		
381	11.92	52.67
400	11.84	92.58
422	12.00	51.13
459	11.31	57.45
Pan	12.50	164.94

Al emplear la caña de un desarrollo precoz (133 días) fue posible inicialmente agregar más de esta al frasco por unidad de suspensión de levadura adicionada. Esta es la razón de la diferencia observada en la segunda columna del cuadro, entre los datos de las pruebas a 133 días y las otras dos pruebas. La levadura de panificación produjo más biomasa que las levaduras alcoholeras durante la preparación del inóculo, y es por eso, que la proporción de biomasa por kg. de caña (en base seca), sobresale de las demás en las cifras de la tercera columna del cuadro. La variación en la producción de biomasa durante la preparación del inóculo para las cuatro cepas de levaduras alcoholeras se muestra en la Gráfica 1. El análisis de variancia de un factor mostró que los valores medios no son diferentes entre las cepas ($F = 2.305$; $P < 0.05$).



Gráfica 1.
Biomasa de levadura
producida en el inóculo

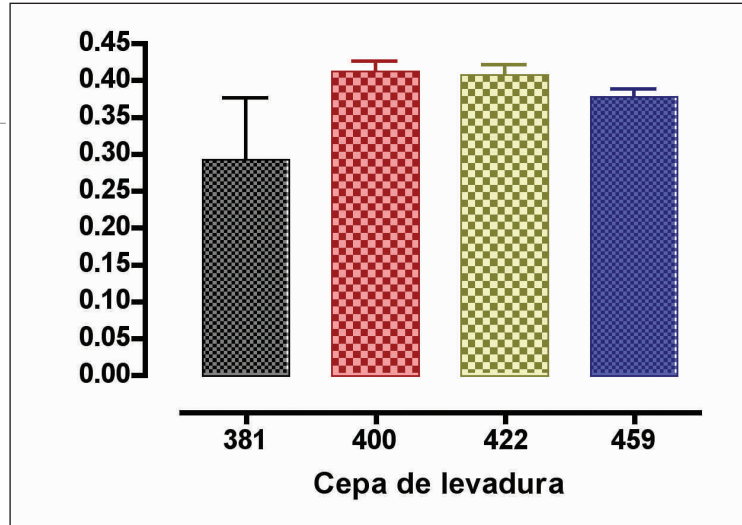
Producción de etanol. Se calculó el rendimiento de conversión de los azúcares en etanol por las levaduras, dividiendo el etanol producido en gramos entre los gramos de azúcar consumida. En la Gráfica 2 se presenta el rendimiento para la muestra de caña sembrada a los 133 días y en la Gráfica 3 para la muestra de caña sembrada a los 174 días. La muestra obtenida a los 105 días no se empleó para producir etanol y en la de 229 días, como anteriormente se mencionó, solo se empleó un frasco por levadura.



Gráfica 2.
Rendimiento de etanol
para la caña de 133 días
de desarrollo

Un análisis de varianza de un factor mostró que el rendimiento era diferente entre las levaduras ($F = 42.55$; $P = 0.0017$), indicando la prueba de comparaciones múltiples de Bonferroni que la cepa 381 era diferente a las demás ($P < 0.01$).

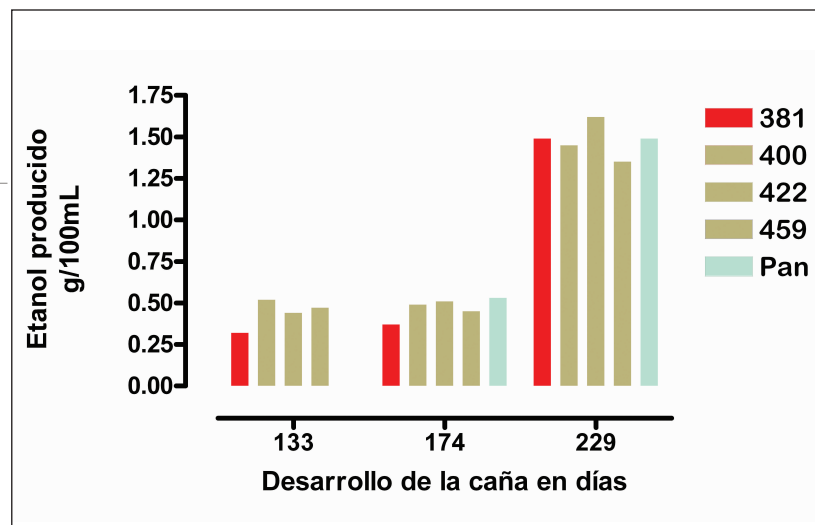
Gráfica 3.
Rendimiento de etanol
para la caña de 174 días
de desarrollo



A diferencia del caso anterior, para esta muestra de caña, el análisis de varianza de un factor mostró que el rendimiento no era diferente entre las levaduras ($F = 1.753$; $P = 0.2945$).

En la Gráfica 4 se presentan los promedios de las cifras del etanol producido en gramos por 100 mL para todas las cepas de levaduras y todas las cañas en diferente estado de desarrollo. Se ha incluido la levadura de panificación, la cual únicamente se ensayó con la caña cortada a los 174 y 229 días después de sembrada. Una apreciación visual indica claramente que el etanol producido fue mayor cuando se empleó caña relativamente más madura. Esto era de esperarse pues, como se mostró en el Cuadro 2, dicha caña tiene más azúcares totales y menos humedad. Interesante también es notar que la levadura de panificación mostró una producción de etanol equivalente a las cepas de levaduras alcohólicas. Puede observarse además, que la cepa CBS381 produjo menos etanol, diferencia más marcada cuando se utilizó caña precoz.

Gráfica 4.
Etanol producido por las
diferentes cepas de
levadura en cañas de
diferente desarrollo



En el Cuadro 4 se ha anotado el rendimiento de etanol. Las cifras son el promedio de todas las levaduras. También se compara con el valor teórico que es igual a 0.510. Finalmente el rendimiento se expresa en términos de interés para el proceso, primero como gramos de etanol por kg. de caña fresca y luego en litros de etanol por tonelada de caña fresca.

Cuadro 4

Rendimientos de etanol

Caña, días de sembrada	Rendimiento de etanol, g por g de azúcar consumida	Rendimiento % del teórico	Rendimiento de etanol, g por kg. de caña fresca	Rendimiento de etanol, L por TM de caña fresca
133	0.394	77	14	18
174	0.387	76	38	48
229	0.305	60	48	61

Comentarios finales

Como se mencionó en la introducción no se encontró en la literatura disponible, alguna publicación relacionada con la producción de etanol directamente de la caña y el grado de su desarrollo en el campo. Lo anterior no necesariamente indica que no exista esta información, pudiera existir en una revista que no estuviese registrada en las bases de datos consultadas, o bien en una revista local de circulación restringida o también la información pudiera no haber sido publicada, en este último caso, es como sino se hubiese realizado.

Desde el punto de vista de producción de azúcar, por el contrario, los cambios que ocurren causados por diversos factores, en y desde, el momento en que la caña es cosechada en el campo, hasta que se procesa en el ingenio, sí se han investigado (Mao, Que et al. 2006). La formación microbiana de polisacáridos como el dextran, o polialcoholes como el manitol en la caña cortada, acoplados al incremento de acidez y de azúcares reductores, repercuten en la recuperación del azúcar en un ingenio (Eggleston 2002; Eggleston & Harper 2006). No se conoce, por otro lado, que efecto

podrían tener en la fermentación a etanol dichos daños en la caña.

Por lo tanto, los resultados acá presentados aportan información interesante, pero al mismo tiempo, plantean una serie de interrogantes. En parte porque la información es de carácter preliminar. Primero, porque como se explicó en la introducción, la experimentación no se completó, es decir faltaron ensayos. Uno con muestras de caña madura, desde el punto de vista del ingenio, y otro con caña en senescencia. Segundo, porque no se llevó a cabo un análisis químico detallado de la distribución de azúcares, sino que únicamente se cuantificó el contenido total. Esto último, como se comentará a continuación, podría haber influido en los valores de algunos de los resultados reportados.

El rendimiento de etanol obtenido en las tres fermentaciones tipo ExFerm empleando caña en tres estados de desarrollo y varias cepas de levaduras no dependió de la cepa de levadura empleada. Sin embargo se encontró que el comportamiento de una de las levaduras (CBS 381) fue estadísticamente diferente al resto al emplear caña precoz en su desarrollo.

Pudiera ser que dicha levadura fuera sensible a la distribución y disponibilidad de los azúcares en la caña. Se conoce que en la caña precoz la glucosa y la fructosa predominan sobre la sacarosa (Batta & Singh 1986; Qudsieh, Yusof et al. 2001), aunque esto no es un impedimento ya que todas las hexosas son transportadas adentro de la célula por un mecanismo similar. Podría ser que dichos azúcares estén atados a otras moléculas y que algunas cepas de levadura no posean las enzimas

capaces de hidrolizarlos. Es posible también la existencia de inhibidores en la caña precoz, aunque es poco frecuente que dichos compuestos sean selectivos solo para una levadura y para otras no.

Los valores promedio del rendimiento de etanol respecto al azúcar consumido, mostrados en el Cuadro 4, pueden calificarse de ser ligeramente bajos. Un valor aceptable hubiese estado entre 0.42 y 0.43 (Echegaray, Carvalho et al. 2000; Converti, Arni et al. 2003; Aldiguié, Alfenore et al. 2004). Es posible que esto se deba al método de cuantificar los azúcares totales, ya que dicha cifra es fundamental para calcular dicho rendimiento. La metodología empleada podría estar sobreestimando los azúcares debido a algún compuesto que pudiese interferir con las lecturas en el espectrofotómetro. Otra posible causa es que se hubiese evaporado una fracción del etanol producido en los frascos ya que se mantuvieron por un tiempo prolongado, más del necesario, como se explicó anteriormente.

Como era de esperarse se produjo más etanol al emplear la caña más desarrollada, ya que la misma contenía más azúcar total y materia sólida. Sin embargo, no pudo establecerse un intervalo en el desarrollo de la caña que identificara el momento apropiado de corte para optimizar la producción de etanol, pero se logró detectar que entre los 174 y 229 días de desarrollo de la caña hubo un incremento notable en la producción de etanol.

Se ha diseñado un nuevo experimento para la zafra 2008-2009, en el cual se intentará procesar muestras desde los

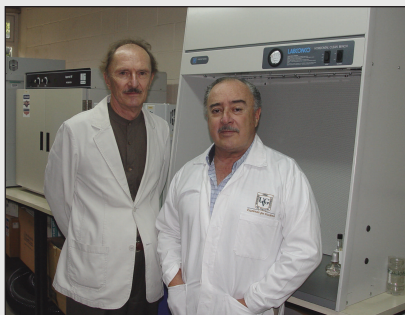
100 días de desarrollo hasta la senescencia y además, se ha planificado un análisis detallado de los azúcares. Se esperaría que los resultados obtenidos contribuyan a clarificar algunas de las interrogantes planteadas en este artículo.

Reconocimiento

Los autores agradecen la ayuda de las Licenciadas María del Carmen Samayoa y Fabiola Prado de Micheo por el análisis de etanol. Al señor Carlos Arias por la colaboración técnica durante la realización de las pruebas. Al Dr. Rolando Cifuentes y al Ingeniero Agrónomo Alexander Cruz por supervisar el desarrollo de la caña en el campo. Esta investigación se realizó en parte con fondos provenientes del proyecto FODECYT 94-2006 de la Secretaría Nacional de Ciencia y Tecnología (SENACYT).

Bibliografía

- Aldigui, A. S., S. Alfenore, et al. (2004) *Synergistic temperature and ethanol effect on *Saccharomyces cerevisiae* dynamic behaviour in ethanol bio-fuel production* Bioprocess and Biosystems Engineering 26 (4): 217-222
- Batta, S. K. & R. Singh (1986) *Sucrose metabolism in sugar cane grown under varying climatic conditions: synthesis and storage of sucrose in relation to the activities of sucrose synthase, sucrose phosphate synthase and invertase* Phytochemistry 25 (11): 2431-2437
- Converti, A., S. Arni, et al. (2003) *Simplified Modeling of fed-Batch alcoholic fermentation of sugarcane blackstrap molasses* Biotechnol Bioeng 84: 88-95
- Echegaray, O. F., J. C. M. Carvalho, et al. (2000) *Fed-batch culture of *Saccharomyces cerevisiae* in sugar-cane blackstrap molasses: invertase activity of intact cells in ethanol fermentation* Biomass and Bioenergy 19: 39-50
- Eggleston, G. (2002) *Deterioration of cane juice--sources and indicators* Food Chemistry 78 (1): 95-103
- Eggleston, G. & W. Harper (2006) *Determination of sugarcane deterioration at the factory: development of a rapid, easy and inexpensive enzymatic method to measure mannitol* Food Chemistry 98: 366-372
- Guillaume, C., P. Delobel, et al. (2007) *Molecular basis of fructose utilization by the wine yeast *Saccharomyces cerevisiae*: a mutated HXT3 allele enhances fructose fermentation* Appl. Environ. Microbiol. 73 (8): 2432-2439
- Koch, K. (2004) *Sucrose metabolism: regulatory mechanisms and pivotal roles in sugar sensing and plant development* Current Opinion Plant Biol 7: 235-246



Carlos E. Rolz Asturias & Luis Roberto de León Fajardo

Investigadores del Laboratorio de Ingeniería Bioquímica del Centro de Investigaciones de Ingeniería del Instituto de Investigaciones de la Universidad del Valle de Guatemala

- Koch, K. E. & Y. Zeng (2002) *Molecular approaches to altered C partitioning: genes for sucrose metabolism* J Amer Soc Hort Sci 127 (4): 474-483
- Lisson, S. N., N. G. Inman-Bamber, et al. (2005) *The historical and future contribution of crop physiology and modelling research to sugarcane production systems* Field Crops Research 92: 321-335
- Lunn, J. E. & E. MacRae (2003) *New complexities in the synthesis of sucrose* Current Opinion Plant Biol 6: 208-214
- Luyten, K., C. Riou, et al. (2002) *The hexose transporters of Saccharomyces cerevisiae play different roles during enological fermentation* Yeast 19 (8): 713-726
- Mao, L., F. Que, et al. (2006) *Sugar metabolism and involvement of enzymes in sugarcane (Saccharum officinarum L.) stems during storage* Food Chemistry 98: 338-342
- McCormick, A. J., M. D. Cramer, et al. (2006) *Sink strength regulates photosynthesis in sugarcane* New Phytologist 171: 759-770
- Moore, P. H. (2005). *Integration of sucrose accumulation processes across hierarchical scales: towards developing an understanding of the gene-to-crop continuum* Field Crops Research 92: 119-135
- Muchow, R. C., M. J. Robertson, et al. (1996) *Growth of sugarcane under high input conditions in tropical Australia. II. Sucrose accumulation and commercial yield* Field Crops Research 48: 27-36
- Qudsieh, H. Y. M., S. Yusof, et al. (2001) *Physico-chemical changes in sugarcane (Saccharum officinarum var yellow cane) and the extracted juice at different portions of the stem during development and maturation* Food Chemistry 75 (2): 131-137
- Rae, A. L., C. P. L. Grof, et al. (2005) *Sucrose accumulation in the sugarcane stem: pathways and control points for transport and compartmentation* Field Crops Research 92: 159-168
- Rolz, C. (1981). *Ethanol from sugar crops* Enzyme Microb. Technol. 3: 19-23
- Rolz, C. & S. d. Cabrera (1980). *Ethanol from sugar cane: flask experiments using the EX-FERM technique* Appl. Environ. Microbiol. 40 (3): 466-471
- Rolz, C., S. d. Cabrera, et al. (1979) *Ethanol from sugar cane: EX-FERM concept* Biotechnol Bioeng 12: 2347-2349
- Schäfer, W. E., J. M. Rohwer, et al. (2004) *Protein-level expression and localization of sucrose synthase in the sugarcane culm* Physiol. Plantarum 121: 167-195
- Walsh, K. B., R. C. Sky, et al. (2005) *The anatom of the pathway of sucrose unloading within the sugarcane stalk* Functional Plant Biology 32: 367-374
- Wheals, A. E., L. C. Basso, et al. (1999) *Fuel ethanol after 25 years* TRENDS in Biotechnology 17 (12): 482-487
- Whittaker, A. & F. C. Botha (1997) *Carbon partitioning during sucrose accumulation in sugarcane internodal tissue* Plant Physiol. 115: 1651-1659