

MECÁNICA PARA LA CONTENCIÓN DE ECLOSIÓN DE HUEVOS DE MOSCA PINTA (*Aeneolamia spp.*) EN CAÑA DE AZÚCAR (*Saccharum officinarum*)



Año 7 • VOLUMEN 7 • NÚMERO 2 • MARZO-ABRIL, 2014

Qué hacer con la paja de la cosecha mecanizada de la caña de azúcar 3

Nuevas directrices en mejoramiento genético de caña de azúcar (*Saccharum spp.*) 9

Aplicaciones del cultivo de tejidos vegetales en caña de azúcar (*Saccharum spp.*) 16

Necesidades de innovación en la producción de caña de azúcar (*Saccharum spp.*) 22

La agroindustria de la caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) en México 35

Conservación de recursos genéticos de caña de azúcar (*Saccharum spp.*) 42

y más artículos de interés...

pág. 27

Guía para autores

Estructura

Agroproductividad es una revista de divulgación, auspiciada por el Colegio de Postgraduados para entregar los resultados obtenidos por los investigadores en ciencias agrícolas y afines a los técnicos y productores. En ella se podrá publicar información relevante al desarrollo agrícola en los formatos de artículo, nota o ensayo. Las contribuciones serán arbitradas y la publicación final se hará en idioma español.

La contribución tendrá una extensión máxima de 16 cuartillas, incluyendo las ilustraciones. Deberá estar escrita en Word a doble espacio empleando el tipo Arial a 12 puntos y márgenes de 2.5 cm. Debe evitarse el uso de sangría al inicio de los párrafos.

Las ilustraciones serán de calidad suficiente para su impresión en offset a colores, y con una resolución de 300 dpi en formato JPEG, TIFF o RAW y el tamaño, dependiendo de la imagen y su importancia de acuerdo con la tabla comparativa.

La estructura de la contribución será la siguiente:

1) Artículos: una estructura clásica definida por los capítulos: Introducción, Materiales y Métodos, Resultados y Discusión, Conclusiones y Literatura Citada; 2) Notas o Ensayos: deben tener una secuencia lógica de las ideas, exponiendo claramente las técnicas o metodologías que se transmiten en lenguaje llano, con un uso mínimo de términos técnicos especializados.

Formato

Título. Debe ser breve y reflejar claramente el contenido. Cuando se incluyan nombres científicos deben escribirse en itálicas.

Autor o Autores. Se escribirán él o los nombres completos, separados por comas, con un índice progresivo en su caso. Al pie de la primera página se indicará el nombre de la institución a la que pertenece el autor y la dirección oficial, incluyendo el correo electrónico.

Cuadros. Deben ser claros, simples y concisos. Se ubicarán inmediatamente después del primer párrafo en el que se mencionen o al inicio de la siguiente cuartilla. Los cuadros deben numerarse progresivamente, indicando después de la referencia numérica el título del mismo (Cuadro 1. Título), y se colocarán en la parte superior. Al pie del cuadro se incluirán las aclaraciones a las que se hace mención mediante un índice en el texto incluido en el cuadro.

Figuras. Corresponden a dibujos, gráficas, diagramas y fotografías. Las fotografías deben ser de preferencia a colores. Se debe proporcionar originales en tamaño postal, anotando al reverso con un lápiz suave el número y el lugar que le corresponda en el texto. Los títulos de las fotografías deben mecanografiarse en hoja aparte. La calidad de las imágenes digitales debe ceñirse a lo indicado en la tabla comparativa.

Unidades. Las unidades de pesos y medidas usadas serán las aceptadas en el Sistema Internacional.

Tabla comparativa.

Centímetros	Píxeles	Pulgadas
21.59×27.94	2550×3300	8.5×11
18.5×11.5	2185×1358	7.3×4.5
18.5×5.55	2158×656	7.3×2.2
12.2×11.5	1441×1358	4.8×4.5
12.2×5.55	1441×656	4.8×2.2
5.85×5.55	691×656	2.3×2.2
9×11.5	1063×1358	3.5×4.5
9×5.55	1063×656	3.5×2.2



Contenido

3	Qué hacer con la paja de la cosecha mecanizada de la caña de azúcar
9	Nuevas directrices en mejoramiento genético de caña de azúcar (<i>Saccharum</i> spp.)
16	Aplicaciones del cultivo de tejidos vegetales en caña de azúcar (<i>Saccharum</i> spp.)
22	Necesidades de innovación en la producción de caña de azúcar (<i>Saccharum</i> spp.)
27	Mecánica para la contención de eclosión de huevos de mosca pinta (<i>Aeneolamia</i> spp.) en caña de azúcar (<i>Saccharum officinarum</i>)
35	La agroindustria de la caña de azúcar (<i>Saccharum officinarum</i>) en México
42	Conservación de recursos genéticos de caña de azúcar (<i>Saccharum</i> spp.)
47	Validación de dosis generadas por el sistema de fertilización SIRDF para caña de azúcar (<i>Saccharum officinarum</i>)
55	Respuestas de las variedades MEX 69-290 y CP 72-2086 de caña de azúcar (<i>Saccharum</i> spp.) a la salinidad
60	Los biofertilizantes y la producción de caña de azúcar (<i>Saccharum</i> spp.)
65	Efecto del hidróxido de calcio y conservación de alimentos a base de residuos de caña de azúcar



Es responsabilidad del autor el uso de las ilustraciones, el material gráfico y el contenido creado para esta publicación.

Las opiniones expresadas en este documento son de exclusiva responsabilidad de los autores, y no reflejan necesariamente los puntos de vista del Colegio de Postgraduados, de la Editorial del Colegio de Postgraduados, ni de la Fundación Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas.

Corrección de estilo: Hannah Infante Lagarda

Maquetación: Alejandro Rojas Sánchez

Suscripciones, ventas, publicidad, contribuciones de autores:

Guerrero 9, esq. Avenida Hidalgo, C.P. 56220, San Luis Huexotla, Texcoco, Estado de México.

Teléfono: 01 (595) 928 4013 | jocadena@colpos.mx; jocadena@gmail.com

Impresión 3000 ejemplares.

©Agroproductividad, publicación respaldada por el Colegio de Postgraduados. Derechos Reservados. Certificado de Licitud de Título Núm. 0000. Licitud de Contenido 0000 y Reserva de Derechos Exclusivos del Título Núm. 0000. Editorial del Colegio de Postgraduados, Montecillo, Estado de México, Miembro de la Cámara Nacional de la Industria Editorial Núm. 036.

Impreso en México — Printed in México
PRINTING ARTS MEXICO, S. de R. L. de C. V.
Calle 14 no. 2430, Zona Industrial
Guadalajara, Jalisco, México. C.P. 44940
Fax: 3810 5567
www.tegrafik.com
RFC: PAM991118 DGo

Directorio

Said **Infante Gil**

Editor General del Colegio de Postgraduados

Rafael **Rodríguez Montessoro**[†]

Director Fundador

Jorge **Cadena Iñiguez**

Director de Agroproductividad

Comité Técnico-Científico

Colegio de Postgraduados—Montecillo

Fernando **Clemente S.**

Dr. Ing. Agr. Catedrático Fauna Silvestre

Ma. de Lourdes **de la Isla**

Dr. Ing. Agr. Catedrática Aereopolución

Ángel **Lagunes T.**

Dr. Ing. Agr. Catedrático Entomología

Enrique **Palacios V.**

Dr. Ing. Agr. Catedrático Hidrociencias

Jorge **Rodríguez A.**

Dr. Ing. Agr. Catedrático Fruticultura

Colegio de Postgraduados—Puebla

Manuel R. **Villa Issa**

Dr. Ing. Agr. Economía Agrícola

Instituto de Investigaciones

Forestales, Agrícolas y Pecuarias

Pedro **Cadena I.**

Dr. Ing. Agr. Transferencia de Tecnología

Ricardo **Magaña Figueroa**

M. C. P. Director de Promoción y Divulgación

Confederación Nacional Campesina

Jesús **Muñoz V.**

Dr. Ing. Agr. Agronegocios

Instituto Interamericano de Cooperación
para la Agricultura

Victor **Villalobos A.**


Dr. Ing. Agr. Biotecnología



Dr. Jorge Cadena Iñiguez

Editorial

VOLUMEN 7 • NÚMERO 2 • MARZO—ABRIL, 2014.

La agroindustria de la caña de azúcar en México, tiene antecedentes inmediatos a la conquista y colonización, y fue por muchos años una actividad económica primordial para el crecimiento y desarrollo, a tal grado que es la única actividad que goza del llamado Decreto Cañero de 1991, que la ubica como de interés público. Durante muchos años los procesos de transformación de los jugos de caña, a azúcar no cambiaron sustancialmente, sin embargo, en la actualidad y dada la diversidad de fuentes edulcorantes, la industria se ve obligada a realizar cambios tecnológicos para la producción en campo y refinación en fábrica.  presenta en este número avances y perspectivas sobre los recursos genéticos de caña de azúcar, métodos de conservación, mejoramiento genético, variedades, nutrición, necesidades de innovación y aprovechamiento de subproductos entre otros principales. Una asignatura pendiente, es la modernización de la industria y diversificación de productos diferentes al uso como edulcorante. Un reflejo de lo anterior, son las 22 millones de toneladas de azúcar que resultaron de la zafra 2012-13 en México, las cuales no pudieron ser incluidas en la industria, generando “excedentes”. La obtención de productos orientados al sector bioenergético con fines de combustión u oxigenación de combustibles tradicionales, puede ser una de varias opciones económicas que reduzcan usos y costumbres que impactan en la profesionalización de los actores.

Jorge **Cadena Iñiguez**

Director de 

Qué hacer con la paja de la cosecha mecanizada de la **CAÑA DE AZÚCAR**

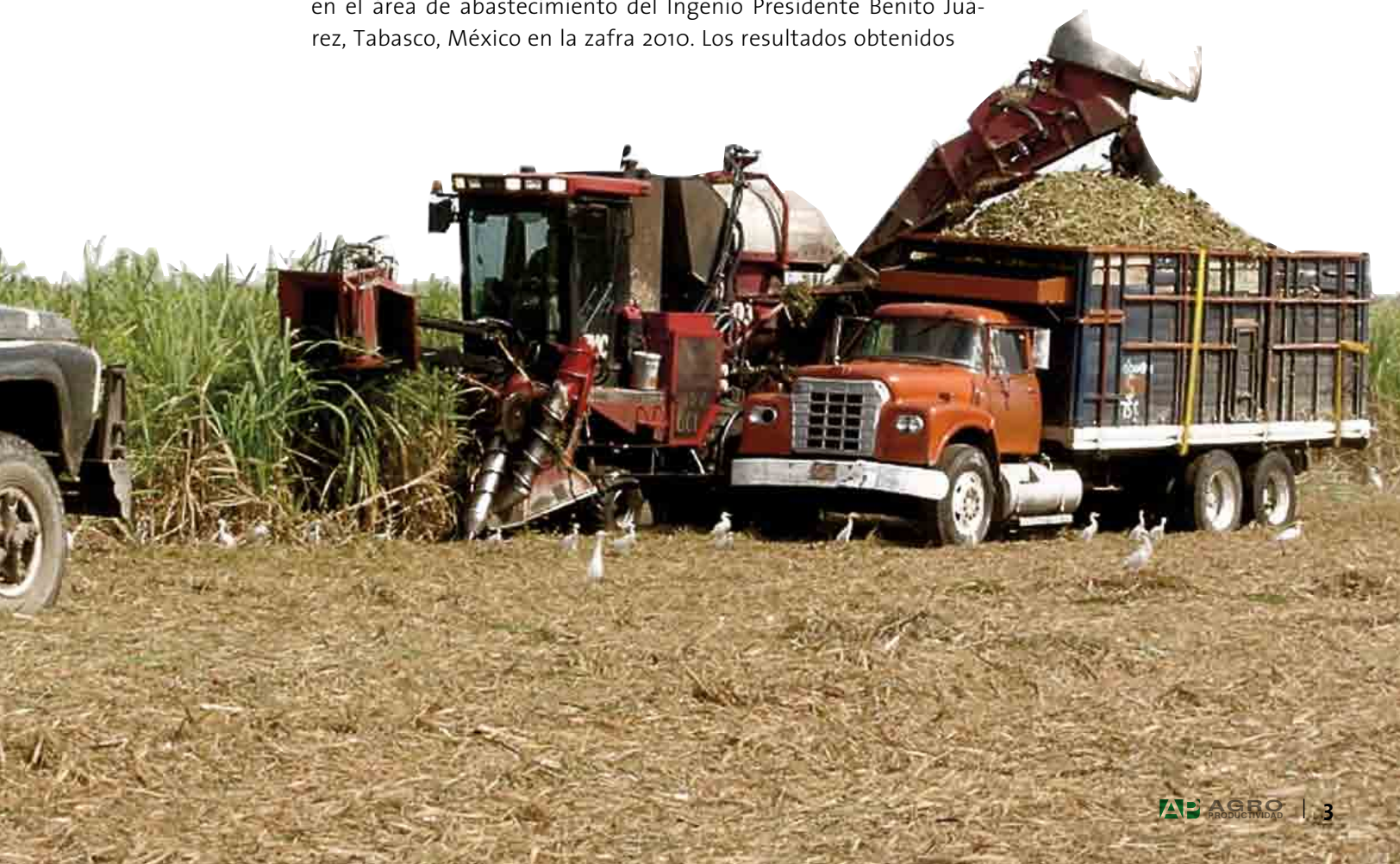
Salgado-García, S.¹; Aranda-Ibañez, E.¹; Castelán-Estrada, M.¹; Ortiz-Laurel, H.²; Palma-López, D.¹ y Córdova-Sánchez, S.³

¹Colegio de Postgraduados-Campus Tabasco, Grupo MASCAÑA-LPI-2: AESS. Km. 3,5 Periférico Carlos A. Molina s/n. H. Cárdenas, Tabasco. CP 86500. México. ²Colegio de Postgraduados-Campus Córdoba, Grupo MASCAÑA-LPI-2: AESS. Km. 348 Carretera Federal Córdoba-Veracruz, Amatlán de los Reyes, Veracruz. CP 94946. México. ³Centro Maya de Estudios Agropecuarios, Universidad Autónoma de Chiapas. Playas de Catazajá, Chiapas. CP 29980. México.

*Autor responsable: salgados@colpos.mx

RESUMEN

En la industria azucarera mexicana, se ha despertado el interés por aprovechar la paja de la caña de azúcar para diferentes propósitos; por ejemplo, como combustible para las calderas de los ingenios, reincorporarla como nutrimento al suelo y como alimento del ganado bovino. En México no se habían realizado estudios al respecto; con este trabajo se evaluó el rendimiento de paja en 15 plantaciones comerciales de caña de azúcar cosechadas en verde en el área de abastecimiento del Ingenio Presidente Benito Juárez, Tabasco, México en la zafra 2010. Los resultados obtenidos



indicaron que la paja seca producida por parcela fue en promedio 18.2 t ha^{-1} , mientras que por variedad de caña el rendimiento varió entre 12.7 y 21.2 t ha^{-1} . El coeficiente de variación fue de 42.8% entre parcelas; la alta variabilidad en el rendimiento de paja se atribuyó a las condiciones de clima, suelo y particularidades en el manejo agronómico de las parcelas. Se considera necesario realizar más estudios para optimizar el manejo de la paja bajo las condiciones específicas de cada región cañera.

Palabras clave: alimento bovino, empacado de paja, energía, reciclaje nutricional

INTRODUCCIÓN

El cultivo de la caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) en México se maneja en su mayor parte bajo el sistema de “caña quemada, corte manual y alce mecanizado” que implica quemar el cañaveral maduro para facilitar la cosecha y semanas después de la primera quema, una segunda (requema) elimina las puntas de caña que se dejaron en campo. Esta práctica impide la reincorporación de la materia orgánica al suelo y degrada las propiedades físicas y químicas, por lo que este manejo no es sustentable a largo plazo (Ribon *et al.*, 2003; Naranjo *et al.*, 2006). Debido a que estas prácticas se han empleado durante muchos años, los suelos del área de influencia del Ingenio Presidente Benito Juárez (IPBJ) presentan menos de 2% de materia orgánica y se clasifican de baja fertilidad, repercutiendo en el rendimiento de tallo moledero, lo que se aprecia en las 12 zafas más recientes del IPBJ cuyos rendimientos medios son de 61 t ha^{-1} , mientras que el promedio nacional en ese periodo fue de 74 t ha^{-1} (Salgado *et al.*, 2012)

La materia orgánica (MO) tiene un papel fundamental para mantener la fertilidad del suelo ya que favorece la formación de agregados, mayor porosidad, retención de humedad, actividad biológica y mineralización. Por ello, es recomendable incorporar al suelo parte de los esquilmos agrícolas para conservar una cantidad conveniente de MO en la capa arable (Naranjo *et al.*, 2006), y se considera que un contenido de 3.2% de MO en el suelo contribuye a mantener propiedades físicas y químicas adecuadas y la fertilidad (Loveland y Webb (2003). Recientemente fueron introducidas cosechadoras mecánicas al IPBJ que permiten hacer la “cosecha en verde” (sin quema), con lo cual se separan las puntas del tallo, el tallo es cortado junto con las hojas, y el sistema de limpieza de la cosechadora separa la caña de la paja. El tallo moledero se recolecta para su transporte al ingenio, mientras que la paja resultante es vertida sobre el suelo formando un mantillo (Ortiz *et al.*, 2012). La paja puede ser recolectada para usarla como combustible de las calderas del propio ingenio, incorporarla al suelo con un multicultivador, o bien, quemarla al aire libre para evitar la cobertura excesiva de las cepas. Esta última opción no es recomendable en términos ambientales, ya que se presentan los mismos inconvenientes del sistema de caña quemada.

Para lograr un programa adecuado de aprovechamiento de la paja como combustible y reincorporar una parte al suelo, es necesario evaluar la cantidad de paja producida durante la cosecha en verde, la eficiencia de recolección y cantidad de paja residual en el suelo, lo cual contribuiría a promover un manejo sustentable de la caña de azúcar. Este primer acercamiento al estudio de la paja en Tabasco, México buscó cuantificar la paja que produce el cultivo de caña de azúcar en condiciones agroecológicas del área de abastecimiento del Ingenio Presidente Benito Juárez.

MATERIALES Y MÉTODOS

El Ingenio (IPBJ) está ubicado en el poblado C-27 del Plan Chontalpa, en el km 27 de la Ciudad de Cárdenas, Tabasco, México. La región tiene clima cálido-húmedo [Am(i')g] con temperatura media anual de $26 \text{ }^\circ\text{C}$, precipitación de 2,163 mm, y elevación media de 11 m. El área de abastecimiento es cercano a 18,360 hectáreas de caña de azúcar en diferentes fases de desarrollo.

Muestras

Los muestreos de paja se realizaron durante marzo 2009 y abril, 2010, en 15 plantaciones cosechadas en verde, con un único paquete agronómico y en estado de madurez completa. Cada plantación muestreada se georeferenció sobre un mapa de suelos (Figura 1) (Salgado *et al.*, 2009).

Los muestreos se hicieron dos días después de la cosecha, con un marco metálico de 1 m^2 , el cual se lanzó de forma aleatoria, cuidando que cayera al menos a 30 m del límite de la parcela y a 25 m de distancia de otros puntos de muestreo. Se recolectó toda la paja contenida en el marco,

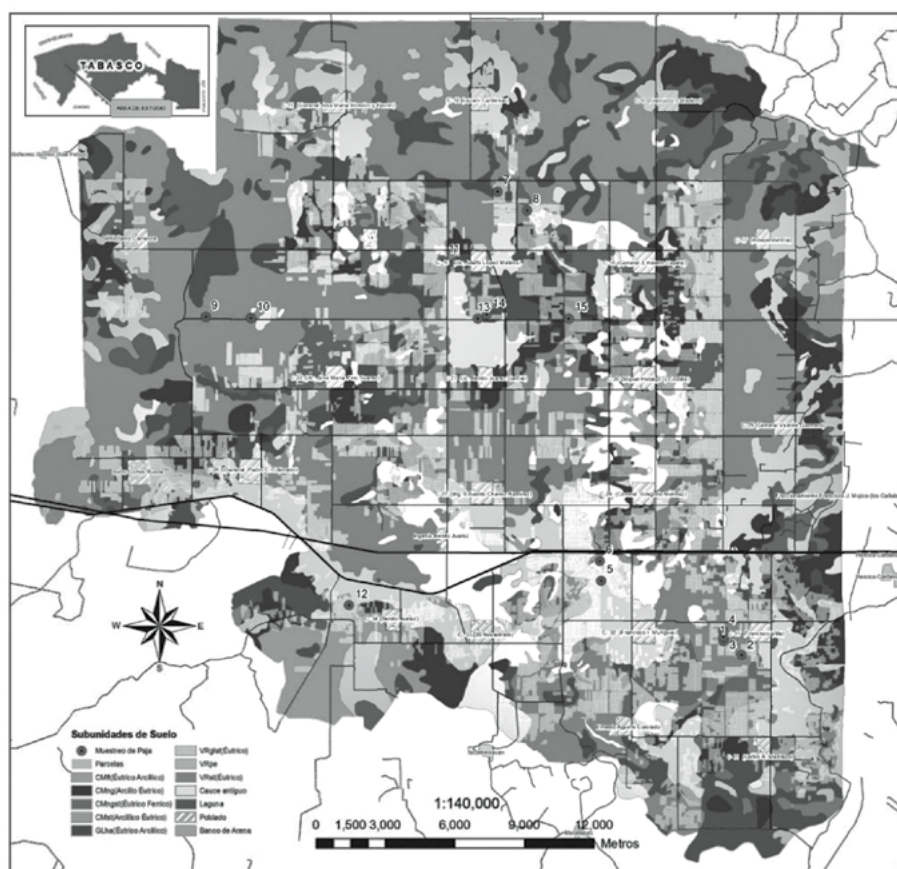


Figura 1. Ubicación de sitios de muestreo para estimar el rendimiento de paja en caña de azúcar, del Ingenio Presidente Benito Juárez de Tabasco, México.

reportado para la región por Salgado *et al.* (2009) quienes reportaron valores de entre 6 y 10.5 t ha⁻¹. La variación pudiera ser atribuible a la heterogeneidad edáfica del área de abasto del IPBJ, pues las plantaciones se desarrollan en seis diferentes subunidades de suelo (Cuadro 1), regímenes de precipitación y a diferencias en manejo agronómico de la plantación. En cuanto a los rendimientos de paja por variedad de caña, se registró que la variedad *Millonaria* fue de 12.7 t ha⁻¹; las variedades ITV y MEX 69-290 aportaron 17.6 t ha⁻¹; mientras que la MEX 68-P-23 y MEX 79-431 rindieron 18.6 t ha⁻¹ y la RD-75-11, 21.2 t ha⁻¹ (Cuadro 1). Estudios previos realizados en la región indicaron concentraciones de 0.60% de nitrógeno (N), 0.14 de fósforo (P) y 1.0% de potasio (K) en la paja de caña (Salgado *et al.*, 2009), lo cual referenciado al aporte calculado de estos nutrimentos al suelo en función del rendimiento de materia seca por hectárea serían de 109 kg de N, 58.3 kg de P₂O₅ y 234.7 kg de K₂O, cantidades que son incluso superiores a las que se aplican con la fertilización química. Resultados semejantes han sido reportados por Lal (2009). Sin embargo, dejar la totalidad de la paja sobre el suelo crea inconvenientes, como retraso en la brotación de los tallos, reducción del número de yemas brotadas (Viator *et al.*, 2009) y riesgo de incendios accidentales del cañaveral en etapa de crecimiento; por ello, es recomendable retirar parte de la paja para aprovecharla como combustible, alimento de ganado o en otros usos (Figura 2), e incorporar al suelo la parte restante de residuos para conservar la materia orgánica y mantener la fertilidad (Hartemink, 2008).

En la cadena productiva de caña de azúcar, es necesario explorar y

se pesó en una balanza digital marca Owen, con capacidad de 300 kg, y se tomó una alícuota de 150 g que se deshidrató en una estufa de aire forzado a 70 °C hasta alcanzar peso constante, y con ello determinar el porcentaje de humedad y rendimiento de materia seca mediante la ecuación; $RP = [PP - (PP \cdot H)] \cdot 10$; donde: RP = Rendimiento de paja seca (t ha⁻¹); PP = Peso de paja del muestreo (kg m⁻²); H = Humedad (%) = (paja húmeda - paja seca) / paja húmeda * 100; 10 = Factor de conversión a t ha⁻¹. Los datos de campo se analizaron estadísticamente mediante ANOVA, bajo un diseño completamente al azar (DCA), donde cada parcela correspondió a un tratamiento con diez repeticiones

(Martínez, 1988), y los promedios resultantes por parcela se compararon con la prueba múltiple de Tukey ($\alpha = 0.05$).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de varianza no mostró diferencia significativa en el rendimiento de paja entre las plantaciones estudiadas (Cuadro 1). El rendimiento medio de paja (base seca) en la zona de abastecimiento fue de 18.2 t ha⁻¹, con un rango de 14.4 t ha⁻¹ a 22.3 t ha⁻¹; y coeficiente de variación de 42.8%, lo cual fue indicativo de alta variabilidad en los rendimientos por parcela (Figura 2). Los rendimientos anteriores fueron superiores a lo

Cuadro 1. Paja de caña de azúcar producida en parcelas de abasto del Ingenio Presidente Benito Juárez durante la zafra 2009-2010 en Tabasco, México.

Parcela	Localidad Coordenadas UTM Productor	Ciclo	Variedad	Subunidad de suelo	Paja seca (t ha ⁻¹)
01	Poblado C-31 452234.594-1987948.883 Ovidio Córdova Gamas	Planta	MEX 68-P23	VRst (Éutrico)	12.7 a
02	Poblado C- 31 451325.00- 1985765.00 Julio Mondragón Broca	Soca	MEX 69-290	VRst (Éutrico)	21.2 a
03	Poblado C- 31 451601.811-1987883.837 Gloria Sánchez Jiménez	Resoca 6	MEX 69-290	VRst (Éutrico)	22.3 a
04	Poblado C- 31 450523.736-1986762.660 Héctor Córdova Gamas	Resoca	MEX 69-290	VRst (Éutrico)	19.9 a
05	Poblado C- 32 445133.00- 1988851.00 Zenón López Salaya	Resoca 8	RD 75-11	CMfl (Éutrico Arcílico)	19.5 a
06	Poblado C-32 445248.237-1989607.457 Manuel Torres Córdova	Resoca 8	MEX68-P-23	VRglst (Éutrico)	21.5 a
07	Poblado C- 15 441238.450-2005992.061 Carlos García Jiménez	Resoca 4	MEX79-431	GLha (Éutrico Arcílico)	20.9 a
08	Poblado C-15 442335.00- 2005067.00 Rosario Yáñez Jiménez	Planta	MEX69-290	VRst (Éutrico)	14.4 a
09	Poblado C-14 428311.00- 2000272.00 Impulsora Agrícola	Resoca	MEX69-290	VRst (Éutrico)	19.4 a
10	Poblado C-14 429753.00- 2000261.00 Impulsora Agrícola	Resoca	MEX69-290	VRst (Éutrico)	18.9 a
11	Poblado C-15 438629.00- 2002781.00 Pedro García Acosta	Planta	MEX68-P23	VRglst (Éutrico)	16.6 a
12	Poblado C-15 434117.23- 1987702.44 Cesar Román de Dios	Resoca 2	MEX69-290	CMst (Arcílico Éutrico)	15.0 a
13	Poblado C-15 440027.519-2000394.800 Blas Moya Martínez	Resoca 3	MEX79-431	CMngst (Éutrico Férrico)	15.0 a
14	Poblado C-15 441026.929- 2001072.801 Blas Moya Martínez	Resoca 3	ITV	GLha (Éutrico Arcílico)	17.6 a
15	Poblado C-16 444165.00- 2000232.00 José A. Lendecky Zarate	Resoca 8	MEX68-P-23	CMng (Arcílico Éutrico)	17.7 a
Media (t ha ⁻¹)					18.2
CV (%)					42.8
Prob. de F. Trat.					0.16 NS
DMS (t ha ⁻¹)					12.0
Medias con la misma literal son iguales estadísticamente Tukey (Pffio.05); NS: No significativo VR:Vertisol, GL: Gleysol, CM:Cambisol, gl: Gléyico, fl: Fluvico, st: Estágnico, ha: Aplico, ng: Endogléyico					



Figura 2. Manejo y usos potenciales de la paja de caña de azúcar en el Ingenio Presidente Benito Juárez en Tabasco, México. A: Plantación de caña de azúcar bajo el sistema de “cosecha en verde” mecanizada. B: Quema de paja bajo el sistema de “cosecha en verde”. C: Incorporación de paja con multi-cultivador. D: Empacado de paja en pacas de 30 kg. E: Preparación de alimentos para bovinos a base de puntas de caña. F: Utilización de paja como combustible en las calderas del ingenio.

cuantificar diferentes usos y métodos para la recoleta de paja; uno de estos podría ser a través de la incorporación con multicultivador que permitiría aprovechar hasta 50% de la paja generada para mantener el reciclaje de nutrimentos y evitar la pérdida de fertilidad en los suelos (Lal, 2009), tal como hacen en otros países cañeros donde se practica la

cosecha mecanizada (Souza *et al.*, 2005), también usarla para alimentación de bovinos (Ortiz *et al.*, 2009; Ortiz *et al.*, 2012), ya que si se recolecta 50% de la paja producida, se obtendrían hasta 270 pacas de 30 kg a un precio medio de \$15.00 cada una, con lo cual el productor cañero obtendría \$ 4,050.00 adicionales por hectárea.

Se sugiere también evaluar su potencial energético, ya que la paja con 10% de humedad contiene 17 M joules kg^{-1} y su poder calórico es equivalente al del bagazo (Ripoli y Ripoli, 2007). En países como India y Brasil emplean tecnologías para que la cosecha de caña de azúcar sea integral, ya que se separa la paja del tallo y se almacena para posteriormente

mezclarla con el bagazo y quemarse en las calderas que generan vapor y producen energía eléctrica (Oliveiro, 2010). Pruebas realizadas en el Ingenio Santa Clara mostraron que 3.5 t de paja tienen el mismo poder calórico que 1.0 t de combustóleo, significando un ahorro de \$900.00, lo que muestra una opción para reducir el uso de combustibles fósiles (CAÑAMEX, 2007). Otros usos pueden ser a través de la pirolisis con lo cual es posible generar 1 Mwh de electricidad por cada 2 t de paja seca y recuperar 31% en forma de biochar (Quirk *et al.*, 2012); resaltando que el carbono en el biochar es estable y al usarlo como mejorador del suelo resulta también en un secuestrador de carbono de la atmósfera, además de poder usarla para elaborar papel rústico (Garnica *et al.*, 2007).

CONCLUSIONES

Aun cuando no existieron diferencias estadísticas en la producción de paja entre variedades, el rendimiento promedio del sistema de “cosecha en verde” de la caña de azúcar cultivada en el Ingenio Presidente Benito Juárez, genera 18.2 t ha⁻¹ de paja seca en promedio, susceptibles de ser usadas en diferentes subproductos.

LITERATURA CITADA

- CAÑAMEX. 2007. Aprovechamiento y rentabilidad de los residuos de cosecha de la caña de azúcar. Cañaverales Mexicanos SPR de RL de CV-Ingenio Santa Clara SA de CV. Informe Técnico 20 p.
- Garnica G.M.J., Arias R.M., Martín, R.A., Sanz M.A. 2007. Fabricación manual de papel con fibras vegetales. Revista Digital Practica Docente, 7:369-380.
- Hartemink E.A. 2008. *Sugarcane for Bioethanol: Soil and Environmental Issues*. Advances in Agronomy 99:127-172.
- Lal R. 2009. Soil quality impacts of residue removal for bioethanol production. Soil & Tillage Research. 102: 233-241.
- Loveland P., Webb J. 2003. *Is there a critical level of organic matter in the agricultural soils of temperate regions: a review?* Soil & Tillage Research 70 1-18.
- Martínez G.A. 1988. *Diseños experimentales: Métodos y Elementos de Teoría*. Trillas. México. 756 p.
- Naranjo F.J., Salgado G.S., Lagunes E.L.C., Carrillo A.E., Palma L.D.J. 2006. Changes in the soil fertility of fluvisols cultivated with sugarcane through the years. Soil & Tillage Research. 88:160-167.
- Oliveiro J.L., Carmo V.B., Gurgel M.A. 2010. The DSM-Dedini Sustainable Mill: a new concept in designing complete sugarcane mills. Proc. Int. Soc. Sugar Cane Technol. Veracruz, México. (27): 1-34 p.
- Ortiz L.H., Rössel K.D., Debernardi V.H., Rosas C.D. 2009. *Aprovechamiento forrajero de los residuos de la cosecha de la caña de azúcar*. Parte II. Maquinaria para procesar el residuo de la caña de azúcar. El Agropecuario-vocero de nuestro campo www.elagropecuario.com. p 244 - 248.
- Ortiz L.H., Salgado G.S., Castelán E.M., Córdova S.S. 2012. Perspectivas de la cosecha de la caña de azúcar cruda en México. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas Pub. Esp. Núm. 4: 767-773.
- Quirk R.G., Zwieten L.V., Kimber S., Downie A., Morris S., Rust J. 2012. Utilization of Biochar in Sugarcane and Sugar-Industry Management. Sugar Tech 14:321-326.
- Ripoli, C.T.C., Ripoli, C.M.L. 2007. *Biomassa de cana-de-açúcar: colheita, energia e ambiente*. Segunda edición ampliada. Edição dos Autores. Piracicaba, SP. Brasil. 310 p.
- Salgado G.S., Palma L.D.J., Zavala C.J., Lagunes E.L.C., Castelán E.M., Ortiz G.C.F., Juárez L.J.F., Ruiz R.O., Armida A.L., Rincón R.J.A. 2009. Sistema integrado para recomendar dosis de fertilizantes en caña de azúcar (SIRDF): Ingenio Presidente Benito Juárez. Colegio de Postgraduados, Campus Tabasco. H. Cárdenas, Tabasco, México. 84 p.
- Souza M.Z., Prado M.R., Paixão S.A.C., Cesarin L.G. 2005. *Sistemas de colheita e manejo da palhada de cana-de-açúcar*. Pesq. agropec. bras., Brasília 40: 271-278.
- Viator R.P., Johnson R.M., Boykin D.L., Richard E.P. 2009. *Sugarcane Postharvest Residue Management in a Temperate Climate*. Crop Sci. 49:1-6.

Nuevas directrices en mejoramiento genético de CAÑA DE AZÚCAR (*Saccharum* spp.)

Senties-Herrera, H.E¹; Gómez-Merino, F.C.^{1*}

¹Colegio de Postgraduados Campus Córdoba, Carretera Córdoba-Veracruz km 348. Congregación Manuel León, Amatlán de los Reyes, Veracruz, México. C.P. 94961.

*Autor responsable: fernandg@colpos.mx

RESUMEN

La caña de azúcar es un cultivo de gran importancia para México y actualmente enfrenta serios desafíos que hacen necesaria la búsqueda de alternativas que hagan más eficiente el sistema de producción. Dentro de las propuestas aquí planteadas resaltan la necesidad de ampliar la base genética, aplicar el cultivo *in vitro* en los procesos de selección, generar modelos estadísticos multivariados que permitan evaluar la interacción genotipo por ambiente y desarrollar biotecnologías tendientes a aplicar los avances más recientes sobre el genoma de este cultivo.

Palabras clave: Innovación, genómica, biotecnología, cruzamientos, análisis multivariado

INTRODUCCIÓN

La caña de azúcar (*Saccharum* spp.) es un cultivo que se produce en más de 130 países y territorios, sobresaliendo Brasil (30% de la producción), La India (21%), China (7%), Tailandia (4%), Pakistán (4%), México (3.5%), Colombia (3%), Australia (3%), Estados Unidos de América (2%) e Indonesia (2%) (FAOSTAT, 2013). A nivel global la capacidad productiva de este cultivo oscila de 40 a 150 t ha⁻¹ de caña en fresco y de 3.5 a 15 t ha⁻¹ de azúcar en fábrica. Con 55 ingenios en operación en 2013, la producción de caña de azúcar en México se desarrolla en 15 entidades federativas, 227 municipios y la superficie cultivada es de alrededor de 800 mil hectáreas (CNPR, 2014). Según proyecciones oficiales, la actual superficie cultivada podría crecer a cerca de 5 millones

de hectáreas (SIAZUCAR, 2009). Dada esta potencial capacidad de expandir la superficie cañera, es necesario desarrollar una planeación del destino de la materia prima. La mayor potencialidad para expandir esta superficie se encuentra en los estados de Chiapas, Jalisco, Morelos y Puebla, en tanto que habría que replantear la operación de los ingenios que se ubican en las entidades de Campeche, San Luis Potosí y Tabasco, debido a su menor productividad, asociada a limitantes de índole técnico-agronómico, ambiental y socioeconómico (Senties-Herrera, 2013). Es de destacar que las ganancias relativas observadas en los últimos años han sido debidas a factores relacionados con subsidios gubernamentales (8% del total de subsidios a la agricultura nacional), y a algunos esfuerzos recientes por incrementar su productividad a través de apoyos en capacitación, digitalización y sistematización de procesos, y modernización del sistema productivo tanto en campo como en fábrica. Sin embargo, no ha habido una estrategia integral nacional para afrontar estos desafíos y aprovechar las oportunidades que ofrece el sector. Uno de los cimientos más sólidos para esta encomienda es la reactivación del programa de mejoramiento genético a escala nacional, por lo que en esta contribución se abordan algunas directrices importantes como propuesta para innovar el sistema de producción de caña de azúcar de manera más eficiente.

El programa de mejoramiento genético de caña de azúcar en México

En México el mejoramiento genético de caña de azúcar se realiza en la estación de Hibridación en Rosario Izapa, Chiapas, a través del uso de semilla sexual. Los trabajos de hibridación en los últimos 60 años han permitido la liberación de más de 150 variedades mexicanas, que ocupan un 55% de la

superficie sembrada del país; el 45% restante se encuentra sembrado con variedades extranjeras, gracias al Programa de Intercambio e Importación de Variedades que mantiene la Cámara Nacional de las Industrias Alcohólica y Azucarera (CIDCA, 2013) (Figura 1).



Figura 1. Banco de germoplasma del Centro de Investigación y Desarrollo de la Caña de Azúcar (CIDCA).

En la Figura 2 se muestra la distribución porcentual de las principales variedades de caña de azúcar de México en 2012, a partir del Manual Azucarero Mexicano 2013. Se observa que las variedades predominantes son CP 72-2086, Mex 69-290 y Mex 79-431, las cuales conjuntan el 74% de la superficie sembrada.

Recientemente, Senties-Herrera (2013) determinó que en 1980 alrededor del 70% de la producción de azúcar se sustentaba en nueve variedades, y para 2012 este número se redujo a tan solo tres genotipos. Durante el periodo de análisis (1980-2012), las variedades B 4362, L 60-14, Mex 55-32, Mex 57-473, NCo 310, Co 997 y Mex 68-P-23 presentaron reducción en la superficie de cultivo, mientras que CP 72-2086, Mex 69-290 y Mex 79-431 la incrementaron.

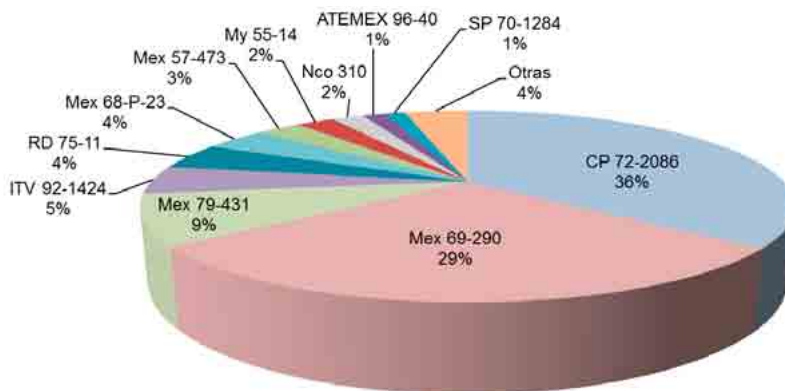


Figura 2. Distribución porcentual de las principales variedades cultivadas en las regiones cañeras de México (zafra 2011-2012) (Manual Azucarero Mexicano, 2013).

Si bien los rendimientos que se han obtenido con el esquema tradicional de mejoramiento genético han aumentado, el crecimiento anual ha sido de tan solo 0.4%. Comparativamente con Brasil, los incrementos anuales han sido de 1.5% (Waclawovsky *et al.*, 2010), lo que indica que las ganancias observadas en México aún son precarias. Para lograr avances sustanciales en la generación de nuevas variedades de caña de azúcar (Figura 3) que impacten de manera significativa el sistema de producción, es necesario implementar diferentes estrategias de innovación (cambio basado en el conocimiento que genera valor) a través del uso de nuevas tecnologías adaptadas a las condiciones propias en cada ambiente productivo de caña, teniendo en cuenta la sustentabilidad del sistema. Aplicaciones biotecnológicas como el cultivo *in vitro* de plantas para la propagación de materiales libres de enfermedades, y de alta calidad, uso de modelos estadísticos multivariados para la evaluación y selección de híbridos de nuevas generaciones, y avances en el conocimiento del genoma del género *Saccharum*, son algunos de los enfoques que se abordan.



Figura 3. Variedades con alto potencial productivo desarrolladas en el Colegio de Postgraduados (COLPOSCTMEX 05-204). (Foto: M. C. Héctor Emmanuel Senties Herrera).

Modelos de interacción genotipo ambiente en las fases avanzadas de selección en caña de azúcar

La Interacción Genotipo Ambiente (IGA) tiene un efecto diferencial directo sobre los genotipos en su estabilidad y adaptabilidad a diferentes condiciones ambientales y en la expresión final del fenotipo. El fenotipo de un cultivo está determinado por su genotipo (G), el ambiente (A), y la interacción entre éstos (IGA), lo que define la variación existente y permite identificar materiales estables o mejor adaptados. El programa de selección de variedades de caña de azúcar de México, aún no cuenta con un modelo para evaluar la IGA en los cultivares actuales y nuevos. Dentro de la metodología vigente desarrollada por el Instituto para el Mejoramiento de la Producción de Azúcar (IMPA, 1983), existe una fase definida como Prueba de Adaptabilidad, en la cual un mismo material es evaluado empíricamente en diferentes ambientes, sin un control estadístico experimental riguroso, y aquel material seleccionado en esta fase, se establecerá en Evaluación Agroindustrial bajo un diseño experimental que no considera la IGA.

Recientemente, Rodríguez-Gross *et al.* (2012), probaron diferentes métodos estadísticos multivariados como el análisis de coordenadas principales (PCO); modelo de efectos principales aditivos e interacción multiplicativa (AMMI); y análisis de regresión de sitios (GGE) en caña de azúcar, y reportaron que los métodos AMMI y GGE son los más adecuados para la evaluación de la IGA. Rea y De Sousa-Vieira (2002) determinaron la magnitud de la IGA y la estabilidad fenotípica de caña de azúcar mediante el uso del coeficiente de regresión, la desviación de la regresión y el coeficiente de variabilidad, tomando en cuenta diferentes localidades, fechas de cosecha y su influencia en las variables de rendimiento, mostrando que el análisis de la estabilidad fenotípica puede contribuir con información importante sobre el comportamiento de nuevas selecciones de caña de azúcar antes de la liberación como cultivares prometedores e incrementar la eficiencia en los programas de mejoramiento genético del cultivo.

El desarrollo de variedades mejoradas de caña de azúcar estará condicionado al ambiente de selección elegido, y para los propósitos específicos determinados por la magnitud o influencia de la IGA, lo que requiere dividir grandes áreas geográficas en pequeñas superficies delimitadas por el ambiente, permitiendo que la selección y caracteres de discriminación entre lo deseado y lo no deseado sea de acuerdo a los objetivos específicos planteados, siempre en relación a la capacidad de adaptación y comportamiento de los materiales (genotipos) en diferentes ambientes

(GxA), a través de años (GxY) y la combinación de ambientes y años (GxAxY), para su mejor distribución en las áreas de producción cañera en México. Esta estrategia será esencial cuando se planea incrementar la superficie de caña para aprovechar las cerca de 5 millones de hectáreas con potencial para este cultivo.

Evaluación de caracteres morfológicos estables en diferentes años

Entre los caracteres que describen a una nueva variedad destacan los industriales, agronómicos y en especial los morfológicos, ya que estos últimos son los que ayudan a identificar fenotípicamente a las nuevas variedades de caña de azúcar una vez liberadas a nivel comercial. Dentro del programa de selección de variedades, es en la fase Evaluación Agroindustrial cuando se realiza dicha descripción, la cual se lleva a cabo

en el último año del proceso, próximo a la liberación comercial (Flores, 2001). Debido a la IGA, muchos de los caracteres morfológicos presenta modificaciones de un año a otro (no son estables), los cuales no son evaluados posteriormente en dicho programa. Para dicho proceso se deben

tomar en cuenta todos aquellos caracteres que sean útiles para la descripción varietal de acuerdo a lo especificado por la Unión Internacional para la Protección de Nuevas Variedades de Plantas (UPOV, 2010). Por tal motivo, dichos caracteres deberán ser evaluados en diferentes años (por lo menos dos años) en las mismas condiciones, para determinar su estabilidad y poder así describir la mayor parte de la variabilidad total existente en un número reducido de dimensiones (caracteres), utilizando métodos de análisis multivariante (González-Andrés y Pita-Villamil, 2001). Entre los principales caracteres que se utilizan actualmente para la distinción, homogeneidad y la estabilidad de variedades destaca el entrenudo, la yema y hojas (Figuras 4, 5 y 6) (Fotos M. C. Héctor Emmanuel Senties-Herrera).

Cultivo *in vitro* para las fases de selección

El cultivo *in vitro* permite reducir los tiempos de obtención

de semilla y usar eficientemente la superficie destinada al establecimiento de las fases dentro del programa de evaluación y selección de variedades de caña de azúcar, además de garantizar la sanidad, identidad genética y vigor de las plántulas. Se ha demostrado que el efecto combinado del saneamiento y el rejuvenecimiento *in vitro* puede incrementar los rendimientos en contenido de azúcar por área en el orden de 10% a 15% (Pérez-Ponce *et al.*, 2000). Alternativamente, la técnica permite tener duplicados seguros de los diferentes genotipos y servir entonces para la conservación de germoplasmas en el corto plazo (menos de un año); adicionalmente se pueden optar por el crecimiento mínimo y la crioconservación para periodos más prolongados. A través del cultivo *in vitro* es posible obtener de grandes poblaciones en poco tiempo y espacio. En las fases del programa de evaluación y selección de

caña de azúcar actual, existen tres multiplicaciones anidadas a tres fases: Parcela, Prueba de Adaptabilidad y Evaluación Agroindustrial, denominadas multiplicación I, II y III, respectivamente (IMPA, 1983). Durante el proceso de evaluación en estas tres fases es posible inferir el comportamiento

de los híbridos desde etapas tempranas, y colocarlos como sobresalientes, momento en que se pueden realizar las multiplicaciones *in vitro* de estos materiales. Sin embargo, debido a la falta de un análisis estadístico riguroso en estas fases, dichos materiales no puedan pasar a las fases subsecuentes, lo que implica mayores gastos y periodos más largos de selección. El cultivo *in vitro* también permite compartir materiales entre centros de investigación que contribuyen a la selección de los híbridos en otros ambientes, lo que garantiza la pureza genética y sanidad, además de abaratar los costos de envío del material en comparación con la forma convencional (dos estacas con tres yemas viables), con lo cual en muchos de los casos no se logra establecer la variedad o se cuenta con apenas una sola planta para su establecimiento. Este método de multiplicación, permite hacer evaluación a factores bióticos y abióticos, pudiendo acortar los tiempos de selección



Figura 4. Diferencias de entrenudos entre distintas variedades de caña de azúcar.



Figura 5. Diferencias en tipos de yemas entre distintas variedades de caña de azúcar.

y liberar más variedades para cubrir la demanda del sector (Snyman *et al.*, 2011).

A través del cultivo *in vitro* es posible generar variación somaclonal en caña de azúcar, proceso ventajoso dado que permite generar variabilidad en un cultivo con una estrecha base genética, pero a la vez es desventajoso, debido a que una variedad ya liberada puede cambiar como consecuencia de esta variación. La experiencia indi-

ca que en caña de azúcar se recomienda no más de diez ciclos de cultivo *in vitro* a fin de reducir o evitar la variación somaclonal (Caamal-Velázquez y Bello-Bello, 2014).

Biotecnología en la producción de caña de azúcar en México

El desarrollo de tecnologías para la producción de caña de azúcar transgénica podría ser una alternativa para incrementar la productividad de la caña de azúcar en México (Figura 7).

La manipulación de genes en caña ha tenido importantes progresos, y a nivel experimental se ha avanzado en el desarrollo de resistencia al ataque de insectos, inmunidad a enfermedades, tolerancia a factores adversos como sequía, heladas, anoxia e hipoxia (Stepanova *et al.*, 2002; Filippone *et al.*, 2010; Srivastava *et al.*, 2012; Thiebaut *et al.*, 2012; Dedemo *et al.*, 2013). Además de los proyectos tendientes a elevar la síntesis de sacarosa, bioetanol y la producción



Figura 6. Diferencias en tipos de hojas entre distintas variedades de caña de azúcar.



Figura 7. Extracción de DNA genómico de caña de azúcar para diversos estudios en biotecnología. (Foto: M. C. Héctor Emmanuel Senties Herrera).

de biomasa *per se*, los nuevos enfoques visualizan a este cultivo como una de las biofábricas innovadoras del futuro, principalmente para la producción de bioplásticos, proteínas de uso farmacológico y azúcares (Waclawovsky *et al.*, 2010; Aguilar-Rivera *et al.*, 2012; Gómez-Merino *et al.*, 2014).

La posibilidad de producir cultivares de caña de azúcar transgénica es una decisión estratégica para México, y es determinante implementar tecnologías seguras e iniciativas de información a la sociedad sobre los desafíos y las oportunidades que ofrecen los cultivos biotecnológicos. Debido a su destacada capacidad para convertir la energía lumínica en carbohidratos y su habilidad para acumular sacarosa en sus tallos, además de su fácil cultivo, la caña de azúcar representa una de las plantas más interesantes para la producción agroalimentaria. Se estima que el rendimiento potencial de este cultivo puede alcanzar las 800 t ha^{-1} y si se considera que el rendimiento promedio mundial es cercano a las 80 t ha^{-1} , es de esperar que hay posibilidad de incrementar tales rendimientos promedios, y una de las herramientas para ello es la biotecnología (Yadav *et al.*, 2010). En años recientes, los esfuerzos por mejorar los rendimientos en caña de azúcar se han basado precisamente en desarrollos biotecnológicos. Sin

embargo, aún se carece de esquemas eficientes para su aplicación en campo, y las iniciativas para caracterizar etiquetas de secuencias expresadas (EST) han tenido poco impacto en los programas de mejoramiento (Dal-Bianco *et al.*, 2012). Además, los modelos que actualmente se usan por los mejoradores han sido desarrollados a partir de organismos diploides, mismos que no son adecuados para organismos poliploides como la caña de azúcar. Debido al deterioro del ambiente y los recursos genéticos y naturales, además de los efectos del cambio climático global, los rendimientos de este cultivo han ido a la baja. La contribución de alelos múltiples a caracteres complejos como el rendimiento es un aspecto clave que yace en la base de los esfuerzos de mejoramiento y que requiere de herramientas específicas para este cultivo (Birch, 2013). Los progresos en genómica funcional han permitido avances en el estudio de expresión génica asociada a funciones biológicas. Además, el proyecto de secuenciación del genoma completo de este cultivo que se está conduciendo actualmente a través de un consorcio internacional, puede contribuir a la resolución de muchas preguntas respecto a los proyectos de mejoramiento genético de esta especie. Tanto los enfoques de ingeniería genética como el mejoramiento genético asistido por marcadores moleculares permitirá incrementar rendimientos, además de mejorar la tolerancia a factores tanto bióticos como abióticos, y ofrecer también nuevos productos que contribuyan a diversificar esta cadena de valor (Dal-Bianco *et al.*, 2012).

Una ventana que ofrece grandes posibilidades es la interface Integrated Breeding Platform (<https://www.integratedbreeding.net/es>), la cual proporciona herramientas y servicios en las diferentes etapas del mejoramiento genético, sirviendo de apoyo en la planeación, establecimiento de ensayos y manejo, toma de datos genotípicos y análisis de éstos, además de la toma de decisiones en un programa de mejoramiento genético integrado. Si bien esta plataforma está diseñada para otros cultivos, se puede comenzar a desarrollar lo aplicable a caña de azúcar y aprovechar los avances logrados a la fecha. Por ejemplo, parte esencial de la interface está desarrollada con base en trigo, especie que posee un genoma complejo al igual que la caña de azúcar, razón por la que se podrían extrapolar resultados de una especie hacia la otra.

CONCLUSIONES

Derivado de problemas técnicos, agronómicos, ambientales y socioeconómicos, el sistema de producción de caña de azúcar en México está frente a serios desafíos que obligan

a buscar alternativas ingeniosas para convertir al sector en una palanca del desarrollo, basado en la eficiencia en el uso de los recursos. Las alternativas aquí planteadas tienen que ver principalmente con la producción de la materia prima, que dan un soporte científico a algunas acciones que se llevan a cabo de manera empírica o que no se encuentran en etapas primarias de desarrollo o aplicación, como serían los modelos estadísticos multivariados, el cultivo *in vitro* a escala comercial y la transformación genética. Sería muy recomendable analizar también lo referente a los procesos de transformación en fábrica y hacer los planteamientos de mejoras correspondientes.

LITERATURA CITADA

- Aguilar-Rivera N., Rodríguez D.A., Castillo-Morán, A., y Herrera-Solano, A. 2012. Sucroquímica, alternativa de diversificación de la agroindustria de la caña de azúcar. *Multiciencias* 12: 7-15.
- Caamal-Velázquez H. y Bello-Bello J. J. 2014. Micropropagación de caña de azúcar (*Saccharum* spp.). Colegio de Posgraduados. Champotón, Campeche, México. 23 p
- Birch R.G. 2013. Sugarcane Biotechnology: Axenic Culture, Gene Transfer, and Transgene Expression. *In: Moore P.H. and Botha F.C. (Eds.), Sugarcane: Physiology, Biochemistry & Functional Biology.* WILEY Blackwell. pp. 645-673
- CIDCA. 2013. Centro de Investigación y Desarrollo de la Caña de Azúcar (CIDCA): <http://www.camaraazucarera.org.mx/cidca.asp>
- CNPR. 2014. Estadísticas de la Agroindustria de la Caña de Azúcar 2004/2013. Confederación Nacional de Productores Rurales. Unión Nacional de Cañeros: http://www.caneros.org.mx/site_caneros/estadisticas/nacional.pdf
- Dal-Bianco M., Sampaio-Carneiro M., Takeshi-Hotta C., Giacomini-Chapola L., Hoffmann, H.P., Franco-García A.A., Mendes-Souza G. 2012. Sugarcane improvement: how far can we go? *Curr. Opin. Biotechnol.* 23: 265-270
- Dedemo G.C., Rodrigues F.A., Roberto P.G., Neto C.B., Franca S.C., Zingaretti S.M. 2013. Osmoprotection in sugarcane under water deficit conditions. *Plant Stress* 7: [http://www.globalsciencebooks.info/JournalsSup/images/Sample/PS_7\(1\)1-70.pdf](http://www.globalsciencebooks.info/JournalsSup/images/Sample/PS_7(1)1-70.pdf)
- FAOSTAT. 2013. Sugarcane production. Food and Agriculture Organization. Rome, Italy: <http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>
- Filippone M.P., Perera M.F., Salgado M., García M.G., Vellicce G.R., Castagnaro A.P. 2010. Diagnóstico molecular de enfermedades sistémicas de la caña de azúcar en la Argentina: ajuste metodológico y aplicaciones. *Rev. Ind. Agric. Tucumán* 87: 01-11
- Flores-Cáceres S. 2001. Las variedades de caña de azúcar en México. *ATAM, México, D. F.* 308 p
- Gómez-Merino F.C., Trejo-Téllez L.I., Senties-Herrera H.E. 2014. Sugarcane as a novel biofactory: potentialities and challenges. *In: Torres-Pacheco I. and Guevara R. (Eds.), Biosystems Engineering: Biofactories for Food Production in Century XXI.* Springer, Heidelberg, Germany. pp. 129-149
- González-Andrés F. and Pita-Villamil J.M. 2001. Conservación y Caracterización de Recursos Fitogenéticos. *MundiPrensa, Madrid, España.* 279 p
- IMPA. 1983. Programa de variedades. Objetivos, Importancia y Metodología Experimental. Instituto para el Mejoramiento de la Producción Azucarera-Cámara Nacional de la Industria Azucarera y Alcohólica, México, D. F. 63 p
- Manual Azucarero Mexicano. 2013. 56ª Edición. Compañía Editora del Manual Azucarero. México, D.F.
- Pérez-Ponce J.N., Suárez-Castellá M., Orellana-Pérez P. 2000. Posibilidades y potencial de la propagación masiva de plantas en Cuba. *Biología Vegetal* 1: 3-12
- Rea R., De Sousa-Vieira O. 2001. Interacción genotipo x ambiente y análisis de estabilidad en ensayos regionales de caña de azúcar en Venezuela. *Caña de Azúcar* 19: 3-15
- Rodríguez-Gross R., Pachades-Isaguirre Y., Bernal-Lizranza N., Jorge-Suárez H., García-Pérez H. 2012. Métodos estadísticos multivariados en el estudio de la interacción genotipo ambiente en la caña de azúcar. *Ciencia en su PC.* 1: 47-60
- Senties-Herrera H.E. 2013. Variabilidad genética y caracterización de variedades de caña de azúcar (*Saccharum* spp.). Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados, México. 142 p
- SIAZUCAR. 2009. Sistema Nacional de Información de la Industria Azucarera. Convención Nacional de Geografía 2009. <http://mapserver.inegi.org.mx/geografia/espanol/eventos/cng2009/memoria/cng2009/20091019%20siazucar%20para%20cng%20julio%20c-rivera.pps>
- Snyman S.J., Meyer G.M., Koch A.C., Banasiak M., Watt M.P. 2011. Applications of *in vitro* culture systems for commercial sugarcane production and improvement. *In Vitro Cell. Dev. Biol. Plant* 47: 234-249
- Srivastava M.K., Li C.N., Li Y.R. 2012. Development of sequence characterized amplified region (SCAR) marker for identifying drought tolerant sugarcane genotypes. *Austr. J. Crop Sci.* 6: 762-767
- Stepanova A.Y., Polyakova L.I., Dolgikh Y.I., Vartapetian B.B. 2002. The response of Sugarcane (*Saccharum officinarum*) cultured cells to anoxia and the selection of a tolerant cell line. *Rus. J. Plant Physiol.* 49: 406-412
- Thiebaut F., Rojas C.A., Almeida K.L., Grativol C., Domiciano G.C., Lamb C.R., Engler J.de A., Hermerly A.S., Ferreira P.C. 2012. Regulation of miR319 during cold stress in sugarcane. *Plant Cell Environ.* 35: 502-512
- UPOV. 2010. Notas explicativas sobre la definición de variedad con arreglo al acta de 1991 del convenio de la UPOV: http://www.upov.int/edocs/expndocs/es/upov_exn_var_1.pdf
- Waclawovsky A.J., Sato P.M., Lembke C.G., Moore P.H., Souza G.M. 2010. Sugarcane for bioenergy production: an assessment of yield and regulation of sucrose content. *Plant Biotechnol. J.* 8: 263-276
- Yadav D.V., Jain R., Rai R.K., 2010. Impact of Heavy Metals on Sugarcane. *In: I. Sherameti and A. Varma (Eds.), Soil Heavy Metals-Soil Biology.* pp. 339-367

Aplicaciones del cultivo de tejidos vegetales en

CAÑA (*Saccharum spp.*) DE AZÚCAR

Castañeda-Castro, O.¹; Gómez-Merino, F.C.^{1*}; Trejo-Téllez, L.I.²; Morales-Ramos, V.¹; González-Arno, M.T.³; Martínez-Ocampo, Y.M.⁴; Gámez-Pastrana, R.⁴; Pastelín-Solano M.C.³

¹Colegio de Postgraduados, *Campus* Córdoba. Carretera Córdoba-Veracruz km 348, Congregación Manuel León, Amatlán de los Reyes, Veracruz. C.P. 94946. ²Colegio de Postgraduados, *Campus* Montecillo. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo, Texcoco, Estado de México. C.P. 56230. ³Universidad Veracruzana, Facultad de Ciencias Químicas. Prolongación de Oriente 6 No. 1009, Orizaba, Veracruz. C.P. 94340. ⁴Universidad Veracruzana. Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias. Universidad Veracruzana. Camino Peñuela-Amatlán s/n, Peñuela, Amatlán de los Reyes, Veracruz. C.P. 94945.

*Autor responsable: fernandg@colpos.mx

RESUMEN

El mejoramiento genético de la caña de azúcar es determinante para desarrollar variedades resistentes a factores bióticos y abióticos y para incrementar los rendimientos en biomasa y sacarosa; sin embargo, dicho proceso se ve restringido debido al tiempo de liberación de una variedad que puede ser superior a 12 años. Una alternativa para reducir el plazo es el Cultivo de Tejidos Vegetales (CTV), debido al potencial de cada célula vegetal para regenerar una planta completa. La micropropagación o propagación *in vitro* es una de las aplicaciones del CTV que permite una producción masiva en menor espacio y contribuye a acelerar los procesos de selección dentro de los programas de mejoramiento genético. Para la regeneración *in vitro* de plantas de caña de azúcar se ha utilizado el cultivo de protoplastos, células, callos, tejidos y órganos diversos; sin embargo, muchos de los protocolos establecidos presentan baja reproducibilidad debido al genotipo, vía de regeneración, condiciones del explante y ambiente. En este artículo se revisan avances sobre el cultivo *in vitro* en caña de azúcar y se analiza la perspectiva de esta técnica para su uso con fines agrícolas.

Palabras clave: Biotecnología, mejoramiento, propagación, vitroplantas.



INTRODUCCIÓN

Uno de los retos que enfrenta la agroindustria de la caña de

azúcar (*Saccharum* spp.) para ser más competitiva es aumentar su productividad y disminuir costos de producción, por lo cual es necesario introducir adelantos científicos y tecnológicos en todos los eslabones de la cadena de valor. A través del cultivo *in vitro*, la biotecnología permite producir plantas con pureza genética y calidad fitosanitaria que aseguran mayor amacollamiento en campo. La mayor parte de las variedades comerciales actuales de caña de azúcar son híbridos interespecíficos de *Saccharum officinarum* y *S. spontaneum* generados hace poco más de 100 años. La progenie obtenida de las primeras cruces fueron retrocruzadas con *S. officinarum* (cañas nobles) y, debido a que este proceso de nobilitación implicó una transición asimétrica de cromosomas, los híbridos actuales son organismos poliploides (poseen hasta 200 pares de cromosomas) con genomas complejos, pero con una base genética restringida (poca variabilidad). Como consecuencia de esta complejidad, los procesos de mejoramiento genético son tardados y puede tomar 12 años o más para liberar una nueva variedad comercial. A pesar de esta limitante, los productores de caña requieren programas de mejoramiento genético extensivos a fin de lograr genotipos mejorados que se adapten a sitios específicos de cultivo. Por ello, las técnicas *in vitro* para la micropropagación masiva de plantas sanas a través de procesos de organogénesis o embriogénesis somática resultan determinantes para el establecimiento de programas de mejoramiento y producción masiva de semilla certificada.

Desde los estudios pioneros sobre inducción de callos llevados a cabo en Hawaii (EUA) en la década de 1960, el cultivo de células y tejidos de caña de azúcar se ha constituido como una herramienta muy valiosa para llevar a cabo diversas investigaciones y escalar la producción de plántulas a nivel comercial. Estos hallazgos condujeron al desarrollo de estrategias de aplicación de tecnologías, tales como micropropagación, desarrollo de nuevas variedades, conservación de germoplasma, eliminación de patógenos sistémicos y la ingeniería genética; parte importante de estos protocolos son los medios de cultivo que se usan (Figura 1).

Medios para el cultivo *in vitro* de la caña de azúcar

Los medios de cultivo más usados en caña de azúcar son los de Murashige



Figura 1. Plántulas de caña de azúcar (*Saccharum* spp.) micropropagadas en medio de cultivo MS. A: Plántulas de la variedad Mex 69-290 en fase III de la micropropagación. B: Vitroplantas de la variedad ITV 92-1424. C: Vitroplantas de caña de azúcar de la variedad CP 72-2086.

Cuadro 1. Composición de los medios de cultivo Murashige y Skoog (1962) y White (1963), modificados para la multiplicación *in vitro* de la caña de azúcar.

Medio MS (1962)		Medio White (1963)	
Componente	Concentración en el medio (mg L ⁻¹)	Componente	Concentración en el medio (mg L ⁻¹)
NH ₄ NO ₃	1,650.000	Ca(NO ₃) ₂ •4H ₂ O	200.00
KNO ₃	1,900.000	MgSO ₄ •7H ₂ O	360.00
CaCl ₂ •2H ₂ O	440.000	KCl	65.00
KH ₂ PO ₄	170.000	KNO ₃	80.00
MgSO ₄ •7H ₂ O	370.000	Na ₂ SO ₄	200.00
H ₃ BO ₃	6.200	H ₃ BO ₃	1.50
CoCl ₂ •6H ₂ O	0.025	MnSO ₄ •4H ₂ O	5.00
CuSO ₄ •5H ₂ O	0.025	KI	0.75
KI	0.830	Na ₂ H ₂ PO ₄ •H ₂ O	16.40
MnSO ₄ •4H ₂ O	22.300	ZnSO ₄ •7H ₂ O	3.00
Na ₂ MoO ₄ •2H ₂ O	0.250	FeNa EDTA	25.00
ZnSO ₄ •7H ₂ O	8.600	Ácido nicotínico	0.50
FeNa EDTA	50.000	Piridoxina	0.50
Mio-Inositol	100.000	Tiamina HCl	0.10
Tiamina-HCl	40.000	Glicina	3.0
Cinetina	1.000	Sacarosa	20,000.00
Ácido 3 indolacético	0.0650		
Bencil aminopurina	0.300		
Ácido cítrico	150.000		
Ácido ascórbico	50.000		
Sacarosa	20,000.000		
Piridoxina	10.000		
Ácido nicotínico	5.000		
Glicina	30.000		
Biotina	10.000		
Arginina	5.000		

y Skoog (1962) y el de White (1963). Aunque a diferentes niveles, ambos medios contienen los nutrimentos esenciales (N, P, K, S, Ca, Mg, Fe, Na, Cl, Mn, Zn, B, Cu y Mo), reguladores de crecimiento vegetal (auxinas y citocininas), vitaminas (tiamina, piridoxina, ácido nicotínico, glicina, biotina, arginina), inositol, fuente de carbono (sacarosa), antioxidantes (ácido ascórbico, ácido cítrico) y adsorbentes como el carbón activado (Cuadro 1).

El uso de explantes adecuados permite aprovechar los nutrimentos disponibles en el medio de cultivo al máximo. Por ello se recomienda utilizar ápices, ya que éstos contienen células con la capacidad de diferenciarse, presentan menos problemas de fenolización y están libres de contaminación. Por lo general, el medio MS sólido resulta mejor para la micropropagación de caña de azúcar

que el White, aunque en forma líquida ambos resultan favorables. Usando el medio MS, un adecuado balance entre auxinas y citocininas incrementa significativamente el número de brotes y el estado nutricional de las vitroplantas (Castañeda-Castro *et al.*, 2009). Una vez que el explante supera la etapa de iniciación, éste comienza a crecer y a producir brotes laterales, formando pequeñas cepas dentro de los frascos de cultivo, con lo que se inicia la etapa de multiplicación, en la cual se separan los nuevos brotes para ser trasladados al medio MS líquido. Los sub-cultivos deben realizarse cada dos a tres semanas, debido a que la caña crece muy rápido, lo que hace que el medio se agote. En caña de azúcar se recomiendan no más de 10 ciclos de cultivo *in vitro*, esto debido a que durante cada ciclo de cultivo pueden ocurrir variaciones somaclonales.

Morfogénesis *in vitro* de caña de azúcar

Aunque la caña de azúcar produce semilla botánica que es usada para los programas de mejoramiento en sus fases tempranas, la principal forma de reproducción en variedades comerciales es vegetativa a través de yemas nodales y rizomas. Dada la factibilidad de reproducción vegetativa, la micropropagación ofrece un método fácil y rápido para la producción de vitroplantas a gran escala, usando células y tejidos meristemáticos y no meristemáticos como explantes. Las plantas pueden ser regeneradas directamente a partir del explante (regeneración adventicia) o indirectamente a través de callos que se deriven de éste (regeneración *de novo*). En caña de azúcar es posible producir nuevas plantas a partir de regeneración directa, tanto de meristemas apicales como axilares, y también a partir de tejidos foliares inmaduros e inflorescencias. Como sucede en la mayoría de las especies, las plantas de caña reproducidas *in vitro* a partir de meristemas mantienen mayor pureza genética y son fenotípicamente más estables que las que se producen a partir de callos. Por tanto, cuando se quiere generar variación somaclonal, se recomienda usar el cultivo de callos tanto a partir de hojas inmaduras como de inflorescencias (Figura 2).

Organogénesis

La organogénesis directa involucra la regeneración de tallos a partir de meristemas apicales o cortes de hojas inmaduras, tras la exposición a por lo menos una citocinina (benciladenina y cinetina) y una auxina (ácido naftalenacético: ANA) a una alta relación citocinina/auxina. En seguida, se induce el enraizamiento con la aplicación de la auxina ácido indolbutírico o con la remoción de los reguladores del crecimiento del medio de cultivo y la adición de sacarosa. También es posible inducir organogénesis directa en

condiciones de iluminación constante, sólo en presencia de ácido naftalenacético o indirectamente por medio de regeneración *de novo*, a partir de callos que generen meristemas en respuesta a auxinas (para la formación de tallos) y citocininas (para la formación de raíces). El enraizamiento de los explantes se estimula al retirar las auxinas del medio, remover las hojas o exponer el cultivo a 15 °C, por cuatro a seis semanas. Las respuestas de los genotipos de caña pueden variar y en general es necesario optimizar los medios en cuanto a concentraciones y balance de reguladores de crecimiento.

Embriogénesis somática

La embriogénesis somática es, posiblemente, el método más usado para la propagación intensiva de plantas de caña de azúcar y se ha constituido como un componente determinante en los procesos de transformación genética. Los explantes usados provienen principalmente de tejidos foliares y pueden mantenerse por varios meses, sin que muestren pérdida de potencial de regeneración. La embriogénesis somática se induce en respuesta a auxinas, principalmente 2,4-D. Los embriones se desarrollan a partir de células jóvenes ricas en vacuolas y reservas de almidón. Como sucede en la organogénesis, la regeneración vegetal puede ocurrir sin la formación de callos, cuando los explantes se exponen a bajos niveles de 2,4-D, tidiazurón, ácido clorofenoxiacético y ANA. En la embriogénesis somática, los embriones son inducidos a partir de callos por medio de la aplicación de 2 a 4 mg L⁻¹ de 2,4-D. Una vez que se remueve la auxina, el embrión puede germinar sin la adición de otro regulador, aunque en algunas variedades el ANA y la cinetina inducen enraizamiento. Las aplicaciones comerciales de estas tecnologías ya son una realidad a través de sistemas de biorreactores de gran escala.



Figura 2. Adaptación exitosa de plantas de caña de azúcar (*Saccharum* spp.) micropropagadas en medio de cultivo MS. Previo a su siembra en campo, las plantas pasaron por periodos de aclimatación en invernadero.

Bancos de germoplasma y estabilidad genética

La conservación de los bancos de germoplasma es parte integral de los programas de mejoramiento en caña de azúcar. Los métodos actuales incluyen grandes colecciones en campo, en superficies considerables altamente demandantes de mano de obra y otros recursos. Además, estas colecciones son vulnerables a los desastres naturales y susceptibles al ataque de plagas y enfermedades. Los bancos de germoplasma *in vitro* son una alternativa que debe considerarse para la conservación de los recursos genéticos de caña de azúcar. Para ello, los meristemos apicales y axilares se mantienen en medio mínimo para el crecimiento entre 18 y 25 °C y transferencias a medios frescos, cada seis a 24 meses, dependiendo del genotipo, u optarse por la crio-conservación (González-Arno *et al.*, 2008).

Material libre de patógenos

El cultivo *in vitro* se ha usado para recuperar material de interés libre de patógenos en líneas infectadas. A través del cultivo de meristemas

es posible eliminar virus, bacterias y fitoplasmas (Snyman *et al.*, 2011).

Transformación genética

El cultivo *in vitro* juega un papel preponderante en los procesos de transformación genética. Junto con éste, los genotipos de caña de azúcar, tipos de explantes, agentes selectivos y cepas de *Agrobacterium* determinan la tasa de transformación genética. El cultivo de callos meristemáticos se ha usado tanto para enfoques biobalísticos como para los mediados por *Agrobacterium* (Scortecci *et al.*, 2012).

Variación somaclonal y nuevos caracteres

El cultivo de callos de caña de azúcar presenta una considerable variación de célula a célula y entre diferentes plántulas, debido principalmente a cambios en el cariotipo de los materiales generados. La variación somaclonal es enorme y ofrece una oportunidad para el mejoramiento genético, ya que afecta caracteres tanto morfológicos (altura de planta o el color de tallo) como fisiológicos (producción de biomasa, rendimiento de azúcar o porcentaje de fibra). La variación somaclonal también sirve para identificar y seleccionar células y clones de caña de azúcar tolerantes a salinidad y a sequía, y puede generar variación adicional a la que se origina a través de mutagénesis.

Mutagénesis *in vitro*

La mutación inducida se ha convertido en una herramienta de gran impacto en programas de mejoramiento que complementan las estrategias convencionales. La principal ventaja de ésta es su habilidad para cambiar uno o algunos caracteres de cultiva-

res sobresalientes, sin alterar todo el genotipo. Para generar mutagénesis en caña de azúcar se han usado rayos gama, etilmetanosulfonato, azida y nitrato de sodio (Snyman *et al.*, 2011).

Intercambio de materiales entre países

A fin de ampliar la base genética, los programas de mejoramiento que se implementan en todo el mundo recurren al intercambio de materiales entre países y los materiales que aún no se encuentran en fases avanzadas de selección y que, al llegar al país receptor, tienen que pasar por un largo periodo de cuarentena antes de llegar a los centros de mejoramiento. El cultivo *in vitro* ofrece una alternativa para reducir tiempos y costos.

Multiplicación de clones

Una vez que se produce un nuevo genotipo, éste se propaga vegetativamente a través de cortes de entrenudos para obtener poblaciones clonales. Aunque es un proceso relativamente simple, éste presenta las desventajas de baja tasa de multiplicación y posibilidad de transmitir enfermedades. La multiplicación está determinada por el número de yemas que emite cada corte de entrenudos, y la eficiencia de la propagación también puede estar afectada por la transferencia sistémica de patógenos. A través del cultivo *in vitro* se han mostrado incrementos sustantivos en la emisión de tallos, en rendimiento de azúcar y en vigor de las plantas.

Ventajas del cultivo *in vitro* en caña de azúcar

El cultivo *in vitro* de caña de azúcar permite obtener grandes cantidades de plantas, multiplicar variedades sobresalientes, integrar réplicas de bancos de germoplasma establecidos en campo, garantizar la sanidad de los clones y detectar oportunamente la



presencia, tolerancia o resistencia a diferentes tipos de factores bióticos y abióticos, además de facilitar introducción de nuevos genes a través de la ingeniería genética. Las plantas propagadas *in vitro* generalmente presentan un mayor crecimiento y vigor y producen semilla botánica de alta calidad. En comparación con la multiplicación nodal, el cultivo *in vitro* ha incrementado el número de tallos hasta en 25% (Digonzelli *et al.*, 2009) y el rendimiento de azúcar hasta en 15% (Pérez-Ponce *et al.*, 2000).

Los sistemas de inmersión temporal (SIT) permiten incrementos significativos del coeficiente de multiplicación y automatización en caña de azúcar (Figura 3). Los SIT disminuyen los costos de producción por mano de obra, ahorran energía, incrementan la eficiencia productiva del proceso de micropropagación, y al requerir menor espacio propician un aumento de las capacidades productivas en las denominadas biofábricas. La micropropagación automatizada a través de los SIT, tiene la posibilidad de producir grandes volúmenes de plantas y mayor facilidad del escalado, los brotes están siempre en contacto con el medio de cultivo y, por tanto, la absorción de los nutrientes y la tasa de crecimiento se ven estimulados. Estos sistemas están diseñados con un sistema computarizado que brinda las máximas oportunidades para el monitoreo y control de las condiciones microambientales (Cortegaza, 2013).

CONCLUSIONES

Actualmente existen grandes posibilidades de usos de la tecnología de cultivo *in vitro* en caña de azúcar. Aún no se aprovecha la totalidad de perspectivas que ofrece la variación somaclonal para producir nuevos caracteres y al propio cultivo *in vitro* para analizar la resistencia a factores bióticos y abióticos. El cultivo *in vitro* permite reducir la tasa de crecimiento de variedades que se conservan en bancos de germoplasma, aunque su uso potencial y el de las técnicas de crio-conservación aún no se aprovechan íntegra y eficientemente en México. La micropropagación a gran escala de variedades de interés y el uso de esta técnica para generar materiales libres de patógenos, son procesos que se han incorporado de manera eficiente en varios ingenios azucareros tanto en México como en el mundo.



Figura 3. Elementos que forman parte de un sistema de inmersión temporal en caña de azúcar (*Saccharum* spp.) micropropagadas en medio de cultivo MS.

AGRADECIMIENTOS

Al Fideicomiso Institucional y a la Línea Prioritaria de Investigación 5: Biotecnología microbiana, vegetal y animal del Colegio de Postgraduados, por los apoyos y las facilidades brindadas. Los autores también agradecen al Dr. Jericó J. Bello-Bello y al M. C. Roberto Loyo-Joachín por el material fotográfico facilitado.

LITERATURA CITADA

- Castañeda-Castro O., Gómez-Merino F.C., Trejo-Téllez L.I., Pastelín-Solano M.C., Martínez-Ocampo Y.M., González-Arno M.T., Guevara-Valencia M. 2009. Nutritional Status and Growth of Sugarcane Vitroplants in Response to Growth Regulators. *Terra latinoamericana*. 27:177-185.
- Cortegaza Á.L. 2013. Guía para la micropropagación *in vitro* de la caña de azúcar. Fundación Produce. Sinaloa. A. C. 39 p.
- Digonzelli, P. A., E. R. Romero, J. Scandaliaris, y J. Giardina. 2009. Comparación de la calidad de semilla de caña de azúcar en el segundo corte según el método de saneamiento. *Revista Industrial y Agrícola de Tucumán* 86: 1-8.
- González-Arno M.T., Panta A., Roca W.M., Escobar R.H., Engelmann F. 2008. Development and large-scale application of cryopreservation techniques for shoot and somatic embryo cultures of tropical crops. *Plant Cell, Tissue and Organic Culture* 92: 1-13.
- Murashige T., Skoog F. 1962. A revised medium for rapid growth and bioassays with tobacco cultures. *Physiologia Plantarum*, 15: 473-497.
- Pérez-Ponce J.N., Suárez-Castellá M., Orellana-Pérez P. 2000. Posibilidades y potencial de la propagación masiva de plantas en Cuba. *Biología Vegetal* 1: 3-12.
- Scortecci K.C., Creste S., Calsa T., Xavier M.A., Landell M.G.A., Figueira A., Benedito V.A. 2012. Challenges, Opportunities and Recent Advances in Sugarcane Breeding. *In: Dr. I. Abdurakhmonov* (Ed). *Plant Breeding*. InTech, Nwy York, USA. pp. 267-296.
- Snyman S.J., Meyer G.M., Koch A.C., Banasiak M., Paula-Watt M. 2011. Applications of *in vitro* culture systems for commercial sugarcane production and improvement. *In vitro Cellular and Developmental Biology - Plant*, 47: 234-249.
- White P. 1963. *The cultivation of animal and plant cells*. Ronald Press. New York, USA. 228 p.

NECESIDADES DE INNOVACIÓN EN LA PRODUCCIÓN DE CAÑA DE AZÚCAR (*Saccharum* spp.)

Gómez-Merino, F.C.¹; Trejo-Téllez, L.I.²; Morales-Ramos, V.¹; Salazar-Ortiz, J.¹; Velasco-Velasco, J.¹; Senties-Herrera, H.E.¹; Ladewig, P.³

¹Colegio de Postgraduados *Campus* Córdoba, Carretera Córdoba-Veracruz km 348, Congregación Manuel León, Amatlán de los Reyes, Veracruz, México. C.P. 94946. ²Colegio de Postgraduados *Campus* Montecillo, Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo, Texcoco, Estado de México, México. C.P. 56230. ³Beuth Hochschule für Technik Berlin. Faculty of Science and Technology-Horticulture. Luxemburger Str. 10. D-13353 Berlin, Germany.

*Autor responsable: fernandg@colpos.mx

RESUMEN

La caña de azúcar es un cultivo que se desarrolla en 15 entidades federativas y 227 municipios en México y que genera una derrama económica para cerca de un millón de personas de manera directa y más de 2.2 millones de manera indirecta. A pesar de que ha habido algunos avances importantes en esta cadena de valor, es necesario implementar diversas innovaciones técnicas, organizativas, comerciales y gerenciales a fin de convertir a ésta en una actividad rentable y competitiva. En el presente se citan elementos que requieren de innovación, sobre todo en el componente técnico de la producción en campo, además de los relacionados con el comercio y la organización.

Palabras clave: Ciencia, tecnología, empoderamiento, competitividad

INTRODUCCIÓN

Tanto a nivel global como nacional, la agricultura está experimentando amplias transformaciones, fruto de los procesos de cambio tecnológico en respuesta a nuevos retos como el cambio climático, la creciente demanda de alimentos, energía, nuevas exigencias de los consumi-



dores, cambios políticos y la globalización en general. Para soportar estas transformaciones, el sistema productivo ha tenido que apoyarse en la innovación, entendida ésta como todo cambio basado en el conocimiento que genera valor y que está provocando una nueva revolución agrícola. Para alcanzar y mantener el desarrollo económico y enfrentar los principales desafíos que tiene la agricultura, se depende cada vez más de la capacidad institucional, empresarial y técnica de los países para desencadenar y fortalecer los procesos de innovación. Esta última se desarrolla en mejores términos y expresa todo su potencial transformador cuando existen sistemas nacionales de innovación agroalimentarios fuertes y consolidados. Sin embargo, en México este sistema tiene un grado muy diverso de desarrollo, con una tendencia general a la ineficiencia en la mayoría de los sistemas producto y las cadenas de valor de importancia agroalimentaria, incluyendo la caña de azúcar (CONADESUCA, 2013).

El sistema de producción de la caña de azúcar en México genera más de 2 millones de empleos, tanto en forma directa como indirecta, y se desarrolla en 15 entidades federativas y 227 municipios (Enriquez-Poy, 2013). La zafra 2012-2013 se realizó en 55 ingenios, en una superficie de 780,534 mil ha⁻¹, alcanzando una molienda de 61, 438,539 toneladas de caña, una producción de casi siete millones de toneladas de azúcar (Enriquez-Poy, 2013), equivalente a un valor cercano a los 34 mil millones de pesos, aportando 11.6% del PIB del sector primario y 2.5% del PIB manufacturero (CONADESUCA, 2013). En el sistema de producción primaria de esta cadena de valor existen problemas cruciales relacionados con rezagos en los procesos productivos, tales como tecnología obsoleta y una complicada organización de productores que obstruyen los procesos de producción y limitan crecimiento y desarrollo, lo cual hace necesario implementar estrategias de innovación que permitan elevar la productividad y rentabilidad de esta actividad. Si bien la competitividad de la actividad cañera es el resultado de la interacción de diferentes factores, incluyendo pérdida de sacarosa, días de zafra, tiempo perdido, consumo de combustibles, fibra en caña, capacidad instalada para molienda de caña por día, grado de utilización de la capacidad instalada, sacarosa en caña, eficiencia de combustibles, equipos, operaciones unitarias y costos de la materia prima, entre otros (Aguilar-Rivera *et al.*, 2010), en este artículo se describirán únicamente algunas necesidades de innovación en lo que respecta a la producción de campo, dado que los aspectos relacionados con fábrica ya han sido abordados por autores como Aguilar-Rivera *et al.* (2013).

Desafíos para la producción de caña de azúcar

La producción primaria de caña de azúcar enfrenta serios retos por efecto del cambio climático; México es el segundo país más vulnerable a este fenómeno a escala global, sólo después de la India y, bajo esta perspectiva, la producción agrícola nacional podría caer en más de 25% hacia el año 2080 (Moyer, 2010) si el país no desarrolla estrategias adecuadas y visionarias para enfrentarlo. Aunado a lo anterior, se proyecta que la población de México rebase los 150 millones de habitantes para el año 2050 (CONAPO, 2012), lo que generaría mayores presiones sobre los recursos naturales, muchos de los cuales enfrentan escasez y deterioro. En la en la Figura 1 se muestra un resumen de los grandes desafíos ambientales del país para mantener y mejorar la producción de caña de azúcar.

Necesidades de innovación en la producción de caña de azúcar

Adaptación al cambio climático

Los enfoques innovadores que se desarrollen para la producción sustentable de caña de azúcar, deben considerar mecanismos de adaptación al cambio climático de las variedades existentes y de las que se generen en el futuro. Problemas de escasez de agua, altas temperaturas, heladas e inundaciones deben ser considerados en los programas de mejoramiento genético y de manejo agronómico del cultivo.

Uso eficiente del agua

Como consecuencia del cambio climático, la distribución de las precipitaciones pluviales está siendo más errática y los cultivos de caña de azúcar tendrán que producir bajo estas condiciones. La selección o generación de variedades capaces de hacer un uso eficiente del agua es ya una necesidad imperante, donde las raíces juegan un papel importante, aunque existe desconocimiento de los tipos de sistemas radiculares en los nuevos híbridos y las condiciones productivas en función del tipo de suelo y la disponibilidad de agua, aumentando con ello nuevos esquemas de selección y producción, aunado al desarrollo e implementación de estrategias alternas como el fertirriego, la protección de las fuentes de agua, la captación y el aprovechamiento del agua de lluvia, y la reutilización del agua. A nivel fisiológico y molecular, las acuaporinas juegan un papel importante no sólo en el uso eficiente del agua, sino también en la acumulación de sacarosa, por lo que su estudio a nivel de cada variedad podría apoyar las estrategias de uso eficiente del vital líquido.

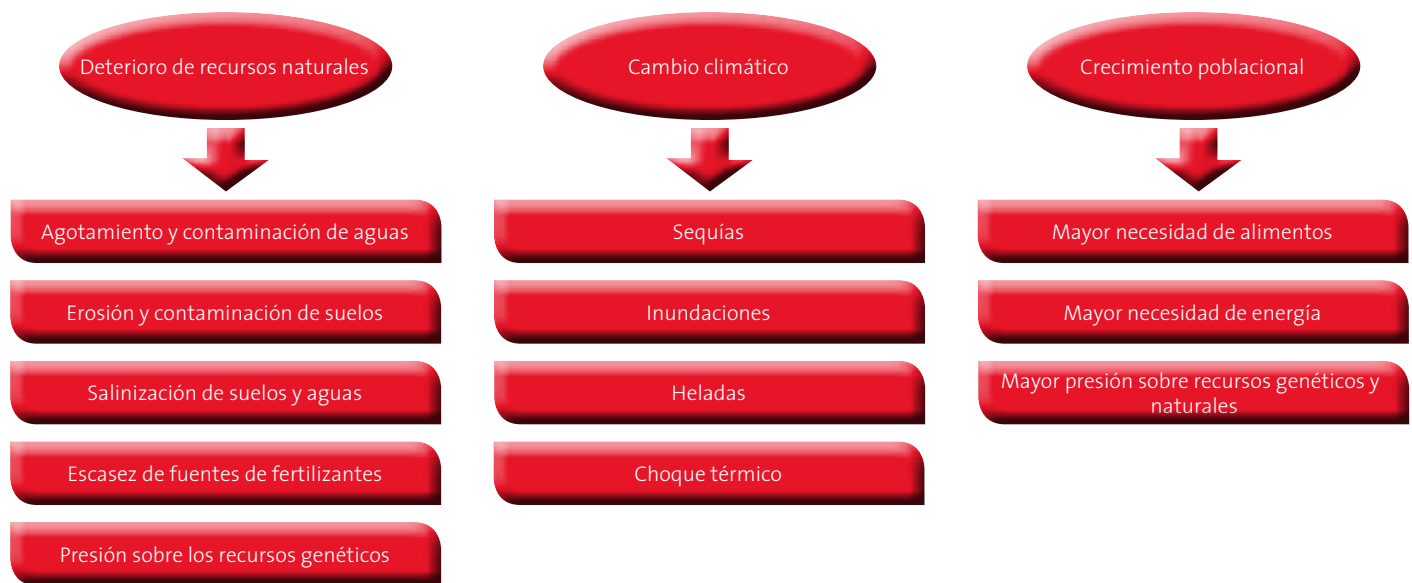


Figura 1. Grandes desafíos ambientales que enfrenta México para asegurar la producción sustentable de caña de azúcar (*Saccharum spp.*).

Riego

Los estudios sobre cuencas hidrológicas, desarrollo de sistemas eficientes de riego, crecimiento de la infraestructura para riego y otros aspectos relacionados con captación, distribución y uso eficiente y limpio del agua, son urgentes para esta cadena de valor.

Resistencia a factores de estrés abiótico

También existe necesidad de seleccionar genotipos resistentes a factores como sequía, salinidad, heladas y anoxia. Protocolos establecidos en laboratorio para explorar mecanismos de resistencia pueden apoyar este tipo de acciones, junto con la aplicación de transformación genética con enfoque de biología de sistemas, para analizar rutas de regulación de las respuestas de esta planta al estrés.

Resistencia a factores de estrés abiótico

La búsqueda de resistencia a plagas y enfermedades es un paso necesario en los procesos de mejoramiento genético de caña de azúcar desde un inicio. Sin embargo, los métodos actuales toman demasiado tiempo y resultan costosos, por lo que los diagnósticos moleculares pudieran brindar mayor rapidez y eficiencia en la detección de su presencia o la resistencia de los nuevos materiales generados. La búsqueda de estrategias de control biológico y de principios activos útiles en el control de insectos plaga y microorganismos patógenos, es otra necesidad en el cultivo de la caña de azúcar.

Uso eficiente de fertilizantes, biofertilización y abonos

El cultivo de la caña de azúcar es uno de los más demandantes en fertilizantes. El uso eficiente de éstos es uno de los mayores requerimientos en este cultivo, dada la enorme pérdida económica que significa su lixiviación, además de los daños ambientales que provoca. Los estudios de suelo y los requerimientos de cada variedad serán determinantes para estimar las necesidades de fertilizantes de manera más eficiente. Además, es urgente el desarrollo de innovaciones para la aplicación de biofertilizantes y abonos generados a partir del mismo sistema de producción.

Cosecha en verde

De las 780,534 ha sembradas con caña de azúcar en México, sólo 188,000 se cosechan en verde, lo que implica que más de 75% de la superficie es quemada previo a la cosecha, con las implicaciones ambientales que esto conlleva. Dado que la cosecha en verde requiere de mecanización (Ortiz-Laurel *et al.*, 2012), además del diseño de aparatos y equipos especializados y adecuados para las condiciones en que se encuentran las siembras, es necesario replantear la reubicación de las zonas cañeras, dada la potencialidad de cerca de cinco millones de hectáreas para el cultivo de caña de azúcar (SAGARPA, 2009).

Mecanización

Los retos para la mecanización del campo cañero están determinados por los siguientes hechos: suelos pedregosos y fuertes pendientes en 48% de la superficie; superficies

inundables y con problemas de heladas y salinidad en 30%; superficies menores a 4 ha en 70%; y la superficie susceptible de mecanización de sólo 22%. El reto en este apartado es el diseño de maquinaria apropiada y la reubicación de los terrenos cañeros, entre otros.

Digitalización y agricultura de precisión

Estrategias como la digitalización del campo cañero para alcanzar la agricultura de precisión que ha emprendido la SAGARPA en el marco del Programa Nacional de la Agroindustria de la Caña de Azúcar (PRONAC) 2007/2012, han aportado importantes herramientas tecnológicas, aunque aún se requiere un trabajo conjunto entre los diferentes actores (gobierno, industriales, productores de caña, académicos y técnicos), a fin de abordar integralmente la problemática multifacética que enfrenta esta cadena de valor. Hasta ahora, sólo 40% del campo cañero ha sido digitalizado, por lo que es muy importante completar este proceso, preparar cuadros bien capacitados y aplicar las herramientas para operar sus bondades.

Gestión ambiental

Control de emisiones, utilización de biomasa para combustión en calderas, tratamiento de aguas residuales, remoción de contaminantes de aguas de riego y suelos agrícolas, uso de cachaza y bagazo en procesos de biorremediación, producción de carbono activo a partir de la biomasa y manufactura de nuevos productos a partir de desechos, son algunas de las estrategias de gestión ambiental que se deben considerar en los procesos de innovación que emprenda esta cadena de valor (Vilaboa-Arroniz y Barroso, 2013).

Caña de azúcar como cultivo orgánico
La producción de caña de azúcar

con métodos orgánicos que eviten el uso de agroquímicos y hagan uso de buenas prácticas agrícolas constituye una alternativa para explorar nuevos nichos de mercado, revertir el deterioro ambiental y reducir costos de producción. En algunas regiones azucareras del país, aunado a la búsqueda de resistencia varietal a plagas y enfermedades, se hace uso de métodos biológicos de control de plagas, lo que requiere mayor investigación e intensificación hacia toda la superficie cañera.

Aumento de rendimientos

La caña de azúcar es una planta C₄ con potencial para producir hasta 805 t ha⁻¹ (Yadav *et al.*, 2010) de biomasa fresca, por lo que los rendimientos promedio mundiales de alrededor de 80 t ha⁻¹ pueden multiplicarse por 10. En este aspecto, los programas de mejoramiento genético deben apoyarse con las nuevas herramientas de la biotecnología para elevar rendimientos tanto de caña como de azúcar.

Aplicaciones biotecnológicas y ciencias genómicas

Uno de los grandes desafíos que enfrenta el cultivo de la caña de azúcar para desarrollar estrategias de mejoramiento eficientes es la complejidad del genoma (totalidad de genes de la especie), aunado a problemas de baja eficiencia de transformación genética, inactivación de transgenes, variación somaclonal y dificultades de los retrocruzamientos. Además, no se dispone de modelos estadísticos que expliquen el comportamiento de especies poliploides, como la caña de azúcar. Pese a ello, las ciencias genómicas y el mejoramiento asistido por marcadores moleculares pueden tener gran impacto en el desarrollo de las cañas del futuro, por lo que se debe poner especial atención en estas estrategias.

Generación de variedades para diferentes usos

La diversificación es una parte importante de la competitividad de esta cadena de valor. De acuerdo con Aguilar-Rivera (2012), existen más de 200 productos, coproductos, subproductos y derivados que se pueden obtener de la caña de azúcar, necesarios para las industrias agrícola, ganadera, alimenticia, farmacéutica, química, energética, del transporte, de la construcción y de la vivienda, entre otras.

Créditos

El acceso al crédito es uno de los factores determinantes de la producción cañera en México. Junto con el rendimiento de campo y el de fábrica, así como el acceso al riego, el crédito explica 75% de la capacidad para expandir la productividad cañera para la producción de azúcar y etanol (Aguilar-Rivera *et al.*, 2013).

Caña de azúcar como biofábrica

Con apoyo de protocolos biotecnológicos, a la caña de azúcar actualmente se le está visualizando como una biofábrica potencial para producción de bioplásticos, proteínas farmacológicas y azúcares alternativos (Gómez-Merino *et al.*, 2014). En este aspecto es necesario continuar los trabajos tanto en investigación básica como en desarrollo tecnológico, a fin de superar algunas limitaciones técnicas relacionadas con la generación de variedades biotecnológicas pero, sobre todo, la creación de modelos genéticos que ayuden a explicar la variabilidad existente y poder determinar las frecuencias alélicas para la acumulación de caracteres específicos en un organismo poliploide, y poder crear líneas según el objetivo planteado.

Capacitación laboral

Las innovaciones que requieren ser implementadas en los sistemas de

producción de caña de azúcar en México, urgen de un apoyo considerable para el desarrollo de capacidades humanas tendientes a empoderar a productores y trabajadores del campo, técnicos y tomadores de decisiones. Instancias como el INCA Rural, el Colegio de Postgraduados, el INIFAP y la Universidad Autónoma Chapingo, por mencionar algunos, podrían dar soporte a estas iniciativas. El empoderamiento del capital humano es determinante para toda estrategia de innovación, máxime cuando se trata de cerca de 12 millones de connacionales que habitan los municipios donde se lleva a cabo esta actividad.

Organización de productores

La organización de productores es un tema toral dentro de los procesos de innovación que se intenten poner en funcionamiento para mejorar la eficiencia y la competitividad de esta cadena de valor. Aunque ésta presenta una estructura muy compleja y con una arraigada tradición, se podrían implementar modelos estructurales que han tenido éxito en otros países donde se cultiva caña de azúcar y, de esta forma, hacer más fácil y eficiente el manejo de la agroindustria de la caña de azúcar.

Certificación de procesos

A fin de alcanzar estándares internacionales y lograr una verdadera competitividad global, todo proceso innovador que se implemente en campo deberá contar con una certificación correspondiente. Para lograr el objetivo se deben incluir inspecciones de campos de cultivo y de las plantas de procesamiento, registro detallado del funcionamiento y mantenimiento, control periódico de suelos y el agua, además de cumplir con diferentes normas para la producción orgánica, entre otros.

CONCLUSIONES

El cultivo de caña de azúcar en México presenta un gran potencial para poderse consolidar como una actividad eficiente, rentable y competitiva a nivel global. Parte de las ventajas que se tienen en México son de tipo ambiental (suelos y climas en su mayoría benéficos) y las estrategias de innovación que se implementen deberían enfocarse a aspectos técnicos (desarrollo de nuevas variedades con mayor capacidad para producir biomasa y sacarosa, y resistentes o tolerantes a factores bióticos y abióticos, uso eficiente del agua, mayor infraestructura para riego, uso eficiente de fertilizantes, generación y aplicación de biofertilizantes y abonos, desarrollo de variedades biotecnológicas, generación de sistemas de producción orgánicos, diversificación de la producción, cosecha en verde y mecanización, entre otros), organizacionales (programación de siembra y cosecha, organización de la producción, organización de los productores), comerciales (nuevas estrategias de mercado, búsqueda de nuevos nichos de mercado) y gerenciales (administración integral del sistema de producción), a fin de lograr el progreso social de quienes viven a partir de los beneficios que se generan de esta cadena de valor.

LITERATURA CITADA

- Aguilar-Rivera, N. 2012. Paradigma de la diversificación de la agroindustria azucarera de México. *Convergencia*, 59: 187-213.
- Aguilar-Rivera N., Galindo-Mendoza G., Fortanelli-Martínez J. Contreras-Servín C. 2010. Competitividad internacional de la agroindustria azucarera de México. *Theoria*, 19: 7-29.
- Aguilar-Rivera N., Espinosa-López R.A., Herrera A. Castillo A., Rodríguez-Lagunes D.A. 2013. Diamante de competitividad de la agroindustria azucarera en México. *Revista ATAM*, 26: 28-38.
- CONADESUCA. 2013. Sistema INFOCaña. Campo y Fábrica: Zafra 2012-2013. (<http://www.campomexicano.gob.mx/azcf/entrada/menu.php>).
- CONAPO. 2012. Proyecciones de la población de México 2010-2050. Consejo Nacional de Población. México, D. F. <http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Proyecciones>
- Enriquez-Poy M. 2013. Azúcar de caña, la amargura del éxito. *Revista ATAM*, 26: 40-44.
- Gómez-Merino F.C., Trejo-Téllez L.I. Senties-Herrera H.E. 2014. Sugarcane as a Novel Biofactory: Potentialities and Challenges. In: R. Guevara-González, I. Torres-Pacheco (Eds.). *Biosystems Engineering: Biofactories for Food Production in the Century XXI*. Springer, Cham, Switzerland, pp. 129-149.
- Moyer M. 2010. How much is left? A graphical accounting of the limits to what one planet can provide. *Scientific American. Environment*: 74-81.
- Ortiz-Laurel H., Salgado-García S., Castelán-Estrada M. Córdova-Sánchez S. 2012. Perspectivas de la cosecha de la caña de azúcar cruda en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 4: 767-773.
- SAGARPA. 2009. Convención Nacional de Geografía 2009. (<http://mapserver.inegi.org.mx/geografia/espanol/eventos/cng2009/memoria/cng2009/20091019%20siazucar%20para%20cng%20julio%20c-rivera.pps>)
- Vilaboa-Arroniz I. Barroso L.A. 2013. Contaminación ambiental por quema de caña de azúcar: Un estudio exploratorio en la región central del estado de Veracruz. *Memoria de ponencias Think Green 2013: Crecimiento verde, retos y oportunidades para México*.
- Yadav D.V., R. Jain and R. K. Rai., 2010. Impact of Heavy Metals on Sugarcane. In: I. Shrameti and A. Varma (Eds.), *Soil Heavy Metals-Soil Biology*. pp. 339-367.



MECANICA PARA LA CONTENCIÓN DE ECLOSIÓN DE HUEVOS DE MOSCA PINTA (*Aeneolamia* spp.) EN CAÑA DE AZÚCAR (*Saccharum officinarum*)

Ortiz-Laurel, H.¹; Rosas-Calleja, D.¹; Rössel-Kipping, D.¹; Herrera Corredor, J.A.¹

¹Línea Prioritaria de Investigación 3: Energía Alternativa y Biomateriales. Colegio de Postgraduados, km. 36.5 Carretera México-Texcoco, Montecillo, Texcoco, 56230, Estado de México, México.

Autor responsable: hlaurel@colpos.mx

RESUMEN

Se indican las deficiencias que ofrece la rastra de discos excéntrica para controlar con efectividad la eclosión de huevos de la mosca pinta (*Aeneolamia* spp.), mediante la alineación de los cuerpos de discos (rastra fitosanitaria) y se resalta el hecho de que persiste la rigidez de los cuerpos de discos y los condiciona a variar su profundidad de trabajo ante los obstáculos comunes que se encuentran en los campos cañeros. La acción convencional del disco sobre el suelo a una profundidad seleccionada de trabajo es cortar, mezclar, “esponjar” y romper el efecto de capilaridad y sellar el suelo. Por ello, una reducción de su ángulo de “ataque” puede disminuir significativamente esa función.

Palabras clave: Rastra, maquinaria, salivazo, ángulo de “ataque”

INTRODUCCIÓN

La mosca pinta (*Aeneolamia* spp.), salivazo, salvita o cualquier otro nombre conocido de este insecto, constituye la principal plaga del cultivo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) en muchas de las zonas productoras de México, causando daños severos al cultivo, con graves repercusiones económicas. La mosca pinta oviposita sus huevos sobre la superficie del suelo, cerca o entre las raíces de la caña, sobre los tocones (base) de los tallos y en los residuos de la paja de caña. Incluso, las hembras pueden penetrar en las grietas del suelo y ovipositarlos a mayor profundidad. Los huevos son de dos tipos: diapáusicos y no diapáusicos; son alargados, de superficie lisa y de forma cilíndrica. Tienen una longitud promedio de 1.0 mm y diámetro de 0.3 mm; muchos de los huevos ovipositados al final de la temporada de lluvias permanecen en el suelo en estado de diapausa hasta el inicio de las próximas lluvias, y se ha reportado que en su mayor proporción se encuentran en los primeros 4 cm de profundidad desde la superficie del suelo y a una distancia de 15 cm desde el centro de la cepa (Figura 1) (Anleu Fortuny, 1998). Al presentarse condi-

ciones favorables de temperatura y humedad en el suelo, los huevos en diapausa o “hibernación” eclosionan.

Para lograr una intervención significativa sobre la plaga con base en un control cultural, la cantidad de huevos con potencial de eclosionar se debe orientar a disminuir, sobre todo en zonas de cultivo que reportan más de 200,000 huevos fértiles por hectárea (CENGICAÑA, 1998; Díaz-Montejo y Portocarrero-Rivera, 2002), que es el umbral ante el cual se recomienda ejecutar labores indispensables de prevención para lograr un control efectivo. Sin embargo, esta decisión debiera estar sustentada en el impacto económico por todas las acciones de contingencia que deben ser llevadas a cabo para mitigar su afectación, además de que el método de control implementado ofrezca evidencias de que su acción satisfaga el objetivo planeado.

Ante la falta de tecnología mecánico-agrícola desarrollada específicamente para contener la eclosión de los huevos, la práctica común consiste en efectuar un paso (y en ocasiones dos) de una rastra convencional excéntrica de discos cóncavos en posición vertical (Figura 2 A), ya sea integral montada en el enganche de tres puntos del tractor, o bien, del tipo de

tiro, pero con la diferencia de que los dos cuerpos de discos se orientan perpendicularmente con la dirección del movimiento del tractor (Figura 2 B). En esta configuración los discos operan sin ángulo, es decir, el movimiento (rotación) de los discos es paralelo a la dirección de avance del tractor, factor que disminuye la efectividad de su función primaria (Serrano *et al.*, 2003). De esta manera, mucho del control sobre los huevecillos que se le atribuye a la rastra de discos se debe realmente a condiciones ambientales favorables, como a altas temperaturas, efecto de la radiación solar y a la posible presencia de depredadores-hormigas y avispas, entre otros.

Existe la creencia popular de que la rastra de discos operando con esta simple variación, tiene la facultad de “exponer” los huevos de la mosca pinta al sol y a depredadores, la cual se ha elogiado en extremo; incluso, otorgándole a este implemento agrícola el atributo de “gran efectividad” para controlar o reducir la eclosión de huevecillos, lo cual la ha catapultado como una práctica regular obligada contra esta plaga en México y países cañeros de Centroamérica. La rastra de discos y, en particular, el efecto que realizan en el suelo, es una función del propósito principal; corte y movimiento del suelo que, si

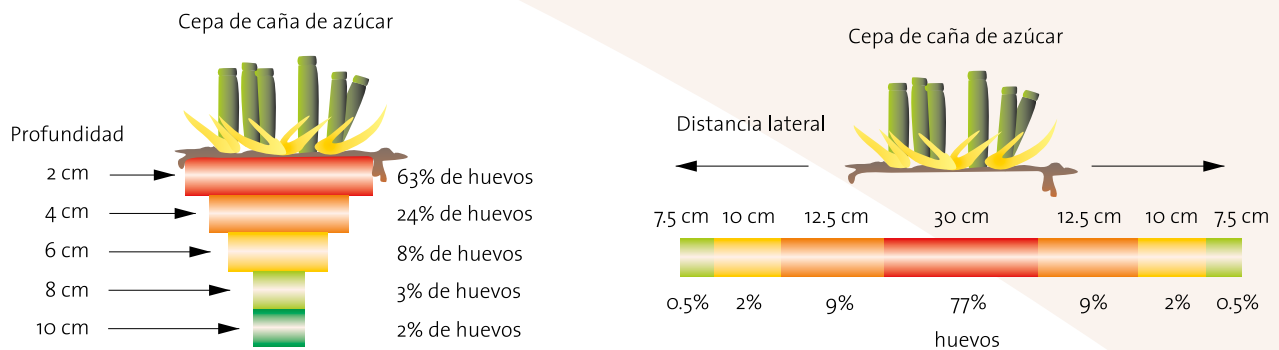


Figura 1. Distribución espacial de los huevos diapáusicos fértiles de la mosca pinta (*Aeneolamia* spp.) en una cepa de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*).



Figura 2. A: Rastra de discos excéntrica del tipo de tiro. B: Cuerpos de la rastra de disco convencional excéntrica en configuración paralela y perpendicular con la dirección de movimiento del tractor.

bien pueda utilizarse para cumplir una función semejante, la alteración sin fundamento de alguno de sus parámetros de funcionamiento puede disminuir proporcionalmente su efectividad (Serrano *et al.*, 2003).

Con base en lo anterior, se describe el desarrollo de la rastra de discos para suelos agrícolas y en particular las funciones de los discos, tomando como premisa que de esas cualidades muy difícilmente se puede conseguir una contención significativa en la eclosión de los huevos diapúsicos de la mosca pinta, simplemente por utilizar una versión simplificada de la rastra de discos, denominada “rastra fitosanitaria”. De igual manera, se especifican aquellos obstáculos que limitan, pero que no impiden innovar tecnológicamente esta tarea y su estrategia de solución, lo cual involucra renovar esfuerzos tanto económicos como técnicos, para desarrollar un equipo agrícola que verdaderamente impacte en el control eficaz de la mosca pinta en la caña de azúcar.

MATERIALES Y MÉTODOS

Premisa

Las rastras de discos cóncavos son utilizadas en casi cualquier tipo de condición del suelo. Después del paso del arado de discos, la función principal de este implemento es pulverizar los terrones de suelo, reducir los espacios de aire, formar un “mulch” (cobertura) en la superficie y consolidar el suelo por debajo de la superficie para conseguir una “cama” suave y uniforme (Ortiz-Laurel y Rössel-Kipping, 2007). Igualmente, son los implementos adecuados para trabajar en terrenos con piedras o tocones, ya que las orillas de los discos pueden rodar sobre los posibles obstáculos, cortar el material vegetal remanente sobre la super-

ficie y realizar la incorporación de agroquímicos aplicados al cultivo, debido a su excelente acción de mezclado.

Descripción de la construcción y especificaciones de la rastra de discos

- La rastra de discos consiste de varios discos cóncavos verticales que, montados con separadores, forman cuerpos que giran sobre un eje común. Éstos se orientan formando un ángulo con respecto a la dirección del movimiento, con lo que tienden a rodar, a la vez que cortan y mezclan las capas de suelo.
- En las rastras excéntricas, los cuerpos de discos tienen una configuración en “V” (Figura 3). Los del cuerpo trasero se colocan para que desplacen el suelo en sentido contrario a la de los delanteros, lo que provoca un efecto nivelador.
- En las rastras excéntricas, el eje de tiro acoplado al tractor debe estar desplazado con respecto al plano medio de la rastra, para compensar la torsión que genera el suelo sobre los discos de los cuerpos delantero y trasero.
- La profundidad de trabajo varía de 5 a 15 cm.
- Rango de los ángulos de ataque de la rastra excéntrica: cuerpo delantero 15°- 20°; cuerpo trasero 25°- 30°.
- Rango de velocidad de trabajo: 6 a 10 km h⁻¹; eficiencia en la parcela de: 0.65 a 0.85.
- Demanda de potencia en condiciones óptimas de funcionamiento: rastras ligeras 20-25 hp m⁻¹ (15-18 kW m⁻¹); rastras medianas 25-35 hp m⁻¹ (18-22 kW m⁻¹); rastras pesadas 30-35 hp m⁻¹ (22-26 kW m⁻¹).
- Las rastras extra pesadas (120-140 kilogramos por disco) pueden utilizarse para la labranza primaria del suelo. Esta particularidad les ha permitido sustituir al arado de discos en ciertas condiciones específicas del suelo.

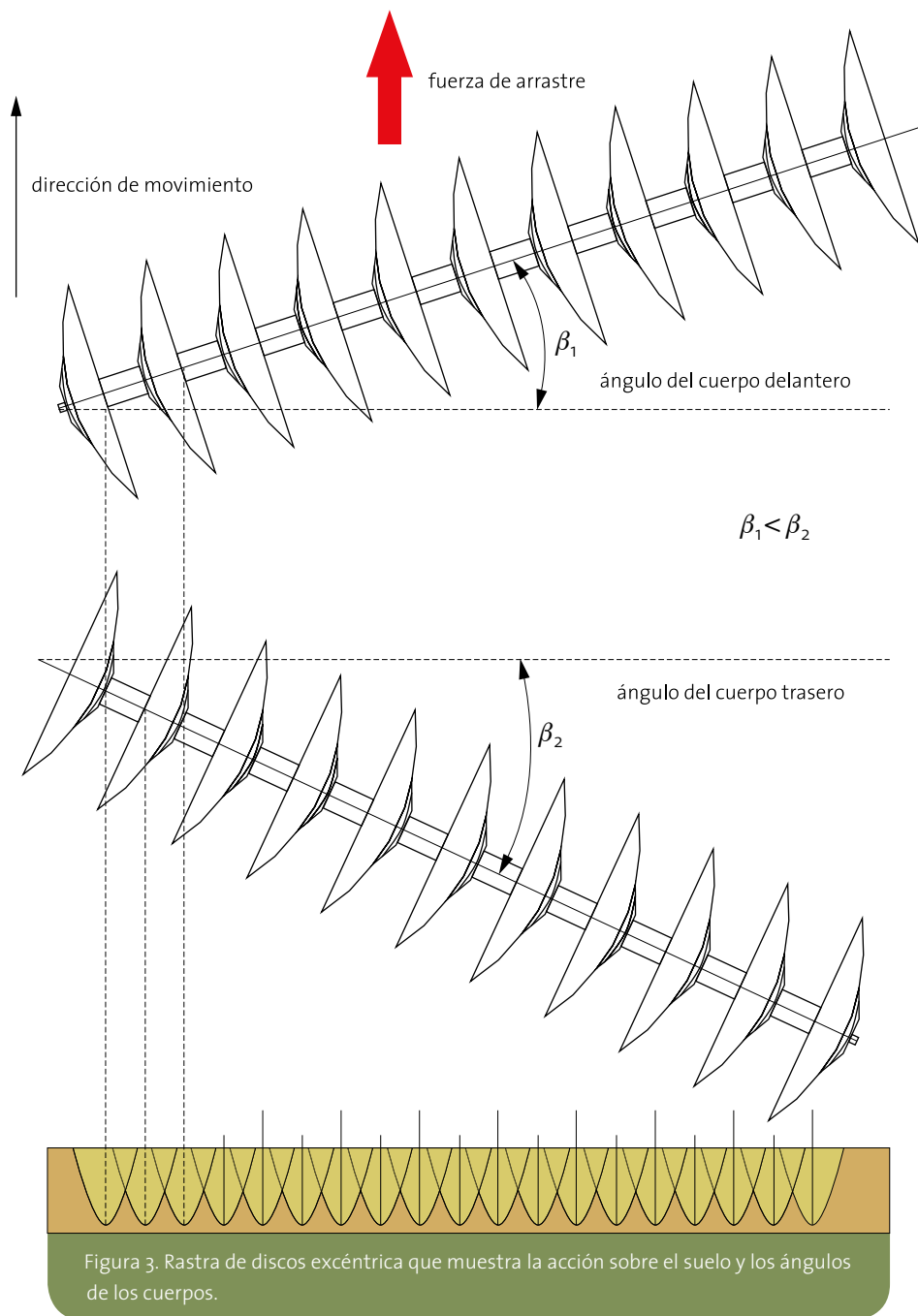


Figura 3. Rastra de discos excéntrica que muestra la acción sobre el suelo y los ángulos de los cuerpos.

Funciones y características de los discos

La rastra excéntrica es la que predomina en las regiones agrícolas de México, donde el cuerpo delantero está conformado por discos cóncavos ranurados (escotados); esas ranuras sobre el disco le permiten retener los tallos y las raíces y desplazarlas a lo largo de la dirección de los puntos circunferenciales del disco, mientras que el cuerpo trasero utiliza discos cóncavos lisos (Ortiz-Laurel y Rös-sel-Kipping, 2007).

Características básicas atribuibles a los discos de la rastra

- Los discos realizan un laboreo superficial en la profundidad de trabajo, la cual depende del diámetro del disco, peso sobre cada uno de ellos y del ángulo

que forman con la dirección del movimiento.

- Los discos producen rotura y desmenuzamiento de los terrones por efecto de sus bordes afilados y por el desplazamiento lateral del suelo, quedando razonablemente nivelado y con una consistencia firme. Realizan una incorporación superficial, aunque parcial del residuo vegetal que se encuentra sobre la superficie del suelo.

Los parámetros geométricos básicos que gobiernan la interacción entre el disco de la rastra y el suelo son el diámetro, el radio de curvatura (concavidad) y el ángulo del disco (ángulo de ataque) con respecto a la dirección del movimiento (Figura 4), y se describen de acuerdo con Harrison y Thivavarnvongs (1976) y Monjurul Alam (1989):

- Por lo general, el diámetro del disco influye sobre la profundidad de trabajo del implemento.
- La capacidad de fragmentación que provoca el disco sobre el suelo se debe al radio de curvatura del disco. Entre más pequeño sea el radio, el suelo es desintegrado y volteado con mayor intensidad.
- El ángulo de ataque determina el tamaño de la sección del corte, el desplazamiento lateral, el mezclado y la fragmentación de la capa del suelo. Un incremento en el ángulo de ataque causa un aumento en el valor de esos parámetros y, en proporción directa, la fuerza de arrastre.

Descripción y uso general de la "rastra fitosanitaria"

En un programa de manejo integral de la mosca pinta en caña de azúcar, el control mecánico se refiere exclusivamente al control de la eclosión (mortandad) de los huevos, así como

Parámetros geométricos de una rastra de discos

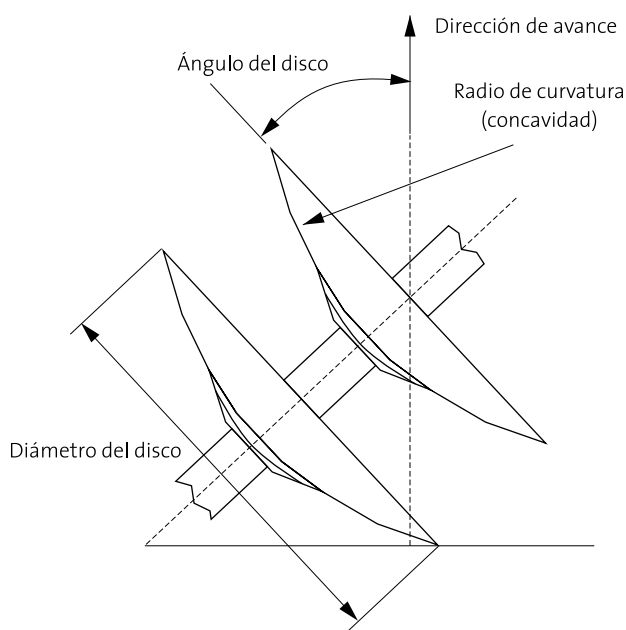


Figura 4. Principales parámetros geométricos que influyen en la eficiencia de la interacción del disco de la rastra con el suelo.

a facilitar su exposición a enemigos naturales. Por lo general, la práctica cultural implementada es la utilización de la “**rastra sanitaria**” o “**rastra fitosanitaria**”.

En sí, esta rastra fitosanitaria es una rastra de discos convencional del tipo excéntrico a la que simplemente se le



Figura 5. “Rastra fitosanitaria” en operación en un cañaveral con surcos de 1.20 m de ancho. El ancho de trabajo no es suficiente para cubrir por completo los surcos extremos, así como la inacción de los discos que cubren el fondo del surco.

alinean los cuerpos de discos para que éstos operen en sentido paralelo a los surcos y evitar así cortar y/o levantar la cepa de caña. Las indicaciones para usar la rastra fitosanitaria son bastante generales y no hacen referencia a procedimientos de ajuste de los parámetros de los discos. Se sugiere que debe usarse de cuatro a diez días después del corte de la caña y sujeto a las labores del destronque, la requema o el hilado de la paja; la profundidad de trabajo debe ser de 3-5 cm para remover la tierra de la parte superficial del camellón y así exponer los huevecillos de la mosca pinta a la intemperie y a depredadores. De requerirse, se deberá realizar un segundo pase de la rastra con un ángulo de 45°, partiendo del primer corte (SDARH, 2012), con lo cual se logra reducir la densidad de huevos en algún grado.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Obstáculos para el funcionamiento efectivo de la “rastra fitosanitaria”

Se refieren exclusivamente al manejo del cultivo de caña de azúcar. Uno de los primeros factores que influyen en la baja eficiencia de la rastra fitosanitaria es el ancho de los surcos (Figura 5), los cuales varían desde 1.10 a 1.50 m y, por lo general, depende de la región, las preferencias de los productores y el tipo de cosecha.

Otra limitante es el tamaño y la forma del camellón, cuya conformación resulta de las labores de aporque (arroke) y descarne (poda de raíces y alineado de surco), entre otras, que se le realizan al cultivo (Figura 6 A). Es evidente que cuando esas labores no se efectúan, el camellón desaparece casi por completo. La tercera se refiere al cultivo al fondo del surco (Figura 6 B). En algunas regiones cañeras se prefiere mantener las cepas de caña en el fondo. En caso de contingencia por la plaga, y siendo la rastra fitosanitaria la única opción, el efecto que el implemento provocaría sobre los huevecillos sería mínimo. Otros factores, como el efecto residual de la cosecha manual, tamaño de tocón, limpieza de la hilera y calidad de la requema (Figura 6 C), son importantes en su efectividad, ya que entre los cortadores aún persiste la costumbre de dejar los tocones de caña altos; así, la basura (paja) queda dispersa y, como debe dejarse secar para la requema, las condiciones de viento en algunas regiones dificultan el lograr una requema completa, en especial las puntas de caña, por lo que



Figura 6. Obstáculos originados por la variedad de procesos de manejo del cultivo de la caña de azúcar. A: Presencia e inexistencia de camellones en parcelas cañeras. B: Práctica del cultivo de caña de azúcar en el fondo del surco. C: Deficiente requema de paja de caña de azúcar con corte manual. D: Panorama de parcela cañera cosechada con maquinaria.

una cantidad considerable de paja permanece sobre el terreno. El efecto residual que se tiene con la cosecha mecánica es la alta cobertura de paja sobre la hilera (Figura 6 D) y aunque, según los productores, quemarla es una opción rápida, económica y via-

ble, no es deseable hacerlo por los beneficios que aporta al suelo. Sin un manejo adecuado de la quema, algunas zonas quedan “crudas” y, cuando la paja se deja para su recolecta e incorporación en el suelo, se demanda de acciones efectivas para removerla

sobre la hilera de caña para que el paso de la rastra sea efectiva. Finalmente, la densidad y el tamaño de las piedras en el terreno de cultivo (común en ciertas regiones productoras) son fuertes limitantes para el actuar de la rastra, ya que los discos funcio-

nan como una solo unidad rígida, y al rodar un disco sobre una piedra, esto obliga irremediablemente a que varios de los discos adyacentes se eleven sin realizar ningún trabajo efectivo.

La acción convencional del disco sobre el suelo a una profundidad seleccionada de trabajo es cortar (morder), mezclar y “esponjar”, romper el efecto de capilaridad y sellar el suelo. Por ello, una reducción de su ángulo de ataque puede disminuir significativamente esa función, pues al llegarse a un ángulo de ataque igual a cero se suprime esa particularidad (Figura 7). Al mismo tiempo, se generan efectos no deseados; se dificulta lograr una profundidad de trabajo constante al incrementarse la zona de presión (espalda del disco) que hace contacto con el suelo y para el mismo peso sobre el disco. **A la falta de “mordedura” del disco sobre el suelo, se alcanza cierta profundidad en áreas sin cepas y sólo por peso en suelos suaves (arenosos), pero el levantado del suelo es inexistente, por lo que la afirmación de que la “rastra fitosanitaria” expone los huevos es errónea. La teoría detrás de esto es que el escaso efecto del disco sobre el suelo rompe las condiciones favorables para los huevecillos, pero siempre y cuando se haya llegado a la profundidad de trabajo.** Después de lo anterior, la radiación solar, temperatura ambiental y pre-

sencia de depredadores, pueden contribuir a acentuar ese control.

Finalmente, un segundo pase de rastra al cultivo podría ser indicativo de la ineficiencia en el control mencionado, ya que se habrá perdido el tiempo de oportunidad y se incrementarán los costos en esta fase, repercutiendo en el manejo de la plaga.

CONCLUSIONES

Se indican las deficiencias que ofrece la rastra de discos excéntrica para controlar con efectividad la eclosión de los huevos de la mosca pinta, con la simple alineación de sus cuerpos de discos (rastra fitosanitaria) y, al mismo tiempo, se detalla como una de las más importantes el hecho de que persiste la rigidez de los cuerpos de discos y los condiciona a variar su profundidad de trabajo ante los obstáculos comunes que se encuentran en los campos cañeros. El ancho de trabajo de la rastra (número de discos) no coincide con el de los surcos de caña, limitándose a cubrir completamente el surco que se encuentra entre las ruedas del tractor. La rastra “alterada” mantiene su peso original; éste, conjuntamente con la rigidez de los cuerpos de discos y el nulo ángulo

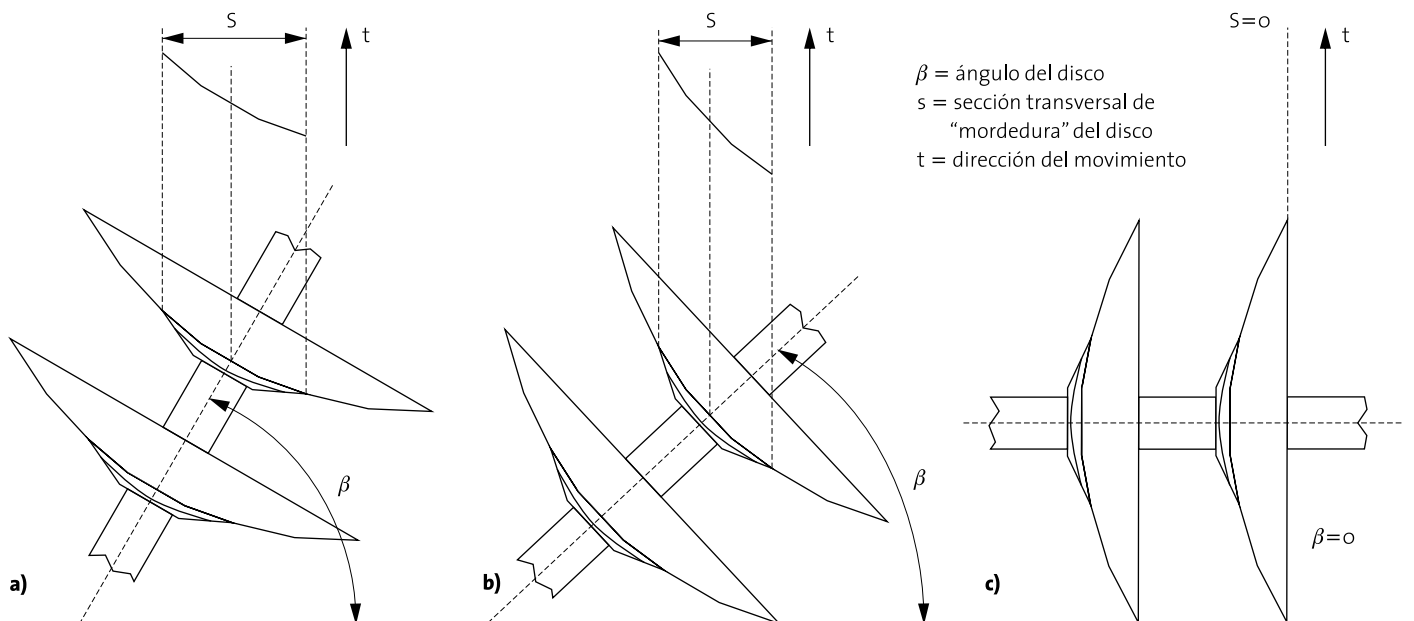


Figura 7. Efecto del cambio del ángulo de ataque del disco; a) ángulo grande con gran sección de mordedura, alta fuerza de arrastre, mayor penetración y disminución del ancho de trabajo. b) ángulo deseable con una razonable sección de mordedura, fuerza de arrastre tolerable, profundidad aceptable y un ancho de trabajo justo. c) ángulo igual a cero, donde el disco no “muerde” el suelo, tiene difícil penetración, ligera fuerza de arrastre y suficiente ancho de trabajo,

de ataque, dificulta llegar a la profundidad de trabajo deseada.

Ante estas consideraciones, es imprescindible canalizar los esfuerzos y recursos en desarrollar equipos con características específicas que actúen directamente con un ancho y profundidad suficiente en el área problema para incrementar su eficiencia; de otra manera, se seguirán implementado prácticas que ofrezcan resultados limitados y parciales con costos adicionales al sistema de producción.

LITERATURA CITADA

- Anleu-Fortuny B. 1998. Distribución horizontal y vertical de chinche salivosa, *Aeneolamia* sp., en relación al sistema radicular de caña de azúcar, *Saccharum* spp., y comparación de tres técnicas de muestreo en Escuintla, Guatemala. Tesis Ing. Agr. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Agronomía. 54 p.
- CENGICANA. 1998. Manejo integrado de la chinche salivosa en caña de azúcar. Comité de Manejo Integrado de Plagas de la Caña de Azúcar (COMIP). Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar. Guatemala. 37 p.
- Díaz-Montejo L.L., Portocarrero-Rivera E.T. 2002. Manual de producción de caña de azúcar (*Saccharum Officinarum* L.). Proyecto Especial del Programa de Ingeniero Agrónomo. Zamorano, Honduras. 140 p.
- Harrison H.P., Thivavarnvongs T. 1976. Soil reaction forces from laboratory measurements with disks. *Canadian Agricultural Engineering*. 18(1): 49-53.
- Monjurul-Alam Md. 1989. Soil reaction forces on agricultural disc implements. Phd dissertation in Agricultural Engineering. The University of Newcastle upon Tyne. Reino Unido. 129 p.
- Ortiz-Laurel H., Rössel-Kipping D. 2007. Herramientas para la labranza de los suelos agrícolas. Colegio de Postgraduados. México. 160 p.
- SDARH. 2012. Secretaría de Desarrollo Agropecuario y Recursos Hidráulicos. Ficha Técnica: Mosca pinta o salivazo. Sistema Potosino de Vigilancia Epidemiológica. Gobierno de San Luis Potosí. 11p.
- Serrano J.M., Peca J.O., Pinheiro A., Cravalho M., Nunes M., Ribeiro L. Santos F. 2003. The effect of gang angle of offset disk harrows on soil tilth, work rate and fuel consumption. *Biosystems Engineering*. 84(2): 171-176.



LA AGROINDUSTRIA DE LA CAÑA DE AZÚCAR

(*Saccharum officinarum*)

EN MÉXICO

Hernández-Cázares, A.S.

Campus Córdoba, Colegio de Postgraduados, Carretera Córdoba-Veracruz km 348, Congregación Manuel León, municipio de Amatlán de los Reyes, Veracruz, México. C.P. 94946.

Autor responsable: aleyse@colpos.mx

RESUMEN

La agroindustria de la caña de azúcar es una actividad económica muy importante en México; sin embargo, aunque tiene gran potencial para ser competitiva y rentable, tiene muchos retos que atender en el ámbito de la producción, transformación y comercialización, además de requerir un análisis del sistema con un enfoque integral donde se generen políticas públicas oportunas, aplicación de innovaciones en la producción primaria, adopción de nuevas tecnologías de producción de azúcar para incrementar la eficiencia de extracción, diversificación de productos y subproductos, y agregación de valor con potencial comercial, en beneficio de todos los actores involucrados.

Palabras clave: sistema producto caña de azúcar, competitividad, transformación,

INTRODUCCIÓN

El cultivo de la caña de azúcar es el sexto de mayor importancia en México, con una superficie sembrada de 780,534 hectáreas, que representa más de 3.5% de la superficie cultivable del país (Enriquez-Poy, 2013; SIAP-SAGARPA, 2012), representando una actividad relevante para la economía nacional. Para la zafra (cosecha) 2012/2013 la aportación fue de 55 ingenios azucareros distribuidos en cinco regiones y 15 estados del país (Cuadro 1). Algunos pertenecen a empresas azucareras de la iniciativa privada (33 ingenios) y otros al estado (22 ingenios); 38 producen azúcar estándar y 17, azúcar refinada. Durante la zafra en mención, el total de caña cortada fue de 61,438,539 toneladas, con un rendimiento promedio en campo de 78.74 t ha^{-1} , lo que generó una producción de azúcar de 6,974,798 toneladas, y una eficiencia en fábrica de 82.66 % (CONADESUCA, 2013). El consumo de azúcar per cápita en México se contrajo de 50 a 42 kg por año en 20 años, en tanto que en los hogares se ha mantenido alrededor de los 21 kg por año, indicativo de que la industria de los alimentos y bebidas ha reducido sustancialmente su consumo. En México, el estado de Veracruz es el líder productor de azúcar con 310,000 hectáreas cosechadas y 20 ingenios azucareros activos, con una producción de 2,620,194 toneladas, lo que representa 38% de la producción nacional.

En México, la agroindustria azucarera o de la caña de azúcar es muy importante para la economía. Su cultivo resulta atractivo por la diversidad productiva y ha sido fuente importante de empleos directos e indirectos. Sin embargo, desde los ciclos productivos 2008/2009, esta agroindustria enfrenta una crisis competitiva crucial. Las causas han sido muchas, entre ellas la baja producción y calidad de la caña, ingenios con tecnología obsoleta, baja extracción de sacarosa, altos costos de producción del azúcar y falta de diversificación de productos o aprovechamiento del potencial comercial de los subproductos, lo cual, sumados a la gran importación de edulcorantes naturales y artificiales, derivado de la firma del Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN), y a componentes socioculturales, políticos y económicos, agudizan notablemente la actividad productiva. No obstante, se han estado realizando esfuerzos para impulsar estrategias de desarrollo que eleven la eficiencia y rentabilidad de este sector.

Situación actual de la agroindustria del azúcar

La producción de azúcar en México ha crecido de manera extensiva en los últimos años con una producción de 6,974,798 toneladas de azúcar para la zafra 2012/2013, (Cuadro 1, 2; Figura 1). Esta alza se debe principalmente al incremento en la superficie cosechada de los ingenios azucareros, más que al incremento en el rendimiento en campo, y muy poco al aumento de la eficiencia en la extracción del azúcar (García, 2011).

La estructura productiva de la agroindustria azucarera (Figura 2) involucra aspectos que van desde la producción de caña (cultivo, cosecha y transporte de campo) como materia prima principal para los ingenios en la transformación a azúcar y obtención de subproductos, hasta su comercialización vía los canales establecidos (productor-acopiador-ingenio azucarero-industria-consumidor). De ahí que el desarrollo de estrategias para incrementar la eficiencia del sistema tiene que ir desde innovaciones en la producción primaria hasta la adopción de nuevas tecnologías. En este sentido, el Estado Mexicano ha definido estrategias de producción para elevar los rendimientos en campo con la implementación del **Proyecto Nacional de Alta Rentabilidad para el Reordenamiento y Transformación del Campo Cañero Mexicano** (Programa Nacional de la Agroindustria de la Caña de Azúcar-PRONAR 2009) el cual, mediante diagnósticos de suelo y agua, utilización de nuevas variedades, aplicación de innovaciones y prácticas exitosas generadas por la investigación, conforman un crecimiento continuo en los rendimientos de campo, complementado esto con capacitación y actualización, a fin de promover el cambio de actitud y visión de los actores involucrados (productores y organizaciones cañeras, técnicos de campo y directivos). De igual forma, en 2010, se ha operado el **Proyecto PROFERTIL**, coordinado por los Fideicomisos Instituidos en Relación a la Agricultura (FIRA), cuyo objetivo consistió en apoyar la compra consolidada de fertilizantes, a fin de que los productores contaran con este insumo oportunamente,

Cuadro 1. Producción de azúcar por región, estados e ingenios azucareros. Zafra 2012/2013. Fuente: Elaboración propia con datos de CONADESUCA, 2013

Región	Estado	Núm. Ingenios azucareros	Caña cortada (Miles de ton)	Rendimiento en campo (Ton/Ha)	Eficiencia en fábrica (%)	Azúcar producida (Miles de ton)
Noroeste	Sinaloa	3	1,626.21	75.08	77.44	141.44
	Nayarit	2	2,172.57	69.31	83.22	263.80
Pacífico	Colima	1	1,600.42	89.45	82.76	175.21
	Jalisco	6	7,258.90	95.60	84.24	871.19
	Michoacán	3	1,516.30	101.70	84.13	177.72
	Morelos	2	1,847.10	110.77	86.79	249.64
Centro	Puebla	2	2,085.87	118.52	84.04	260.46
	Tamaulipas	2	2,480.45	77.02	79.94	280.98
Noreste	San Luis Potosí	4	5,857.27	69.37	82.91	712.061
	Veracruz	20	23,738.41	76.55	82.55	2,620.19
Golfo	Tabasco	3	2,137.60	58.91	78.80	219.07
	Oaxaca	3	3,526.47	70.91	84.19	404.83
	Campeche	1	702.12	62.95	78.64	72.46
Sureste	Chiapas	2	3,003.29	96.51	83.99	349.26
	Quintana Roo	1	1,894.45	64.62	78.54	176.47
	Total	15	55	61,447.44	78.74	82.66

Cuadro 2. Ubicación geográfica y número de ingenios azucareros en México.

Estado	Ingenio Azucarero
Campeche	1. La Joya
Colima	2. Quesería
Chiapas	3. Huixtla, 4. Pujilic (Cia. La Fe)
Jalisco	5. Bellavista, 6. José Ma. Martínez (Tala), 7. José Ma. Morelos, 8. Melchor Ocampo, 9. San Francisco Ameca, 10. Tamazula
Michoacán	11. Lázaro Cárdenas, 12. Pedernales, 13. Santa Clara
Morelos	14. Casasano (La abeja), 15. Emiliano Zapata
Nayarit	16. El Molino, 17. Puga
Oaxaca	18. Adolfo López Mateos, 19. El Refugio, 20. Pablo Machado
Puebla	21. Atencingo, 22. Calipam
Quintana Roo	23. San Rafael de Pucté
San Luis Potosí	24. Alianza Popular, 25. Plan de Ayala, 26. Plan de San Luis, 27. San Miguel del Naranjo
Sinaloa	28. El Dorado, 29. La Primavera, 30. Los Mochis
Tabasco	31. Azsuremex-Tenosiq999ue, 32. Presidente Benito Juárez, 33. Santa Rosalía
Tamaulipas	34. Aarón Sáenz Garza, 35. El Mante
Veracruz	36. Central Motzorongo, 37. Central Progreso, 38. Constanacia, 39. Cuatotolapam, 40. El Carmen, 41. El Higo, 42. El Modelo, 43. El Potrero, 44. La Gloria, 45. La Providencia, 46. Mahuixtlan, 47. Nuevo San Francisco, 48. Pánuco, 49. San Cristóbal, 50. San Gabriel, 51. San José de Abajo, 52. San Miguelito, 53. San Nicolás, 54. San Pedro, 55. Tres Valles



Figura 1. Distribución de Ingenios Azucareros en México, 2013.

de petróleo y energía eléctrica mediante la cogeneración de fuertes de energía, el desarrollo de esquemas eficientes de operación para la reducción de tiempos perdidos en fábrica (cosecha y transporte) correlacionados directamente con la pérdida de calidad de la caña de azúcar y el aprovechamiento y/o generación de subproductos (melazas, bagazo, lodos de los filtros y vinazas), a fin de incrementar el rezago tecnológico de los ingenios azucareros (FIRA, 2010; Aguilar *et al.*, 2011).

Estas iniciativas se derivaron como parte del proceso de privatización de las empresas en la década de los ochenta, en el cual se incluía la reestructuración del sector público con instrumentos de política para la privatización, desregulación y apertura comercial (Katz, 1999), con el objetivo de hacer más eficientes los ingenios azucareros. Sin embargo,

a costos competitivos y bajo un esquema de administración del riesgo.

Para la eficiencia de extracción de azúcar se han definido estrategias de adopción de nuevas tecnologías, donde el aprovechamiento de la caña se reduce únicamente a la obtención de azúcar cruda (morena o estándar), blanca o refinada y de etanol. Se promueve la reducción de consumo

lación y apertura comercial (Katz, 1999), con el objetivo de hacer más eficientes los ingenios azucareros. Sin embargo, por las implicaciones de índole social, cultural, política y económica de la agroindustria azucarera, dichos programas no han tenido el debido seguimiento ni el impacto deseado. Además, a raíz de la separación del Estado como agente económico promotor del desarrollo, y, a que el mercado es el principal regulador de la economía (Dominguez,

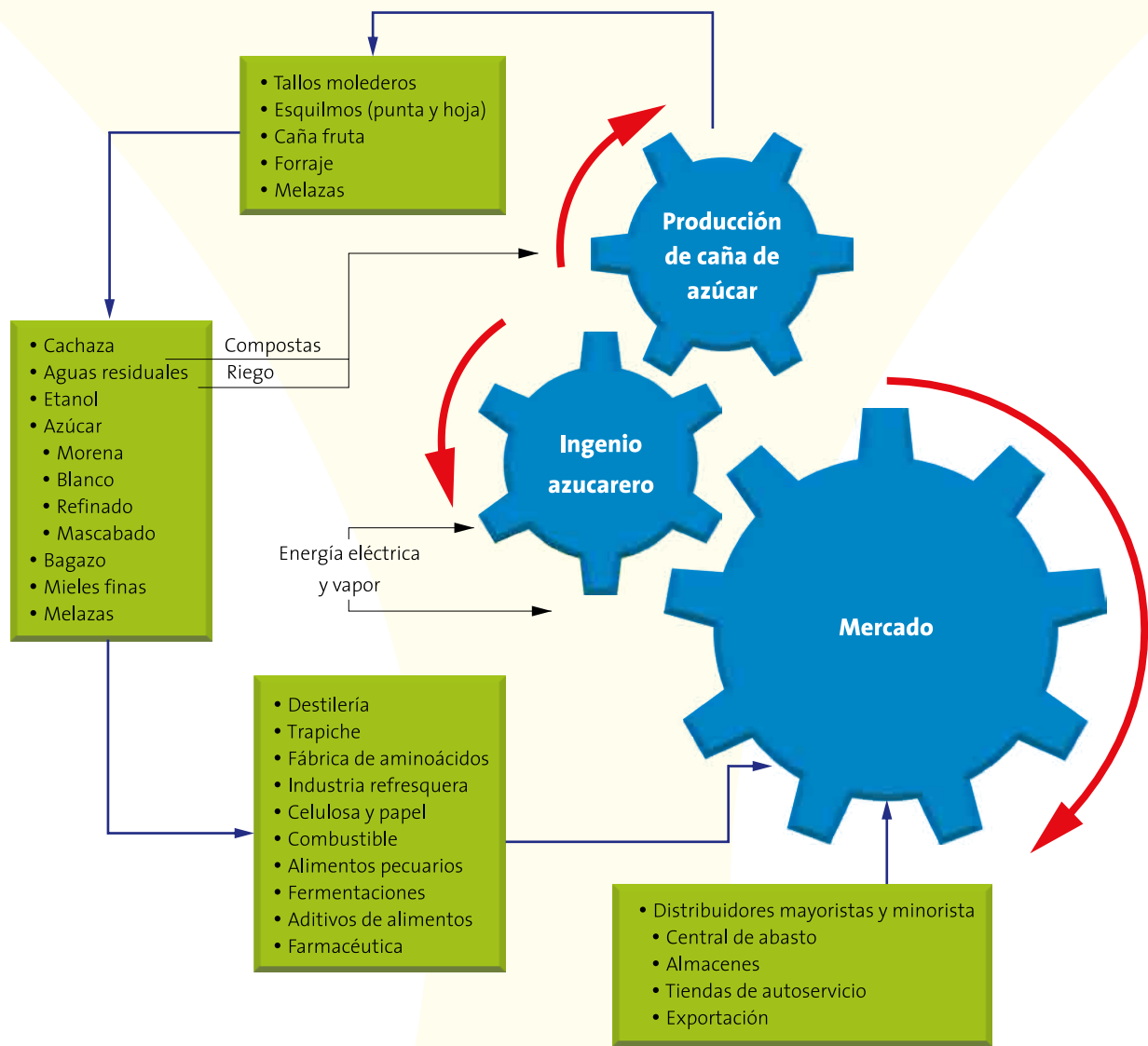


Figura 2. Estructura productiva de la agroindustria cañera.

2005), la agroindustria azucarera entra en crisis y pierde competitividad para hacer frente la competencia internacional.

El azúcar que se consume a nivel doméstico en forma directa y la que se destina a la industria, constituyen la demanda total de azúcar. Los altos costos de producción de ésta, la caída de precios internacionales y hábitos actuales de consumo, hacen que tanto consumidores como industria de alimentos y bebidas (refresquera, galletera, alcoholera y dulcera)

busquen alternativas, como por ejemplo, sustituirla por edulcorantes más baratos (jarabe de maíz de alta fructosa) o que no sean calóricos (aspartame, sacarina, acesulfame K, sucralosa, ciclamato, entre otros). En este sentido, los productores de caña de azúcar demandan políticas que regulen y establezcan el precio del azúcar en el mercado nacional, tales como, poner barreras a su importación, regular los precios del jarabe de maíz de alta fructosa y autorización de apoyos suficientes y oportunos a los productores.

Industrialización de la caña de azúcar

La Figura 3 muestra el proceso de industrialización a partir del jugo de la caña, el cual se clarifica, evapora y cristaliza, para obtener el azúcar y otros subproductos de interés comercial y energético (Chen, 1991). Los principales componentes químicos de la caña de azúcar son la sacarosa y la celulosa; la primera se encuentra en todas las partes de la planta, pero abunda más en el tallo, mientras que la segunda está principalmente en la fibra. Aun cuando se puede seguir obteniendo azúcar de la celulosa, ésta

es insoluble en agua y requiere de mayor procesamiento para obtenerla. Sin embargo, para definir la eficiencia en la extracción de azúcar en el ingenio, deben tomarse en cuenta los siguientes factores: a) la pérdida total de sacarosa, expresada por la pérdida de sacarosa en bagazo, mieles finales, cachaza y algunas otras pérdidas indeterminadas; b) la pureza del jugo mezclado; c) los niveles de fibra en caña. En términos generales, la eficiencia extracción se define como la relación que hay entre el porcentaje de azúcar recuperada en fábrica y el de sacarosa contenida en la caña de azúcar procesada.

La producción del azúcar en los ingenios como parte del proceso de transformación de la caña (Figura 3) inicia desde la recepción de esta última, la cual es cortada manual o mecánicamente en el campo. Para disminuir su porcentaje de materia seca, se realiza la quema como práctica habi-

tual en 75% de la superficie cañera nacional, lo cual es severamente cuestionado por la afectación al medio ambiente, aunque en la industria es considerada una práctica importante, ya que los grados Brix (indicativo del contenido de azúcar) aumentan entre 10-16% en las primeras 48 horas, debido a la pérdida de humedad en los tallos (Larrahondo, 1995). La molienda consiste en pasar la caña, previamente desmenuzada y desfibrada, a una serie de molinos con agua caliente a contracorriente, en el proceso llamado maceración, para obtener la máxima cantidad de sacarosa (94-95%). En algunos ingenios el bagazo remanente (254 kg en promedio con 50% de humedad por tonelada de caña), se emplea como combustible en las calderas y para cubrir las necesidades energéticas propias de la fábrica. También es utilizado como materia prima en la industria papelera o para la obtención de alcoholes (licores de xilosa), acetona, policonasol, aceite, resinas y ceras. Sin embargo, para

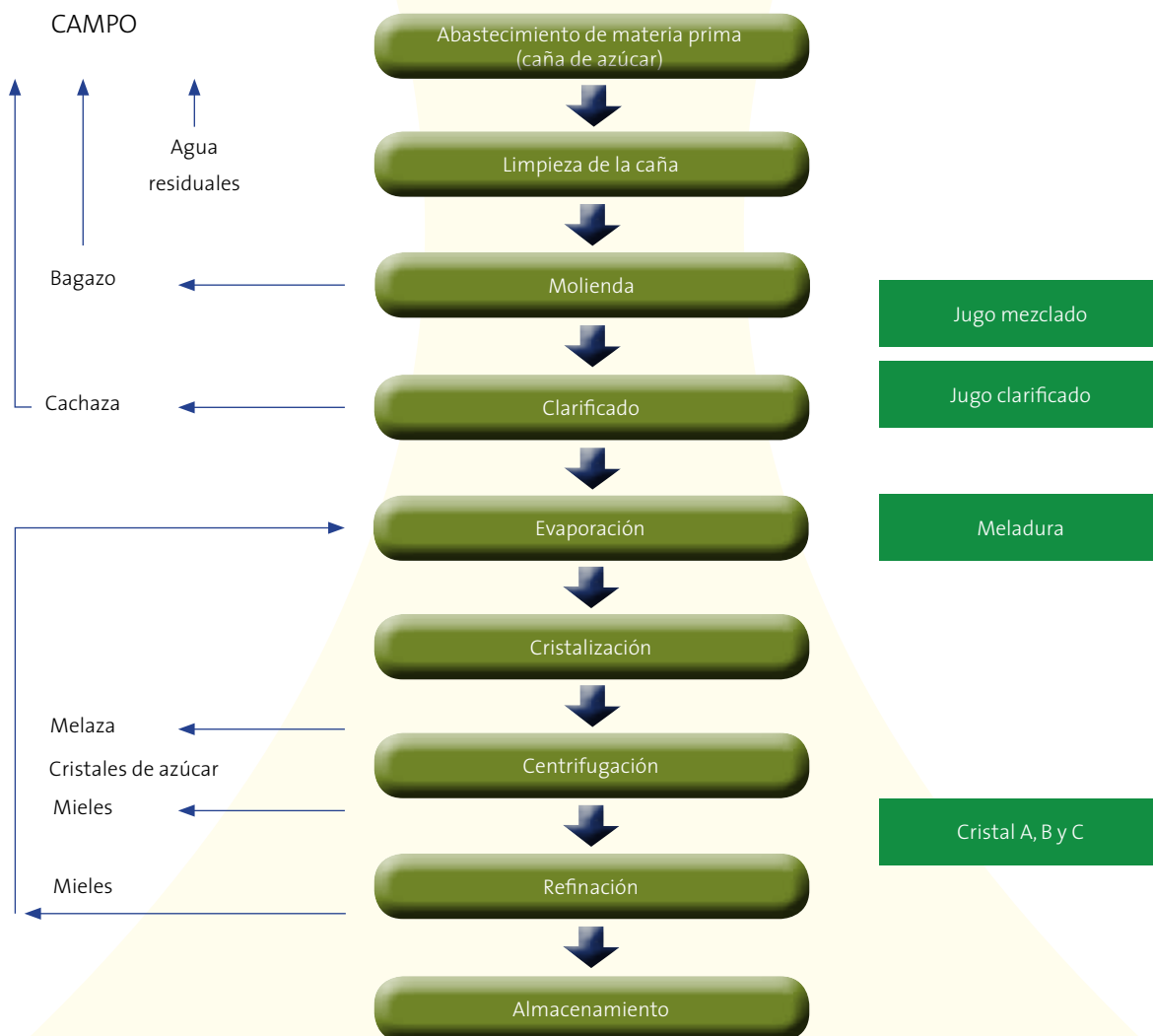


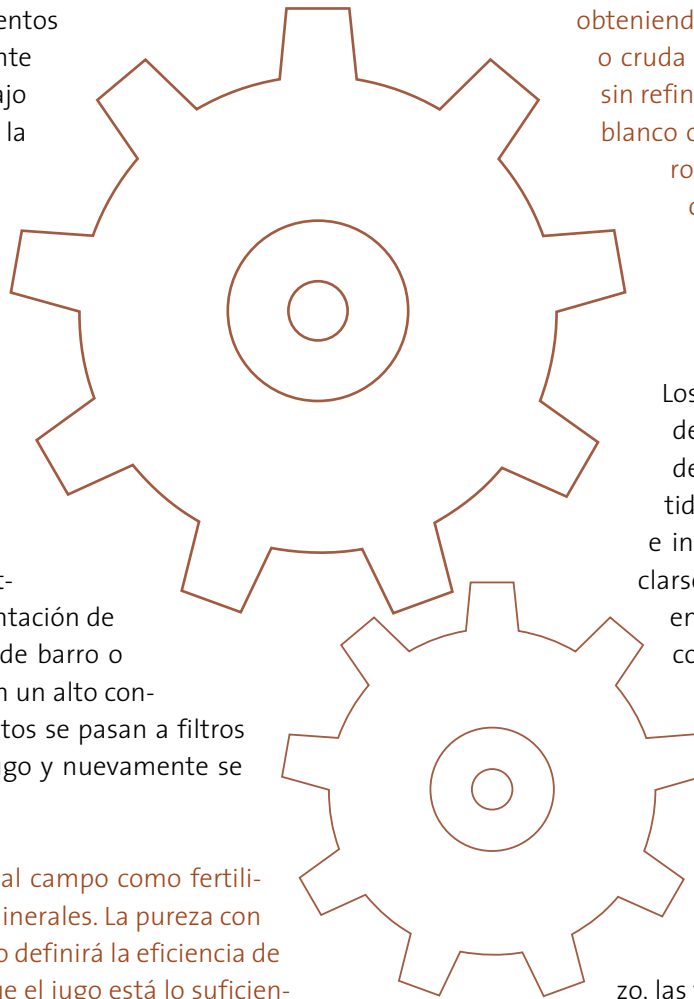
Figura 3. Diagrama de bloques del proceso de industrialización de la caña de azúcar.

la industria alcoholera, utilizar los subproductos de la caña implica demasiado tiempo y gasto energético en comparación con el uso de jugo de caña de azúcar (debido a su alto contenido de celulosa, la cual tiene que desdoblarse a azúcares simples). Además, se generan vinazas, subproductos de la fabricación de etanol en una relación 1:15. Las vinazas son compuestos que tienen una alta carga orgánica y pueden ser potencialmente contaminantes, por lo que requieren tratamientos especiales para su uso. Actualmente se usan como fertilizantes y, bajo un tratamiento anaerobio, para la producción de biogás en la generación de energía eléctrica (Quintero *et al.*, 2006). La clarificación consiste en calentar el jugo de caña y, mediante el proceso de decantación, con el uso de algunos reactivos químicos y aditivos (cal, óxido de magnesio, ácido sulfuroso, carbonato de sodio, ácido fosfórico, polielectrolitos, surfactantes, antiespumantes, etcétera), se lleva a cabo la sedimentación de los sólidos insolubles, en forma de barro o cachaza. Debido a que aún tienen un alto contenido de azúcar, estos compuestos se pasan a filtros rotatorios donde se les extrae jugo y nuevamente se retoma al proceso.

La torta de cachaza se devuelve al campo como fertilizante, por su alto contenido de minerales. La pureza con que se obtenga el jugo mezclado definirá la eficiencia de extracción del azúcar. Una vez que el jugo está lo suficientemente claro, se lleva a cabo el proceso de evaporación para eliminar 80% de agua, y ser concentrado en evaporadores de cinco efectos hasta obtener la meladura, la cual es purificada en los clarificadores y llevada a los tachos (recipientes al vacío de un solo efecto) para iniciar con el proceso de cristalización. La evaporación de la meladura se realiza a alta presión y baja temperatura, para producir una masa cocida conformada por cristales de azúcar y miel, y evitar caramelizar los azúcares. La

masa cocida se somete a procesos de centrifugación para separar los cristales de azúcar y la miel se retorna a los tachos para realizar dos etapas adicionales de cristalización hasta obtener la melaza. Durante el proceso de refinado los cristales de azúcar se lavan con agua para retirar los residuos de miel y posteriormente ser secados y enfriados. En esta etapa del proceso el azúcar se clasifica en función del grado de refinación de la misma, obteniendo ya sea la llamada morena o cruda (jugo de caña cristalizado y sin refinar con 96-98% de sacarosa); blanco o sulfatada (99.5% de sacarosa); y refinada o extra blanca (99.8-99.9% de sacarosa). Una vez que ya está seca y fría, se empaqueta en diferentes presentaciones.

Los residuos y subproductos del procesamiento de la caña de azúcar contienen gran cantidad de nutrientes orgánicos e inorgánicos que pueden reciclarse a la producción primaria en forma de abono. La alta concentración de azúcares de las melazas ha permitido su uso como fuente de energía para el consumo directo de rumiantes y monogástricos (Martín, 2004). Al igual que la caña residual, las puntas o cogollos, el bagazo, las vinazas y la cachaza se usan como forraje o como ingrediente de algunos ensilados, o bien, para su fermentación en el área de la biotecnología (Villar y Montano, 2008). Las mieles finales y los jugos del proceso se emplean en la producción de alcohol, materia prima para las destiladoras, o para la producción de piloncillo o panela, como materia prima en la industria de la repostería, o como endulzante en diversos alimentos. Por otro lado, la caña de azúcar puede ser una alternativa en la producción de etanol, ya que es uno de los cultivos más eficientes como materia prima para biocombustibles (biodiesel, bioetanol y biogás) y podría impactar en reducir los costos de producción (Hira, 2011). Otra alternativa es su venta directa como fruta de estación en los meses navideños o agregando valor con la pasteurización del jugo de caña.



Un aspecto a considerar en su industrialización es la calidad, misma que empieza desde el campo (variedad, tipo de suelo, prácticas de manejo y grado de madurez), lo que repercute en mayores o menores rendimientos en fábrica, sumado a que una vez que la caña se ha cortado, es muy susceptible a deteriorarse, siendo la altura del corte, el grado de quema, el tiempo de espera entre el corte y la molienda, el contenido de basura o material extraño y la acción de microorganismos, los principales factores que afectan la calidad final del azúcar (Larrahondo, 1995). De ahí que debe cosecharse la cantidad exacta, de acuerdo con la capacidad instalada de los ingenios, para evitar su almacenamiento por más de dos días. Chen (1991) menciona que el exceso de almidón o compuestos fenólicos en su jugo, reducen y dificultan la filtración durante el proceso químico y afectan las propiedades de coloración de los jugos. El contenido de almidón es una característica varietal de la caña la cual puede ser reducida mediante prácticas agrícolas como el riego o fertilización con potasio. No obstante, se han diseñado una serie de Normas Mexicanas, a fin de homologar los parámetros de calidad con los internacionales, y asegurar las condiciones de sanidad e inocuidad del azúcar.

CONCLUSIONES

En este contexto, la agroindustria de la caña de azúcar tiene múltiples ventajas para salir de las crisis cíclicas, aunque también son muchos los retos para equilibrar los desajustes desde la producción, la eficiencia de extracción en fábrica y el consumo nacional, que garanticen su viabilidad económica. La diversificación agrícola e industrial parece ser una buena alternativa y para un sistema complejo y dinámico debe analizarse

con un enfoque integral, donde todos los actores involucrados se comprometan a generar políticas públicas oportunas e inversiones específicas, reducción de costos de producción, automatización de procesos, uso de innovaciones para obtener nuevas alternativas productivas, y vinculación con los institutos de investigación, y aumentar la agregación de valor, entre otras.

LITERATURA CITADA

- Aguilar R.N., Galindo M.G., Fortanelli M.J., Contreras S.C. 2011. Factores de competitividad de la agroindustria de la caña de azúcar en México. *Región y Sociedad*, 23: 261-297.
- Campos-Ortiz F., Oviedo-Pacheco M. 2013. Estudio sobre la competitividad de la industria azucarera en México. Documento de Investigación. Banco de México. México, D. F. 60 p. <http://www.banxico.org.mx/publicaciones-y-discursos/publicaciones/documentos-de-investigacion/banxico/%7B6990D66E-0967-353F-156B-39C97972A27E%7D.pdf>
- Chen J.C.P. 1991. Manual del azúcar de caña. Editorial Limusa. México, D. F.
- CONADESUCA. 2013. Sistema InfoCaña. Reportes de cierre. <http://www.campomexicano.gob.mx/azcf/reportes/reportes.php?tipo=CIERRE>
- FIRA. 2010. Producción Sostenible de Caña de Azúcar en México. En: Boletín Informativo, No. 11. México.
- Domínguez R.L. 2005. Desarrollo regional y competitividad: la agroindustria azucarera en México. *Revista de Ciencia Sociales y Humanidades*, 15: 227-250.
- García C.R. 2012. La agroindustria de la caña de azúcar hacia el 2012. Ponencia de Seminarios de Investigación 2012. Colegio de Postgraduados. Campus Córdoba. México.
- Hira A. 2011. Sugar Rush: Prospects for a Global Ethanol Market. *Energy Policy*, 39: 6925-6935.
- Katz M. 1999. La Constitución y el desarrollo económico de México. Cal y Arena. México. 562 p.
- Larrahondo J.E. 1995. Calidad de la caña de azúcar. En: CENICAÑA. El cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia. pp. 331-354.
- Martín P.C. 2004. La alimentación del ganado con caña de azúcar y sus subproductos. EDICA, La Habana, Cuba.
- Quintero R., Cadena S., Briceño C. 2006. Proyectos de investigación sobre usos y manejos de vinazas. CENGICAÑA.
- SIAP-SAGARPA. 2012. SERVICIO DE INFORMACION AGROALIMENTARIA Y PESQUERA. <http://www.siap.gob.mx/>
- Villar J., Montano R. 2008. Posibilidades de producción de alimento animal en la agroindustria azucarera. Diversificación. Congreso Internacional sobre los Derivados de la Caña de Azúcar, La Habana, Cuba.



Conservación de recursos genéticos de Caña de azúcar (*Saccharum* spp.)

Bello-Bello, J.J.¹; Morales-Ramos, V.¹; Gómez-Merino, F.C.¹

¹Colegio de Postgraduados-Campus Córdoba. Carretera Federal Córdoba-Veracruz km 348, Congregación Manuel León, Municipio de Amatlán de los Reyes, C. P. 94946, Veracruz, México.

*Autor responsable: jericobellol@gmail.com

RESUMEN

Los recursos genéticos de caña de azúcar constituyen la base del desarrollo de programas de mejoramiento genético y producción de semilla certificada en esta especie. Cuando se habla de conservación de los recursos fitogenéticos, el objetivo es preservar la variabilidad genética de las poblaciones seleccionadas con la mayor integridad posible. Las estrategias de conservación de germoplasma pueden dividirse en métodos *in situ* y *ex situ* con sus respectivas ventajas y desventajas, por lo que se considera que en conjunto, ambos métodos son complementarios, no excluyentes para lograr la conservación de los recursos genéticos de caña de azúcar.

Palabras clave: Bancos de germoplasma, conservación, *in situ*, *ex situ*.

INTRODUCCIÓN

De acuerdo con el Convenio sobre Diversidad Biológica (CDB, 2010), el término de recursos genéticos (RG) se refiere a todo aquel material de origen vegetal, animal o microbiano que contiene genes con valor actual o potencial. Los objetivos del CDB son: conservación de la biodiversidad, uso sostenible de sus componentes



y participación justa y equitativa de los beneficios resultantes de la utilización de los RG. Estos recursos forman parte de la diversidad biológica, conocida como biodiversidad. Instituciones como la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés) menciona que los RG de las plantas cultivadas y animales domésticos constituyen la base biológica de la seguridad alimentaria mundial; y coinciden con ésta, Bioersity International (antes Instituto Internacional de Recursos Fitogenéticos-IPGRI), organismo internacional autónomo, de carácter científico, que busca la conservación y el aprovechamiento de la agrobiodiversidad, y el Centro Nacional de Recursos Genéticos (CNRG) que surge como parte de la estrategia nacional para el resguardo de la seguridad agroalimentaria y ambiental, al salvaguardar de forma apropiada y sistematizada los recursos genéticos más importantes del país (CNRG, 2013). Esta revisión está enfocada a los recursos genéticos vegetales, llamados recursos fitogenéticos para la alimentación y la agricultura (RFAA), definidos como cualquier material de origen vegetal, incluido el reproductivo y de propagación vegetativa que contienen unidades funcionales de la herencia, y tiene valor real o potencial para la alimentación y la agricultura (SNICS, 2013). La conservación de los RFAA permite preservar el patrimonio en la biodiversidad de un país, e incluye las variedades mejoradas o modernas caracterizadas por sus altos rendimientos y homogeneidad genética. Estas características han provocado reducción de la variabilidad genética de las especies cultivadas, ocasionando erosión genética (pérdida de diversidad), originada principalmente por el reemplazo de variedades, limpieza de terrenos, sobreexplotación de especies, presión poblacional, degradación ambiental, sobreexplotación de terrenos y pastizales, políticas gubernamentales y cambios en los sistemas agrícolas tradicionales. Los recursos genéticos de caña de azúcar (*Saccharum* spp.) se pueden agrupar, de acuerdo a su uso como germoplasma, en nuevas va-

riedades, variedades caducas, cepas reproductoras, selecciones locales y formas silvestres (Cuadro 1); actualmente existen diferentes métodos de conservación de germoplasma que pueden ser utilizados en los programas de mejora genética.

Métodos de conservación de germoplasma

El método a seguir para la conservación de germoplasma depende de la naturaleza del material vegetal y está definido por la duración de su ciclo de vida, el modo de reproducción y el tamaño de sus individuos. Las estrategias de conservación de germoplasma son métodos *in situ* y *ex situ*; los primeros se basan en mantener las plantas en su hábitat natural e incluye la conservación en parques nacionales y reservas ecológicas, lo cual requiere de un considerable espacio físico. Además, las plantas se encuentran expuestas a las inclemencias del cambio climático, desastres naturales y riesgo de incendios.

Los métodos de conservación *ex situ* se basan en el mantenimiento del material biológico en colecciones de plantas (en campo, vivero o jardines botánicos), bancos de semillas y bancos de cultivo *in vitro*. Las colecciones de plantas requieren altos costos para su manejo, por mano de obra para las labores culturales y control permanente de plagas, enfermedades y malezas. Los bancos de semillas presentan mayor capacidad en cuanto al número de especies que se pueden conservar; sin embargo, este sistema no es aplicable a especies de reproducción vegetativa (plátanos, papa, piña y caña de azúcar, entre otras) y de especies cuyas semillas pierden rápidamente la viabilidad cuando son sometidas a procesos de deshidratación (semillas recalcitrantes). A pesar de todas estas desventajas, actualmente los bancos de semillas son el principal sistema para la conservación de germoplasma vegetal. Por ello, se han propuesto nuevos métodos para conservar los recursos genéticos en una forma más eficiente.

Cuadro 1. Tipos de germoplasma de caña de azúcar (*Saccharum* spp.)

Variedades	Características
Nuevas variedades	Genotipos productivos adaptados a regiones de reducida extensión y características ecológicas delimitadas, generalmente vulnerables ante las plagas, enfermedades o condiciones climáticas adversas. No están amenazadas, pero pueden estarlo en cualquier momento.
Variedades caducas	Genotipos que ya no son utilizados por haber sido desplazados por nuevas variedades.
Cepas reproductoras	Genotipos que nunca llegaron a utilizarse de manera intensiva, pero que sirvieron de progenitores de nuevas variedades.
Selecciones locales	Variedades caducas seleccionadas por productores por características definidas. Fuerte tendencia a sustituirlos por cultivares modernos.
Formas silvestres de especies cultivadas	Progenitores ancestrales de nuevas especies, como lo son <i>Saccharum officinarum</i> L. y <i>S. spontaneum</i> L.

Una nueva alternativa utilizada para la conservación de germoplasma *ex situ* es el uso de la biotecnología, que dentro de sus bases incluye al cultivo de tejidos vegetales (CTV) que permiten el establecimiento, manipulación y desarrollo, bajo condiciones artificiales y controladas de células, tejidos u órganos vegetales.

Los métodos de cultivo *in vitro* para la conservación de plantas han sido utilizados en especies que necesitan mantenerse como clones; esto se logra generando cambios en el ambiente de cultivo que permiten mantener o reducir parcial o totalmente el crecimiento de las células y de los tejidos vegetales. El objetivo es mantener o aumentar al máximo el período de permanencia del material en cultivo, y en este sentido se han desarrollado los siguientes sistemas de conservación *in vitro* de germoplasma vegetal:

Conservación a corto plazo. Consiste en mantener el material vegetal mediante subcultivos constantes, lo que permite mantener especies o variedades por tiempo indefinido, pero con el inconveniente de realizar subcultivos frecuentes. Esto dependerá de la especie, vía de regeneración y sistema de cultivo, donde el tiempo para cada subcultivo puede variar de entre 15 días hasta tres meses.

Conservación a mediano plazo. También conocido como almacenamiento en condiciones de crecimiento mínimo, consiste en retardar el crecimiento de los cultivos *in vitro* con la finalidad de incrementar el tiempo entre subcultivos lo más posible. Para disminuir la tasa de crecimiento de los tejidos sin afectar su viabilidad, además del control de las condiciones de luz y temperatura, se han empleado sistemas de conservación mediante el uso de inhibidores del crecimiento, como el ácido abscísico. Una vía alterna para disminuir el crecimiento *in vitro* consiste en el uso de reguladores osmóticos, como el manitol o sorbitol. Estos compuestos reducen el potencial osmótico del medio de cultivo y, en consecuencia, la disponibilidad de agua para los tejidos.

Conservación a largo plazo. En este caso se utiliza el método llamado crioconservación, que consiste en mantener los tejidos congelados en nitrógeno líquido por tiempo indefinido, a temperaturas extremadamente bajas (usualmente -196°C). El uso de la crioconservación para el almacenamiento de germoplasma ofrece varias ventajas en relación con las técnicas tradicionales, pues permite la conservación a largo plazo (años), con bajos costos de mantenimiento,

fácil manipulación de las muestras y no depende del suministro eléctrico..

Situación de los recursos genéticos de caña de azúcar en México

En México, el Centro de Investigación y Desarrollo de la Caña de Azúcar (CIDCA), ubicado en Tuxtla Chico, Chiapas, México, lleva a cabo el Programa de Mejoramiento Genético de la Caña de Azúcar. Este Centro mantiene un banco de germoplasma compuesto por 2,768 variedades, de las cuales 810 son mexicanas y 1923 extranjeras. Cuenta también con 250 variedades clasificadas por sexo, las cuales constituyen el banco de cruzamiento (CNIAA, 2011).

El Programa de Intercambio de Importación de Variedades que mantiene la Cámara Nacional de las Industrias Azucarera y Alcoholera (CNIAA) con países productores de caña de azúcar, permite incorporar nuevos materiales a los programas de selección que se conducen en México. Estos materiales deben permanecer en la estación cuarentenaria de Tizimín, Yucatán, previo a su incorporación a los programas de mejoramiento que se llevan a cabo en el país. Debido al éxito del programa de intercambio de variedades, se han realizado convenios interinstitucionales internacionales, como CENICAÑA de Colombia, FUNDACAÑA de Venezuela y CENGICAÑA de Guatemala, con el fin de elaborar programas de cruzamientos e intercambio de germoplasma. El material genético que se recibe de otros países es evaluado fitosanitariamente durante 18 meses en la estación cuarentenaria; posteriormente, el material sano es remitido a los diferentes Campos Experimentales del país, así como al CIDCA, que lo ingresa al Banco de Germoplasma. El programa de intercambio de material genético se ha realizado con países como Argentina, Australia, Barbados, Brasil, Colombia, Cuba, Costa Rica, China, Ecuador, Egipto, Estados Unidos, India, Perú, Puerto Rico y Venezuela, principalmente. Lo anterior ha permitido ampliar la base genética del programa de mejoramiento de la caña de azúcar en México (CNIAA, 2011) mediante mantenimiento de colecciones de plantas en campo, lo que corresponde al método de conservación *ex situ* (Figura 1).

En México, instituciones públicas y privadas han aplicado técnicas de CTV que les han permitido conservar reducidas colecciones de germoplasma, a fin de lograr el crecimiento lento de los cultivos y poder conservarlos a corto y mediano plazo. En el campo de la crioconservación vegetal, los avances recientes solo han estado dirigidos al desarrollo de la investigación científica. Sin embargo, se han dado pasos importantes para iniciar la implementación de esta



Figura 1. Banco de germoplasma del Centro de Investigación y Desarrollo de la Caña de Azúcar (CIDCA).

conservación a corto plazo de caña de azúcar, a través de subcultivos bimestrales en medio de proliferación (Caamal-Velázquez y Bello-Bello, 2014). La Figura 2b muestra la conservación a mediano plazo de caña de azúcar mediante el uso de sorbitol como agente osmótico, manteniendo subcultivos semestrales (Bello-Bello *et al.*, 2014), mientras que la Figura 2c muestra un ejemplo de tejido de caña de azúcar encapsulado, previo a la conservación en nitrógeno líquido.

Una característica de la conservación *in vitro* a corto, mediano y largo plazo es que al momento de requerirse el material vegetal, únicamente tiene que ser transferido a un medio de proliferación para obtener un gran número de plantas en poco tiempo (Figura 3). A pesar de que estas técnicas resultan de gran utilidad para la conservación de germoplasma, el cultivo *in vitro* puede llegar a producir variaciones genéticas, epigenéticas o ambas durante la regeneración de plantas, comúnmente llamadas variación somaclonal; por ello, en caña de azúcar se recomienda realizar hasta diez ciclos de cultivo (Caamal-Velázquez y Bello-Bello (2014).

tecnología y, en el mediano plazo, se espera lograr resguardar recursos genéticos de relevancia agroalimentaria, contribuir a la protección de las especies amenazadas, prevenir su pérdida y aportar material genético de utilidad que brinde otras opciones a los programas de mejora, de cruzamiento y de obtención de nuevas variedades (González-Arno *et al.*, 2013).

Con el fin de contar con un banco de germoplasma activo, de varia-

des con uso potencial para la región de Veracruz, México, el Laboratorio de Cultivo de Tejido del Colegio de Postgraduados *Campus* Córdoba ha iniciado un programa de conservación *in vitro* de variedades de caña de azúcar a corto y mediano plazo, con el fin de fortalecer el programa de intercambio de variedades que mantiene la Cámara Nacional de las Industrias Azucarera y Alcohólica (CNIAA) con otros países. Por ejemplo, la Figura 2a muestra la

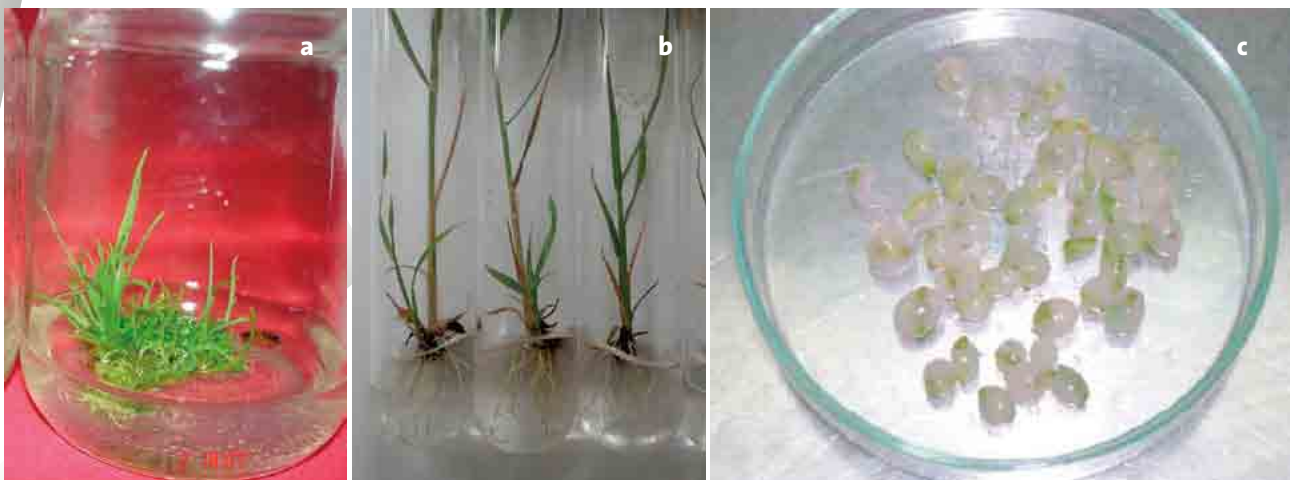


Figura 2. Métodos de conservación *in vitro* de caña de azúcar (*Saccharum* spp.). a) Conservación a corto plazo en medio de proliferación; b) conservación a mediano plazo mediante el uso de agentes osmóticos; y c) tejido encapsulado, previo a la criopreservación.



Figura 3. Vitroplantas de caña de azúcar obtenidas después de un proceso de conservación *in vitro* (mediano plazo). a: Brotes individuales *in vitro*. b: vitroplantas durante su climatización.

CONCLUSIONES

Los recursos genéticos de caña de azúcar constituyen un reservorio de información genética empleado en programas de mejoramiento. Los métodos para asegurar su conservación son diversos y cada uno de ellos posee ventajas e inconvenientes. Por ello, se considera que el conjunto de técnicas de conservación *in situ* y *ex situ* son métodos complementarios, no excluyentes, para lograr el objetivo común de preservar los recursos fitogenéticos, como parte esencial de una estrategia global para la conservación de biodiversidad. El hecho de que un cultivar sea sustituido por otro puede considerarse como normal o incluso benéfico, ya que las nuevas variedades presentan muchas ventajas, pero la pérdida total de la variabilidad genética existente debe evitarse cuando los materiales criollos se sustituyen con variedades mejoradas.

LITERATURA CITADA

- Bello-Bello J., Poot-Poot W., Iglesias-Andreu L., Caamal-Velázquez H., Díaz Sánchez M. 2013. Effect of osmoregulators vs growth inhibitors on *in vitro* conservation of sugarcane (*Saccharum* sp.). AGROCIENCIA (artículo sometido).
- Caamal-Velázquez H., Bello-Bello J. 2014. Micropropagación de caña de azúcar (*Saccharum* spp.). Colegio de Posgraduados. 23p Montecillo, Texcoco, Estado de México, México.
- CDB. 2010. Convenio sobre Diversidad Biológica. <<http://www.cbd.int/>> (consultado enero 2014).
- CNIAA. 2011. Cámara Nacional de las Industrias Azucarera y Alcohólera <www.camaraazucarera.org.mx/> (consultado enero 2014).
- CNRG. 2013. Centro Nacional de Recursos Genéticos, 2013). <<http://www.cnrgr.com.mx/>> (consultado enero 2014).
- González-Arnao M.T., Gámez-Pastrana R., Martínez-Ocampo Y., Valdés-Rodríguez S., Mascorro J.O., Osorio-Saenz A., Pastelin-Solana M., Guevara-Valencia M., Cruz-Cruz C.A. 2013. Estado actual de la crioconservación vegetal en México. En: Crioconservación de Plantas en América Latina y El Caribe. González-Arnao María Teresa y Engelmann Florent (Eds). IICA 204 p. San José, Costa Rica.
- SNICS. 2013. Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas. <www.sagarpa.gob.mx/snics/> (consultado enero 2014).



VALIDACIÓN DE DOSIS GENERADAS POR EL SISTEMA DE FERTILIZACIÓN SIRDF PARA CAÑA DE AZÚCAR (*Saccharum officinarum*)

Salgado-García, S.¹; Castelán-Estrada, M.^{1*}; Aranda-Ibáñez, E.M.¹; Ortiz-García, C.F.¹; Ortiz-Laurel, H.²; Lagues-Espinoza, L.C.¹; Mendoza-Hernández, J.H.R.¹; Córdova-Sánchez, S.³

¹Campus Tabasco, Colegio de Postgraduados. ²Campus Córdoba Colegio de Postgraduados. Carretera Federal Córdoba-Veracruz km 348, Congregación Manuel León, Amatlán de los Reyes, C.P. 94946, Veracruz, México. ³Grupo MASCAÑA-LPI-2: AESS. Centro Maya-UNACH.

* Autor responsable: mcastelan@colpos.mx

RESUMEN

Se validaron once dosis de fertilización para el cultivo de caña de azúcar generadas mediante el Sistema Integral para Recomendar Dosis de Fertilización (SIRDF). Se establecieron experimentos en 11 subunidades de suelo de la zona de abastecimiento del Ingenio Pujiltilic, en Chiapas, México, para comparar las dosis del SIRDF y las usadas por los productores, además de una composta en dosis de 10 t ha⁻¹. En cada parcela se aplicaron los tratamientos dos meses después de la brotación del cultivo; cada tratamiento se fraccionó en tres réplicas que se consideraron como repeticiones. Cuatro meses después de la emergencia se hizo un diagnóstico foliar en campo. A partir de noviembre 2011, se inició el seguimiento de la madurez. El rendimiento se estimó a partir de muestreos de tallo moledero y la calidad de los jugos se determinó a partir de diez tallos por repetición. Las variables (madurez, rendimiento y calidad de jugos) se analizaron con un diseño factorial 8×3, debido a la cosecha anticipada de algunas parcelas. Los resultados mostraron que las dosis de fertilizantes-SIRDF fueron superiores respecto a las que aplican los productores, incluyendo aquellas que tuvieron aplicación de cachaza en todas las subunidades de suelo. La calidad de los jugos no fue modificada por ningún tratamiento. Nutritionalmente se observó que la composta y las dosis SIRDF fueron satisfactorias en cuanto a nitrógeno y potasio para el cultivo; sin embargo, todos los suelos registraron deficiencias de potasio. Los rendimientos más bajos se asociaron a suelos Fluvisol, Cambisol y Vertisol, que retienen mucha humedad.

Palabras clave: calidad de jugos, nutrición, rendimiento de tallo.

INTRODUCCIÓN

El Ingenio Pujiltic en Chiapas, México, cultivó 15,560 hectáreas de caña durante la zafra 2008/2009, con un rendimiento medio de 89 t ha⁻¹ de tallo moledero y un rendimiento de 12,283 kg ha⁻¹ de azúcar cruda; un porcentaje de sacarosa de 14.57%, con un precio pagado al productor de \$477.68 por tonelada de tallo moledero (Cañeros, 2011). En las 10 últimas zafras el rendimiento ha sido menor de 90 t ha⁻¹ y aun así es considerablemente superior al promedio nacional (77 t ha⁻¹). Existen alternativas de manejo para contribuir a lograr rendimientos mayores a 95 t ha⁻¹; sin embargo, se requeriría realizar cambios en el manejo de dosis de fertilización y modificaciones tecnológicas en el sistema de producción, además de capacitación a productores y técnicos de campo.

En un estudio realizado en el área del ingenio Pujiltic por Salgado *et al.* (2008) se generaron 11 dosis de fertilización mediante el Sistema Integrado para Recomendar Dosis de Fertilizantes (SIRDF); cada dosis correspondió a una subunidad de suelo del área de abastecimiento del Ingenio. Como parte de ese estudio se determinaron cinco polígonos de Thiessen, donde la precipitación va de 920 a 1250 mm anuales (Salgado *et al.*, 2008). Para la zona en mención, algunos autores

reportan que las aplicaciones de 150 m⁻³ ha⁻¹ de vinaza, 15 t ha⁻¹ de composta y la dosis 180N-80P-80K producen rendimientos de 100, 111 y 133 t ha⁻¹ de caña, respectivamente. La vinaza y composta de cachaza incrementaron los niveles de materia orgánica, potasio (K) y fósforo (P) en un suelo Gleysol Mólico y, a este respecto, autores como Hernández *et al.* (2008) recomiendan aplicar la vinaza con el riego, siempre y cuando aquella no contenga aguas residuales. Con base en lo anterior, se evaluaron los resultados del estudio SIRDF (Salgado *et al.*, 2008), además de incluir la composta dentro de la evaluación como parte del proyecto “Programa Integral de Actualización en la Transferencia de Tecnología a Productores de Caña de Azúcar en el Estado de Chiapas”, con el fin de validar las dosis de fertilizantes-SIRDF, así como la eficiencia de la composta como fuente nutricional en el cultivo de caña de azúcar en el Ingenio Pujiltic.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación fue desarrollada durante la zafra 2011/2012 en el Ingenio Pujiltic, Chiapas, México, donde la caña de azúcar es cultivada con riego por gravedad. Con la participación de agricultores cooperantes de la zona se establecieron experimentos (Figura 1), con superficies de entre 1 a 3 ha⁻¹, y cada una se localizó sobre una subunidad de suelo de las once que existen en el área de abastecimiento. Los

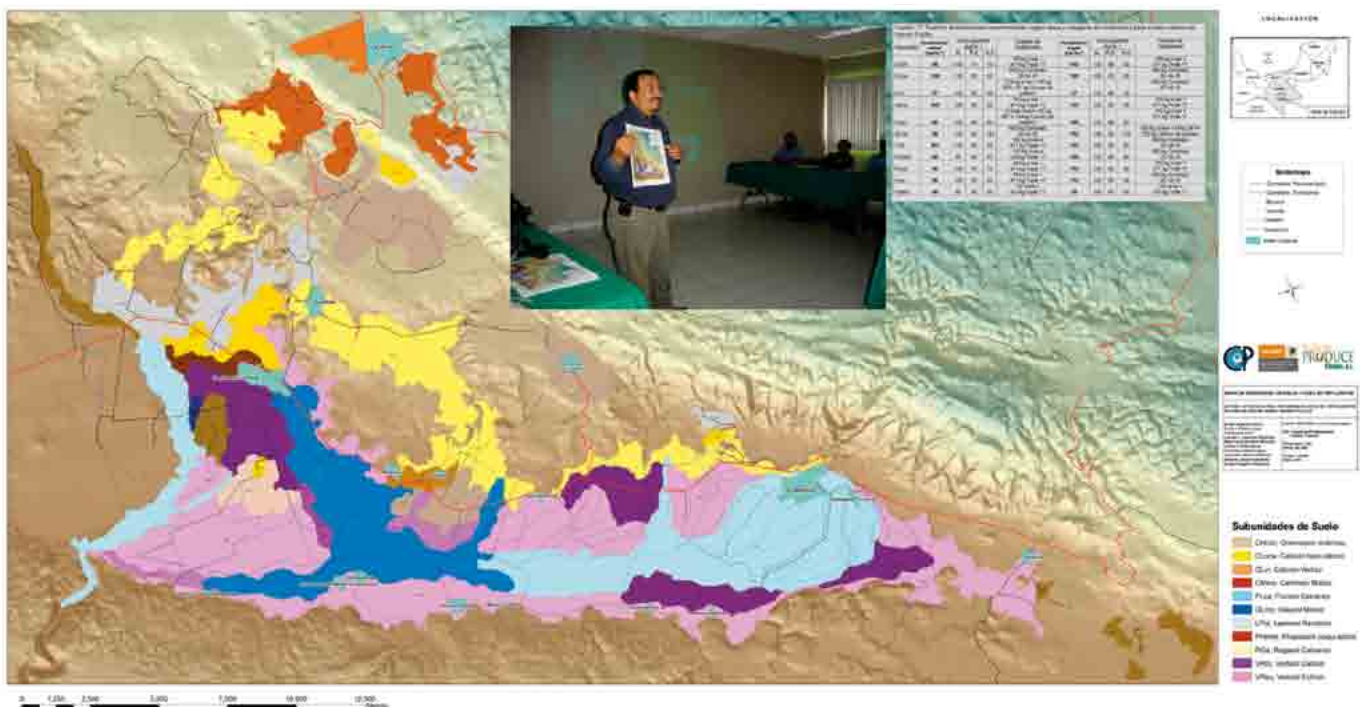


Figura 1. Mapa de ubicación de las áreas y dosis de fertilización recomendadas según la subunidad de suelo en el área de abastecimiento del Ingenio Pujiltic, obtenido mediante el Sistema Integrado para Recomendar Dosis de Fertilizantes (SIRDF) (Salgado *et al.*, 2008).

tratamientos fueron: composta de cachaza 10 t ha^{-1} ; dosis-SIRDF, según la subunidad edáfica, y dosis de fertilización aplicada por el productor.

Los tratamientos se aplicaron en franjas, dentro de cada parcela, con cuya área se calculó la dosis correspondiente. La composta fue envasada en costales de 40 kg y entregada a los productores en sus predios para aplicar según la disponibilidad de riego o al inicio de las lluvias (Figura 2). Se verificó que en mayo de 2011 todos los tratamientos de fertilización hubieran sido aplicados en campo. Se analizaron muestras de composta para determinar sus propiedades físicas y químicas, así como el aporte nutricional (NMX-FF-109-SCFI-2007).

Manejo agronómico y variables de estudio. El manejo de las parcelas experimentales estuvo a cargo de cada agricultor cooperante; de acuerdo con el estado de la plantación, en algunos casos se hizo resiembra, cultivo con ganchos, control de malezas o fertilización. Los registros de datos y muestreos fueron quincenales. En cada tratamiento se establecieron tres réplicas que se consideraron como repeticiones para seguir la evolución de la madurez y estimar el rendimiento de tallo moledero.

Diagnóstico foliar. A los cuatro meses de edad se determinó el estado nutricional del cultivo. En cada tratamiento se tomaron 15 hojas en un recorrido en zig-zag, colectando la hoja número 4, a las cuales se les eliminó base, punta y nervadura (Figura 2 C) y se transportaron al laboratorio donde fueron secadas en estufa a $70 \text{ }^\circ\text{C}$ por 72 horas y molidas para determinar la concentración NPK. En total se colectaron 33 muestras foliares (11 parcelas \times 3 tratamientos).



Figura 2. Detalles de la aplicación de composta y medición de algunas variables de estudio para evaluar las dosis de fertilización del SIRDF en el área del Ingenio Pujiltil durante marzo de 2012. A: Llenado de costales de composta en el módulo de la delegación de cañeros. B: Aplicación de composta. C: Muestreo foliar. C: Muestreos de jugo en tallo para determinación de grados Brix. D: Muestreo de tallo moledero para estimación del rendimiento.

Madurez del cultivo. Los muestreos para determinar madurez se iniciaron el 22 de diciembre de 2011 y concluyeron el 3 de abril de 2012, de acuerdo con la fecha de corte programada por el Ingenio. El jugo de la parte media del tallo se extrajo mediante un punzón muestreador, para hacer la lectura de grados Brix con un refractómetro manual marca Atago (Figura 2 D) en cinco tallos por repetición.

Rendimiento. En dos surcos de cada tratamiento se midieron 10 m lineales y se contó el número de tallos en cada tramo. Se cortaron cinco tallos completos y se registró su peso total; en seguida se eliminó la punta y la paja para registrar el peso del tallo moledero neto (Figura 2 E). A partir de estos datos se calculó el rendimiento de tallo moledero por hectárea (Valladares y Zamorano, 1976).

Calidad de jugos. La calidad incluye valores de grados Brix, sacarosa, humedad, pureza, azúcares reductores, fibra e índice de madurez. El muestreo se realizó en cada tratamiento, tres días antes de la cosecha; se tomó una muestra de 10 tallos, con tres repeticiones. Las determinaciones de la calidad del jugo se hicieron en el laboratorio de campo del Ingenio Pujiltic, siguiendo el método de la Sección 8-10.

Análisis estadísticos. Las variables madurez, rendimiento y calidad de jugos fueron analizadas como un factorial 8×3 (ocho parcelas, tres tratamientos), con tres repeticiones en cada experimento, debido a la cosecha anticipada de dos parcelas y una quema accidental del cañaveral. Las pruebas de comparación múltiple de medias se hicieron mediante Tukey ($\alpha=0.05$), utilizando el software SAS 9.13.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de las compostas. El pH encontrado en las compostas de cachaza (CCA) y lombricomposta (LBC) se clasificó como moderadamente alcalino (Cuadro 1) atribuible al origen calcáreo de los suelos del área del Ingenio Pujiltic (Salgado *et al.*, 2006). La conductividad eléctrica (CE) fue más

baja en la CCA que en la LBC; se considera que el nivel de CE de la LBC podría afectar el desarrollo de cultivos sensibles a la salinidad a mediano plazo. Respecto al nitrógeno total, la LBC registró más N total que la CCA lo cual puede atribuirse a la adición de estiércol bovino durante el proceso de composteo. Sin embargo, es necesario revisar el costo económico de incorporar el estiércol bovino, ya que solo aporta 0.14% de N.

Materia orgánica (MO, %). La CCA presentó más contenido de MO que la LBC, ya que ésta se elabora a partir de CCA+estiércol; por lo tanto, este material pasa por un doble proceso de descomposición microbiana (Cuadro 1). El principio del lombricomposteo es que las lombrices degradan los residuos orgánicos; por lo tanto, la cachaza se debe enfriar, mezclar con el estiércol y, a partir de esta mezcla, alimentar a las lombrices.

Carbón orgánico (C). Este elemento sigue una tendencia similar a la MO, por lo que la CCA aporta más C al suelo. La relación C/N se clasifica como mediana para CCA y baja para LBC, pero al continuar el proceso de mineralización, ambas seguirán aportando N inorgánico al suelo.

Fósforo (P) y Potasio (K). El contenido de P en ambas compostas es alto y supera al valor de 1.3% reportado para el producto comercial Fernalol Humus de Lombriz® (FHL, 2011). El estiércol no contribuye a incrementar el contenido de P. Por otra parte, ambas compostas presentan bajo contenido de K cuando se comparan con el FHL, cuyo contenido es de 1.7%. Es recomendable que la composta se adicione con cenizas, bagazo y vinaza para enriquecer el contenido de K. Calcio (Ca) y Magnesio (Mg). El contenido de Ca es alto en ambas compostas, lo cual se debe a la naturaleza calcárea del suelo, mientras que el FHL y CCA se ubican en rangos de 1.2 a 2.2% de Ca (Hernández *et al.*, 2007). El contenido de Mg resultó bajo comparado con la CCA elaborada en el Ingenio de Pujiltic, cuyo valor fue de 0.33% de Mg. Los contenidos de Hierro (Fe), Cobre (Cu), Zinc (Zn) y Manganeseo (Mn)

Cuadro 1. Propiedades fisicoquímicas de muestras de composta, lombricomposta y humus provenientes de la unidad de composteo del Ingenio Pujiltic.

Muestras	pH	CE dS m ⁻¹	SST Mg L ⁻¹	Nt	MO	C	C/N	P	K	Ca	Mg	Fe	Cu	Mn	Zn
				(% de peso seco)								(ppm base peso seco)			
Composta	7.7	1.5	nd	1.62	41.6	24.2	14.9	2.56	0.21	6.75	0.18	3770	140	145	60
Lombricomposta	7.4	2.9	nd	1.76	16.9	9.8	5.5	2.40	0.20	6.45	0.16	3525	135	141	88
Humus	7.5	6.8	0.34	0.02	nd	Nd	nd	nd	0.17	0.37	0.05	20	1.0	1.0	0.3

nd = no determinado.

se consideran adecuados en ambas compostas y superan a la CCA usada por Hernández *et al.*, (2007).

El efluente de la lombricomposta (ELBC) resultó con bajo valor nutricional (Cuadro 1) y alta CE que indica salinidad y pudiera afectar el desarrollo

de cultivos sensibles. Es posible que el material contenga algunas hormonas que favorecen el crecimiento de cultivos (aportadas por el tracto digestivo de la lombriz), pero es necesario determinar las posibles bondades como fertilizante líquido o promotor del crecimiento.

Diagnóstico foliar. Los resultados indican que los tratamientos de fertilización aportan N y P en cantidades suficientes para nutrir al cultivo de caña de azúcar en el área de influencia del Ingenio Pujilic (Cuadro 2). Únicamente en el suelo Calcisol vértico la concentración de N estuvo en el

Cuadro 2. Valores de concentración foliar NPK en caña de azúcar cultivada en parcelas de validación de las dosis de fertilización generadas mediante el Sistema Integral para Recomendar Dosis de Fertilizantes (SIRDF) en el Ingenio Pujilic.

Parcela	Productor / Subunidad de Suelo	Tratamiento	N	P	K
			(%)		
1	Norberto E. Nájera Montes de O. Calcisol vértico	Composta 10 (t ha ⁻¹)	2.3	0.46	0.95
		SIRDF	3.7	0.29	1.17
		Dosis del Productor	1.5	0.35	0.74
2	José Constantino León Chernozem chérnico	Composta 10 (t ha ⁻¹)	3.1	0.18	0.33
		SIRDF	2.6	0.21	0.58
		Productor	1.8	0.21	0.93
3	Cuauhtémoc Montoya Villagómez Cambisol mólico	Composta 10 (t ha ⁻¹)	1.8	0.30	0.54
		SIRDF	2.9	0.31	0.46
		Productor	2.6	0.33	0.46
4	Jesús López Ruiz Phaeozem paqui-léptico	Composta 10 (t ha ⁻¹)	2.3	0.50	0.59
		SIRDF	2.7	0.51	0.32
		Dosis del Productor	2.1	0.50	0.46
5	Librado Zúñiga Calcisol hipocálcico	Composta 10 (t ha ⁻¹)	2.5	0.35	0.68
		SIRDF	2.5	0.52	0.71
		Productor	2.4	0.41	0.76
6	Luis Hernández López Vertisol éutrico	Composta 10 (t ha ⁻¹)	2.9	0.25	0.52
		SIRDF	2.4	0.19	0.43
		Dosis del Productor	2.1	0.20	0.53
7	Miguel A. Hernández López Fluvisol calcárico	Composta 10 (t ha ⁻¹)	2.3	0.23	0.72
		SIRDF	2.5	0.21	0.52
		Productor	2.4	0.21	0.60
8	José Santis González Regosol cálcico	Composta 10 (t ha ⁻¹)	2.1	0.40	0.58
		SIRDF	2.6	0.37	0.62
		Dosis del Productor	2.6	0.37	0.73
9	José E. Santiago Meza Leptosol réndzico	Composta 10 (t ha ⁻¹)	2.3	0.31	0.52
		SIRDF	2.3	0.37	0.51
		Dosis del Productor	3.9	0.35	0.90
10	Lindolfo Aguilar Avendaño Vertisol cálcico	Composta 10 (t ha ⁻¹)	3.7	0.21	0.58
		SIRDF	2.2	0.18	0.43
		Productor	2.6	0.22	0.38
11	Claudia L. Peralta Benítez Gleysol mólico	Composta 10 (t ha ⁻¹)	1.4	0.46	0.45
		SIRDF	2.4	0.33	0.37
		Dosis del Productor	2.6	0.37	0.59
Rangos de concentración de Jones <i>et al.</i> , (1991)			2.0-2.6	0.18-0.30	1.1-1.8
Rangos de concentración de Halliday y Trenkel (1991)			1.5-1.7	0.16-0.18	1.6-1.8

límite inferior, por lo que debería aumentar la dosis de N en 23 kg ha^{-1} , ya que los rendimientos obtenidos comercialmente fueron de 102 t ha^{-1} . En el suelo Gleysol mólico la composta no aportó la demanda de N del cultivo; en el caso de fertilizar con composta, ésta debería complementarse con 23 kg ha^{-1} de N.

Por otra parte, en todas las parcelas se observaron deficiencias de K (Cuadro 2) a pesar que el contenido de K en los suelos del Ingenio Pujiltic se clasifica como medio (0.3 a $0.6 \text{ cmol}^{(+)} \text{ kg}^{-1}$ de Ki), lo que puede atribuirse a la naturaleza cálcica de estos suelos (Salgado *et al.*, 2008). Suelos con altas concentraciones de Ca y Mg requieren más aportes de K para una nutrición balanceada de las plantas, lo que se explica por la competencia entre cationes durante la absorción por las raíces. Por lo anterior, es recomendable experimentar sobre dosis crecientes de K para corroborar el antagonismo detectado con los elementos Ca y Mg. Además, en los suelos Cambisol, Fluvisol, Gleysol y Vertisol se recomienda hacer drenaje superficial para favorecer la aireación del suelo, mejorar la absorción de nutrientes y el desarrollo del cultivo. Los rendimientos comerciales en esta zafra fueron menores a 90 t ha^{-1} , pero en el resto de subunidades edáficas el rendimiento fue superior a 90 t ha^{-1} . Los productores no realizan un manejo eficiente del agua de riego, ya que el sistema empleado localmente consiste en regar a inundación.

Madurez. Al momento del primer muestreo la caña estaba en proceso de sazonado; a medida que avanzó la madurez, los grados Brix se incrementaron independientemente del tratamiento de fertilización aplicado. El valor más alto registrado fue 24.5° Brix, pero la mayoría de tratamientos alcanzó satisfactoriamente la madurez (23° Brix). Las parcelas 4 y 6 alcanzaron la madurez un mes antes de la cosecha, mientras que las parcelas 3, 5, 7 y 8 la alcanzaron quince días antes de la cosecha. La parcela 2 alcanzó la madurez en la fecha normal pero la parcela 1 registró valores irregulares. En las parcelas 9 y 10 no se midieron grados Brix por que fueron cosechadas sin aviso. En la parcela 11 no se estableció ninguna relación debido a que no fue posible realizar las últimas mediciones por quema accidental (Cuadro 3).

Validación de las dosis de fertilización SIRDF

Los resultados del análisis de varianza muestran que existen diferencias significativas por efecto de subunidad de suelo sobre la calidad de los jugos (Cuadro 3), lo que se atribuye a las condiciones edafoclimáticas del sitio. Un efecto similar se observó para el rendimiento de tallo moledero, donde los menores rendimientos se presentaron en los

suelos Fluvisol, Cambisol, y Vertisol, atribuido al manejo inadecuado del agua. Respecto al tipo de fertilización, se observó un efecto significativo de tratamientos, donde la composta y las dosis del SIRDF superaron a la fertilización realizada comúnmente por los productores con 9.7 y 13.9 t ha^{-1} , respectivamente.

En el Ingenio Pujiltic la composta se vende a $\$900.00$ la tonelada, lo que hace inviable usarla como fertilizante pues se necesitaría el equivalente a 11.6 toneladas de caña para costear su aplicación. Se considera que el precio en las unidades de composteo debería reducirse a $\$450.00$ por tonelada, semejante al de otros ingenios del país. Al precio anterior, equivaldría a 5.8 toneladas de caña (a un precio de venta al ingenio de $\$772.63$ por tonelada), lo cual haría económicamente viable esta práctica (Cuadro 4), con el beneficio de tener efectos positivos sobre el suelo. Las unidades de composteo de Pujiltic podrían producir y vender mayores volúmenes de composta, lo que aumentaría las ganancias, además de contribuir a elevar el contenido de MO en los suelos de la zona a mediano plazo.

El Cuadro 4 muestra dos opciones para fertilizar las parcelas. La de menor costo es la combinación de Urea más $17\text{N}-17\text{P}-17\text{K}$, considerando los precios comerciales de la tonelada de fertilizantes (complejo $20\text{N}-10\text{P}-10\text{K}$ [$\$7,000.00$]; Urea [$\$7,300.00$]; $17-17-17$ [$\$7,900.00$]; cloruro de potasio [$\$8,500.00$]). En la última columna se indica cuántas toneladas de caña se necesitarían para costear las dosis generadas mediante el SIRDF, resaltando que el tonelaje de caña requerido para costear estas dosis es menor que el rendimiento logrado con las mismas y supera a la fertilización que el productor aplica comúnmente; demostrando la viabilidad de aplicar de manera generalizada las recomendaciones del SIRDF en el área de abastecimiento.

CONCLUSIONES

La composta que se produce en el Ingenio Pujiltic es de buena calidad, pero su costo limita su posible empleo generalizado como fertilizante. El tipo de fertilización no modifica la calidad de los jugos de la caña de azúcar cosechada. Las dosis de fertilizantes generadas por el SIRDF superaron en rendimiento a la fertilización con composta y a la dosis de fertilización que aplica comúnmente el productor. Respecto al estado nutricional del cultivo se observó que la composta y las dosis del SIRDF satisfacen los requerimientos de nitrógeno y fósforo en todas las subunidades de suelo, excepto en el Gleysol mólico que resultó

Cuadro 3. Efecto de la subunidad de suelo y de las dosis de fertilizantes sobre la calidad de jugos y rendimiento de tallo moleadero de caña de azúcar, en el área de abastecimiento del Ingenio Pujilitc, Chiapas, México.

Productor/Unidad de suelo	Grados Brix	Sacarosa	Pureza	Humedad	Reductores	Fibra	Índice madurez	Rendimiento (t ha ⁻¹)
		(%)						
Norberto E. Nájera Montes de Oca. CLvr	15.26 ab	13.62 ab	89.33 a	71.38 a	0.29 a	12.51 ab	7.12 a	98.11 cde
José Constantino León. CP 72-2086. CHch	17.23 a	15.54 a	90.18 a	69.52 b	0.29 a	12.83 ab	9.04 a	116 a
Cuauhtémoc Montoya Villagómez. CMmo	14.33 ab	12.36 b	86.16 a	70.15 ab	0.33 a	11.88 b	5.50 a	86.44 b
Jesús López Ruiz. CP72-2086, R7. PHphle	14.80 ab	13.24 ab	89.85 a	69.97 ab	0.33 a	12.26 b	5.98 a	115.55 ab
Librado Zúñiga. Cassw	15.31 ab	13.39 ab	90.53 a	69.66 b	0.29 a	14.41 a	6.99 a	108 abc
Luis Hernández López. VReu	15.75 ab	14.20 ab	87.64 a	69.65 b	0.36 a	12.21 b	6.05 a	101.88 cdb
Miguel A. Hernández López. Mex69-290. FLca	15.05 ab	13.79 ab	91.76 a	69.11 b	0.40 a	12.55 ab	6.35 a	90.33 ed
José Santis González. Mex69-290. RGca	13.78 b	12.23 b	89.19 a	70.14 ab	0.27 a	11.45 b	6.62 a	103 abcd
Media	15.2	13.55	89.3	6.9	0.32	12.5	6.7	102.4
CV (%)	13.3	11.8	4.7	1.3	39.2	11.4	35.64	9.0
Parcelas (P)	0.041 *	0.002**	0.175 NS	0.001 **	0.389 NS	0.001 **	0.098 NS	0.001 **
Fertilización (F)	0.962 NS	0.967 NS	0.841 NS	0.553 NS	0.721 NS	0.800 NS	0.555 NS	0.001 **
Int P*F	0.934 NS	0.757 NS	0.687 NS	0.137 NS	0.821 NS	0.682 NS	0.653 NS	0.617 NS
DSH	3.02	2.4	6.28	1.44	0.18	2.15	3.57	13.87
Efecto de Tratamientos	Grados Brix	Sacarosa	Pureza	Humedad	Reductores	Fibra	Índice madurez	Rendimiento (t ha ⁻¹)
		(%)						
Composta 10 (t ha ⁻¹)	15.27 a	13.58 a	89.97 a	69.97 a	0.31 a	12.37 a	6.97 a	104.25 a
Dosis del SIRDF	15.18 a	13.58 a	89.69 a	69.79 a	0.33 a	12.52 a	6.27 a	108.45 a
F. Productor	15.11 a	13.48 a	89.33 a	70.09 a	0.31 a	12.65 a	6.57 a	94.54 b
DSH	1.41	1.12	2.93	0.67	0.08	1.0	1.67	6.48

Cuadro 4. Análisis económico de las dosis generadas mediante el Sistema Integral para Recomendar Dosis de Fertilizantes (SIURDF) para el cultivo de caña de azúcar en el Ingenio Pujilitc, Chiapas, México, comparada con el costo comercial del fertilizante.

Productores/Subunidades de Suelo	Dosis SIRDF N-P ₂ O ₅ -K ₂ O (kg/ha)	Costo de la Fertilización (\$ ha ⁻¹)		Toneladas de caña *
		Compuesto 20-10-10	Urea+Triple 17 (kg)	
Luis Hernández López, Librado Zuñiga, José Eufasio Santiago Meza: VEÉu, CLccw, LPrz	160-80-80	800 kg [\$ 5,600.00]	174 + 471 [\$ 4,988.00]	6.45
Norberto E. Nájera Montes de Oca: CLvr	120-60-60	600 kg [\$ 4,200.00]	130 + 353 [\$ 3,731.00]	4.82
José Santis González, José Constantino León, Cuauhtémoc Montoya Villagomez, Miguel A. Hernández López: RGca, Chch, CBmo, FLca	120-80-80		130 + 471 [\$ 4,670.00]	6.0
Lindolfo Aguilar Avendaño, Jesús López Ruiz: VRca, PHphle	100-60-60		87 + 353 [\$ 3,424.00]	4.43
Claudia L. Peralta Benítez: GLmo	140-80-120		130kg + 471+ 100kg KCl [\$ 5,520.00]	7.14

* Necesarias para costear la dosis de fertilización del SIRDF (considerando un precio de \$ 772.63 t⁻¹ de caña)

deficiente en nitrógeno. En todas las subunidades de suelo se detectaron deficiencias de potasio. Los menores rendimientos se asociaron a los suelos Fluvisol, Cambisol y Vertisol que retienen exceso de humedad. Se recomienda realizar un estudio específico sobre la nutrición del potasio y mejorar el manejo del agua de riego en el cultivo de caña, para evitar efectos negativos en el desarrollo. El tonelaje de caña requerido para costear las dosis generadas mediante el SIRDF es menor al rendimiento total que se obtiene con su aplicación, lo cual facilita la viabilidad de aplicarlas de manera generalizada en el área de abastecimiento del Ingenio Pujiltilic.

LITERATURA CITADA

- Cañeros. 2011. Estadísticas. Ingenio Pujiltilic. <http://www.caneros.org.mx/> (30 abril de 2011)
- Fernatol. 2011. Fernatol: dale vida a tu suelo. www.fernato.com (25 abril de 2011).
- Hernández M. G.I., S. Salgado G., D. J. Palma-López, L.C. Lagunes E., M. Castelán E. O. Ruiz R. 2008. Vinaza y composta de cachaza como fuente de nutrientes en caña de azúcar en un Gleysol mólico de Chiapas, México. *Interciencia* 33 (11): 855-860.
- NMX-FF-109-SCFI-2007. Humus de lombriz (lombricomposta): Especificaciones y métodos de pruebas.
- Salgado-García S, D. J. Palma-López, J. L.C. Lagunes-Espinoza y M. Castelán-Estrada. 2006. Manual para el muestreo de suelos, plantas y aguas e interpretación de análisis. Colegio de Postgraduados-Campus Tabasco, ISPROTAB. H. Cárdenas, Tabasco, México. 90 p.
- Salgado-García. S., D. J. Palma-López, J. Zavala-Cruz, L. C. Lagunes-Espinoza, M. Castelán-Estrada., C. F. Ortiz-García., J. F. Juárez-López., J. A. Rincón-Ramírez y E. Hernández-Nataren. 2008. Programa sustentable de fertilización para el Ingenio Pujiltilic, Chiapas, México. *Terra-Latinoamericana* 26 (4): 361-373.
- Valladares R.A. y E.C. Zamorano. 1976. Método para el estimado de caña producida en campo previo a la iniciación de la zafra. CNIA-IMPA Folleto 9. 24 p.



Respuestas de las variedades MEX 69-290 y CP 72-2086 de caña de azúcar (*Saccharum spp.*) a la salinidad

Castañeda-Castro, O.¹; Trejo-Téllez, L.I.²; Gómez-Merino, F.C.¹; Jácome-Ortiz, L.³; Hernández de la Luz, H.³; Morales-Ramos, V.¹; González-Arno, M.T.³; Martínez-Ocampo, Y.M.⁴; Gámez-Pastrana, R.⁴; Pastelín-Solano, M.C.³

¹Colegio de Postgraduados *Campus* Córdoba. Carretera Córdoba-Veracruz km 348, Congregación Manuel León, Amatlán de los Reyes, Veracruz. C.P. 94946. ²Colegio de Postgraduados *Campus* Montecillo. Carretera México-Tezcoco km 36.5, Montecillo, Texcoco, Estado de México. C.P. 56230. ³Universidad Veracruzana, Facultad de Ciencias Químicas. Prolongación de Oriente 6 No. 1009, Orizaba, Veracruz. C.P. 94340. ⁴Universidad Veracruzana. Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias. Camino Peñuela-Amatlán s/n, Peñuela, Amatlán de los Reyes, Veracruz. C.P. 94945.

*Autora responsable: tlibia@colpos.mx

RESUMEN

Se evaluó la respuesta de dos variedades de caña de azúcar (Mex 69-290 y CP 72-2086) al tratamiento con NaCl (0, 50 y 100 mM) en una solución nutritiva en fase de plántula. Los indicadores fueron la concentración y acumulación de sodio, potasio, calcio y magnesio (Na, K, Ca, Mg) en vástago, y la relación de acumulación entre cationes esenciales respecto a Na y la concentración de prolina. Las variedades evaluadas mostraron respuestas diferenciales, siendo más susceptible a NaCl la Mex 69-290, en función de que los contenidos de cationes esenciales se redujeron en mayor porcentaje y, por tanto, la relación de contenido entre éstos y el Na, además de que en esta variedad se observaron decrementos en la concentración de prolina a medida que la concentración de NaCl en la solución nutritiva se incrementó. La variedad CP 72-2086 mostró mayor tolerancia a NaCl al registrar capacidad de exclusión de Na en el vástago.

Palabras clave: K/Na, Ca/Na, Mg/Na, prolina, sodicidad

INTRODUCCIÓN

La salinidad es un factor de estrés abiótico que más afecta la producción agrícola y se calcula que más de 800 millones de hectáreas en el mundo presentan algún problema relacionado (Munns y Tester, 2008). En México, en 2011, la Comisión Nacional del Agua reportó que 7.3% de los acuíferos presentan problemas de salinidad (CONAGUA, 2011). Ésta dificulta el flujo de agua en las raíces de las plantas, causando estrés osmótico y efectos tóxicos por la acumulación de sodio (Na) y cloro (Cl) en la célula vegetal y, por consiguiente, reducción en la absorción de cationes esenciales (Munns y Tester, 2008), principalmente potasio (K) (García-Morales *et al.*, 2012).

Se han identificado algunos mecanismos de tolerancia a NaCl en plantas superiores. Por ejemplo, en especies glicófitas tolerantes a cloruro de sodio (NaCl) se reduce la acumulación de iones tóxicos como Na y Cl en la parte aérea, en comparación con especies sensibles (Ashraf y Ahmad, 2000). Por otro lado, la acumulación de prolina es frecuentemente reportada en plantas tolerantes a estrés osmótico (Wanek y Richter, 1997). La caña de azúcar (*Saccharum spp.*) es un cultivo considerado moderadamente sensible a sales y, particularmente al NaCl, lo que afecta su crecimiento y morfología radical, el crecimiento del sistema aéreo, procesos fotosintéticos y el equilibrio en la absorción nutricional (García y Jáuregui, 2008; García y Medina, 2009). En el contexto anterior, el objetivo de este estudio fue determinar las respuestas a estrés salino de dos de las variedades de caña de azúcar más cultivadas en México, considerando como indicadores la concentración y acumulación de K, Ca, Mg y Na, y concentración de prolina en parte aérea de la planta.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se realizó bajo condiciones de invernadero (tipo cenital, con estructura rectangular, cubierta de plástico calibre 600, con 8 m de ancho, 45 m de largo y 5.7 m de altura). Se usaron vitroplántulas de dos meses de edad, aclimatadas en un sustrato consistente en una mezcla de tepetzil y Peat moss[®] (50/50% v/v), con una altura aproximada de 15 cm, de las variedades de caña de azúcar Mex 69-290 y CP 72-2086, provenientes de la Biofábrica Vitromotz, del Ingenio Central Motzorongo, ubicado en el municipio de Acatlán de Pérez Figueroa, Oaxaca. Las plántulas se establecieron en cultivo hidropónico en la solución nutritiva de Steiner

(Steiner, 1984) a una concentración de 10%, misma que fue complementada con micronutrientes a partir del producto comercial Tradecorp AZ[®]. Las raíces se oxigenaron usando bombas de pecera (Marca Zone) durante 15 minutos en intervalos de 30 minutos. Diez días después del establecimiento del cultivo hidropónico se renovaron las soluciones nutritivas y se les adicionaron 0, 50 y 100 mM de NaCl, teniendo un total de seis tratamientos resultado de la combinación de las variedades y concentraciones de NaCl, con tres repeticiones y una cubeta de plástico de 3 L⁻¹ de capacidad con cuatro plántulas como unidad experimental, distribuidas completamente al azar.

Las plántulas se trataron durante 10 días con las soluciones conteniendo NaCl. El pH de las soluciones nutritivas fue ajustado a 5.5 y éstas se renovaron durante el periodo de tratamientos una vez (día 5 de tratamientos). Después de este periodo, los vástagos de las plántulas fueron secados en estufa de aire forzado (modelo EEAF) durante 48 h a 70 °C y se determinó el peso seco. Las muestras secas se molieron en un molino tipo Wiley y se digestaron con una mezcla de ácido nítrico y perclórico en proporciones 2:1, respectivamente (Alcántar y Sandoval, 1999). En los extractos resultantes se determinaron las concentraciones de potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg) y sodio (Na), usando un equipo de espectroscopia de emisión atómica de inducción por plasma (ICP-ES 725).

Los contenidos de K, Ca, Mg y Na en vástagos de caña de azúcar se obtuvieron con los datos de la concentración nutricional y los pesos secos del vástago, y con ellos se estimaron las relaciones de contenidos K/Na, Ca/Na, Mg/Na y (K+Ca+K)/Na. La con-

centración de prolina se determinó en material seco, siguiendo la metodología descrita por Bates (1973), con lecturas a 520 nm de absorbancia en un espectrofotómetro (Genesys 10 series Spectrophotometer, Thermo Scientific); la prolina fue usada como estándar para la elaboración de la curva de calibración. Los datos obtenidos fueron analizados mediante un ANDEVA con el programa SAS (SAS, 2011) y prueba de comparación de medias de Tukey con un nivel de significancia de 95%.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se observó que la concentración de los cationes esenciales K, Ca y Mg no mostraron diferencias significativas entre tratamientos. Por el contrario, la concentración de Na guardó una relación positiva con la de NaCl adicionada a la solución nutritiva; así también se observó que la variedad Mex 69-290 tiene concentraciones superiores de este elemento que las que presenta CP 72-2086, siendo la excepción el tratamiento sin NaCl en la solución nutritiva (Cuadro 1).

Los contenidos de Na en vástago se relacionaron de manera positiva con las concentraciones de NaCl en la solución nutritiva en ambas variedades; no obstante, la mayor acumulación de Na en la variedad Mex 69-290 respecto a la CP 72-2086 fue evidente. En lo que respecta al contenido de cationes esenciales, la variedad CP 72-2086 registró mayor acumulación que la Mex 69-290, independientemente de la concentración de NaCl evaluada. Asimismo, en la CP 72-2086 no hubo reducción significativa en el contenido de cationes esenciales, con el incremento de la concentración de NaCl en la solución nutritiva. La variedad Mex 69-290 solo mostró

Cuadro 1. Concentraciones de Na, K, Ca y Mg en vástagos de dos variedades de caña de azúcar (*Saccharum spp.*) tratadas con NaCl.

NaCl, mM	Variedad	Na	K	Ca	Mg
		mg kg ⁻¹ de materia seca	g kg ⁻¹ de materia seca		
0	CP 72-2086	1030.80 ± 54.58c	13.51 ± 1.23a	4.06 ± 0.31a	2.88 ± 0.26a
	Mex 69-290	981.15 ± 166.18c	12.68 ± 1.59a	3.65 ± 0.38a	2.49 ± 0.52a
50	CP 72-2086	14826.50 ± 2224.62b	9.95 ± 1.37a	2.72 ± 0.33a	2.82 ± 0.51a
	Mex 69-290	19270.04 ± 3677.63b	10.27 ± 1.90a	2.85 ± 0.46a	2.39 ± 0.32a
100	CP 72-2086	21291.27 ± 4535.77b	9.33 ± 2.05a	2.59 ± 0.49a	2.81 ± 0.28a
	Mex 69-290	37446.36 ± 1996.44a	11.36 ± 0.78a	2.88 ± 0.20a	2.96 ± 0.25a

Medias ± DE con letras iguales en cada columna indican que en cada evaluación no existen diferencias estadísticas significativas ($\alpha=0.05$).

reducción significativa del contenido de Ca en vástagos de plantas tratadas con NaCl, en comparación con la ausencia de NaCl en la solución nutritiva (Figura 1). Las reducciones en el contenido de Ca en la CP 72-2086 con el tratamiento con 50 y 100 mM de NaCl fueron del orden de 27.3% y 24.1%, respectivamente, en comparación con el testigo (0 mM NaCl), mientras que en Mex 69-290 correspondieron a 34.5% y 20.9%, respectivamente.

Si bien no se observaron reducciones estadísticas significativas por efecto de NaCl al analizar el contenido de K en cada una de las variedades, es importante resaltar la magnitud de la disminución que éste ocasiona, comparando los contenidos registrados en plantas tratadas con NaCl con el testigo en cada variedad. Esto permitió notar que el contenido de K se redujo en 20% y 18% en la variedad CP 72-2086 con los tratamientos de 50 y 100 mM de NaCl, en comparación con el testigo, mientras que la Mex 69-290 mostró reducciones en el contenido de K de 32% y 10%, respectivamente, respecto a su testigo. Günes *et al.* (1996) encontraron que el contenido de K en tallos de pimiento morrón se redujo significativamente al aumentar el nivel de salinidad de 2.1 a 9.5 dS m⁻¹. En ambientes salinos, las plantas tienden a absorber cantidades excesivas de Na en lugar de K, lo que inhibe el crecimiento vegetal al disminuir la capacidad de ajuste osmótico y de mantenimiento de la turgencia en hojas (Tester y Davenport, 2003).

Por otra parte, el catión esencial menos afectado por la adición de NaCl a la solución nutritiva fue el Mg. Con la concentración de 50 mM se redujo su contenido en solo 9.8% y 16.6% en las variedades CP 72-2086 y Mex 69-290, respectivamente, en comparación con los testigos correspondientes. Es interesante notar que el suministro de NaCl en la concentración más alta (100 mM) ocasionó conteni-

dos superiores de Mg a los de los testigos correspondientes en ambas variedades, registrando valores de 2.9% y 7.9% en la CP 72-2086 y en la Mex 69-290, respectivamente (Figura 1). Lo anterior coincide con lo señalado por Flores *et al.* (2001), quienes registraron que el estrés salino no afectó la concentración de Mg en tomate.

Las relaciones de acumulación entre cada uno de los cationes esenciales y Na fueron menores a medida que incrementó la concentración de NaCl en la solución nutritiva, siendo esta disminución de mayor magnitud en la variedad Mex 69-290. Por tanto, esta tendencia se mantiene al considerar los contenidos de K, Ca y Mg de manera conjunta, respecto a Na (Cuadro 2).

En lo que a concentración de prolina se refiere, las variedades evaluadas mostraron tendencias opuestas. En el caso de CP 72-2086 se observó una relación positiva entre concentración de prolina y de NaCl en la solución nutritiva; por el contrario, en Mex 69-290 la concentración de prolina mostró una tendencia decreciente, a medida que la concentración de NaCl aumentó en la solución nutritiva (Figura 2). La acumulación de osmolitos como prolina son benéficos para plantas en condiciones de estrés, dado que reducen el potencial hídrico dentro de

Cuadro 2. Relaciones de acumulación de cationes esenciales respecto a sodio en dos variedades de caña de azúcar (*Saccharum spp.*).

NaCl, mM	Variedad de caña	K/Na	Ca/Na	Mg/Na	(K+Ca+Mg)/Na
0	CP 72-2086	12.98	3.91	2.77	19.66
	Mex 69-290	13.08	3.77	2.92	19.77
50	CP 72-2086	0.67	0.19	0.16	1.02
	Mex 69-290	0.53	0.15	0.15	0.83
100	CP 72-2086	0.44	0.12	0.12	0.68
	Mex 69-290	0.30	0.08	0.08	0.46

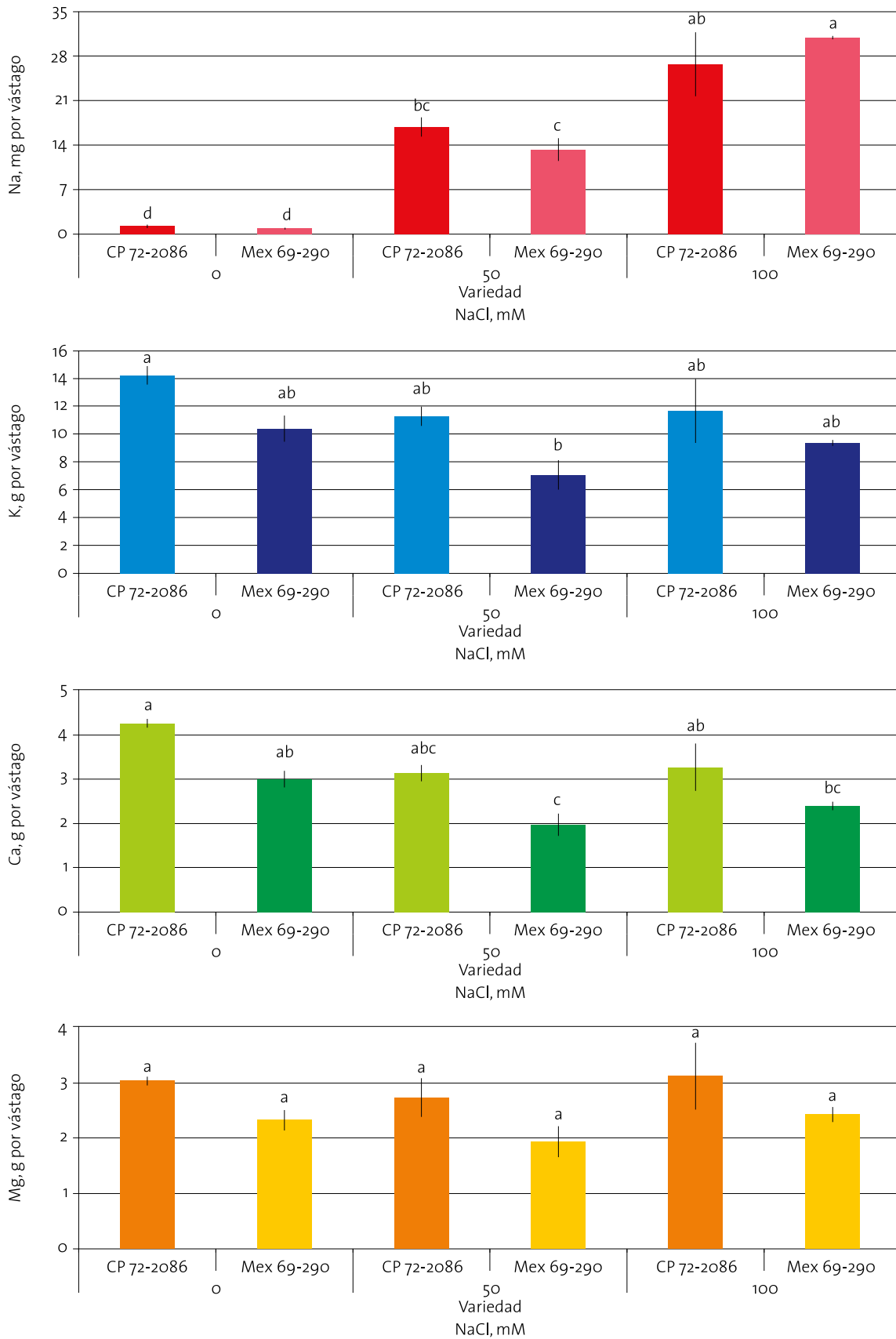


Figura 1. Contenido de Na, K, Ca y Mg en vástago de las variedades CP 72-2086 y Mex 69-290 de caña de azúcar (*Saccharum* spp.) tratadas con NaCl. Medias \pm desviación estándar con letras iguales en cada sub-figura indican que no existieron diferencias estadísticas significativas ($\alpha=0.05$).

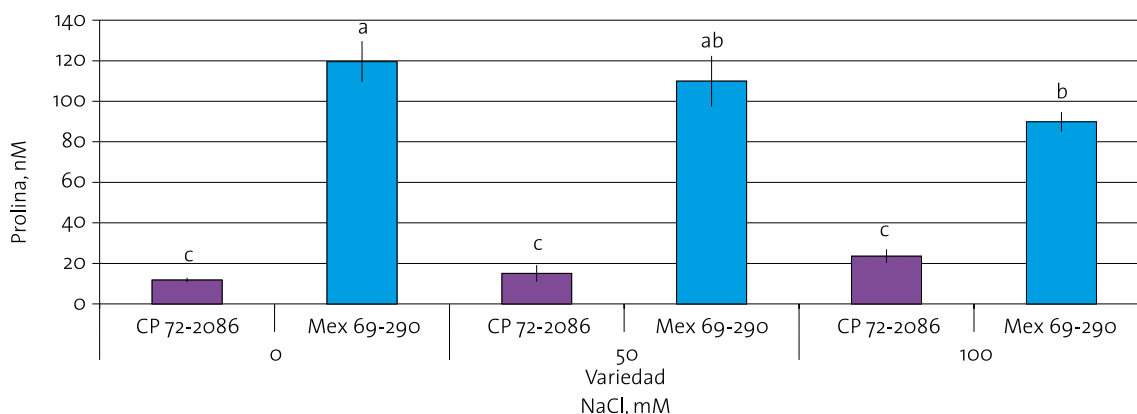


Figura 2. Concentración de prolina en vástago de las variedades CP 72-2086 y Mex 69-290 de caña de azúcar (*Saccharum spp.*) tratadas con NaCl. Medias \pm desviación estándar con letras iguales indican que en cada evaluación no existen diferencias estadísticas significativas ($\alpha=0.05$).

la célula y previenen pérdida de agua (Mahajan y Tuteja, 2005).

CONCLUSIONES

La variedad CP 72-2086 registró mayor tolerancia a NaCl que la Mex 69-290, al registrar mayor capacidad de exclusión de Na al vástago. La acumulación de cationes esenciales (K, Ca y Mg) en la primera variedad fue menos afectada por la presencia de NaCl en la solución nutritiva. Adicionalmente, la concentración de prolina en CP 72-2086 aumentó a medida que la de NaCl fue incrementado.

AGRADECIMIENTOS

Al Fideicomiso Institucional y a la Línea Prioritaria de Investigación 5 “Biotecnología microbiana, vegetal y animal” del Colegio de Postgraduados, por los apoyos y facilidades brindadas.

LITERATURA CITADA

- Alcántar G.G., Sandoval V.M. 1999. Manual de Análisis Químico de Tejido Vegetal. Publicación Especial 10. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C. Chapingo, México.
- Ashraf M., Ahmad S. 2000. Influence of sodium chloride on ion accumulation, yield components and fibre characteristics in salt-tolerant and salt-sensitive lines of cotton (*Gossypium hirsutum* L.). *Field Crops Res.* 66: 115-127.
- Bates L.S., Waldren R.P., Teare I.D. 1973. Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant Soil* 39: 205-207.
- CONAGUA. 2011. Estadísticas del agua en México-Edición 2011. Comisión Nacional del Agua. SEMARNAT. México, D. F. 181 p. <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGP-1-11-EAM2011.PDF> Consultado: Diciembre, 2013.
- Flores P., Carvajal M., Cerdá A., Martínez V. 2001. Salinity and ammonium/nitrate interactions on tomato plant development, nutrition, and metabolites. *J. Plant Nutr.* 24: 1561-1573.
- García M., Jáuregui D. 2008. Efecto de la salinización con NaCl o Na₂SO₄ sobre la anatomía foliar en dos genotipos de caña de azúcar (*Saccharum spp.*) con tolerancia salina diferencial. *Ernstia* 18: 89-105.
- García M., Medina E.E. 2009. Acumulación de iones y solutos orgánicos en dos genotipos de caña de azúcar, estresados con sales simples o suplementadas con calcio. *Bioagro.* 21:3-14.
- García-Morales S., Trejo-Téllez L.I., Gómez-Merino F.C., Espinosa-Victoria D. 2012. Growth inhibition and changes in nutrient accumulation in cucumber plants under salinity conditions. *Acta Hort.* 947: 83-90.
- Günes A., Inal A., Alpasian M. 1996. Effect of salinity on stomatal resistance, proline, and mineral composition of pepper. *J. Plant Nutr.* 19: 389-396.
- Mahajan S., Tuteja N. 2005. Cold, salinity and drought stresses: An overview. *Archives Biochem. Biophys.* 444: 139-158.
- Munns R., Tester M. 2008. Mechanisms of salinity tolerance. *Annu. Rev. Plant Biol.* 59: 651-681.
- SAS Institute Inc. 2011. SAS/STAT® 9.3 User's Guide. SAS Institute Inc. Cary, NC, USA. 178 p. Disponible en: <http://support.sas.com/documentation/onlinedoc/stat/930/introcom.pdf>. 08/11/2013.
- Steiner A. 1984. The universal nutrient solution. 633-649. *In: ISOSC Proceedings 6th International Congress on Soilless Culture.* The Netherlands.
- Tester M., Davenport R. 2003. Na⁺ tolerance and Na⁺ transport in higher plants. *Ann. Bot.* 91: 503-527.
- Wanek W., Richter, A. 1997. Biosynthesis and accumulation of D-ononitol in *Vigna umbellata* in response to drought stress. *Plant Physiol.* 101: 416-424.

LOS

Biofertilizantes

Y LA PRODUCCIÓN DE

Caña de azúcar

(*Saccharum* spp.)

Velasco-Velasco, J.

Campus Córdoba, Colegio de Postgraduados, km 348 Carretera federal Córdoba-Veracruz, Congregación Manuel León, Amatlán de los Reyes, Veracruz. C.P. 94946.

Autor responsable: joel42ts@colpos.mx

RESUMEN

En la producción de caña de azúcar (*Saccharum* spp.), es importante diseñar políticas públicas del sistema producto que involucre implementar manejo alternativo de la fertilidad del suelo a través del uso de biofertilizantes, enmiendas orgánicas, fertilizantes químicos y buenas prácticas agrícolas. La quema y requema de los residuos de la cosecha es una práctica que afecta considerablemente la dinámica de la materia orgánica. El uso de biofertilizantes a base de bacterias fijadoras de nitrógeno, solubilizadoras de fósforo, promotoras de crecimiento y abonos orgánicos, son alternativas cuyos resultados en investigación han evidenciado efectos favorables para el rendimiento de caña y la conservación del suelo y ambiente.

Palabras clave: Bacterias promotoras de crecimiento, abonos orgánicos

INTRODUCCIÓN

La producción de caña de azúcar (*Saccharum* spp.) es de gran importancia en el mundo y se cultiva en más de 130 países en una superficie de 25.4 millones de hectáreas, con un rendimiento promedio de 80 t ha⁻¹ (FAOSTAT, 2013). A nivel internacional, ocupa el noveno lugar en importancia respecto al valor de la producción (56 mil millones de dólares), pero es el primer cultivo por cantidad de materia prima producida (1,800 millones de toneladas al año) (FAOSTAT, 2013). Su producción retoma importancia en el mundo por su contribución al desarrollo agrícola e industrial,

captación de divisas, como suplemento calórico, producción de alcohol y etanol, y como componente alimenticio en la dieta para animales, entre otros usos.

En México la industria azucarera es una de las más importantes, debido a su relevancia económica y social; genera más de dos millones de empleos y se desarrolla en 15 entidades federativas y 227 municipios, generando un valor de producción primaria de alrededor de 30 mil millones de pesos (SAGARPA, 2011) (Cuadro 1).

El cultivo de la caña de azúcar se ha visto afectado tanto a nivel productivo como económico, debido a factores de políticas públicas, bajo nivel de eficiencia en la implementación de tecnologías en toda la cadena productiva y, últimamente, por efecto del cambio climático. El uso de biofertilizantes es una alternativa amigable con el medio y puede contribuir desde el punto de vista de producción sostenida del cultivo. **Los biofertilizantes son productos a base de uno o más microorganismos no patógenos que, al ser inoculados a plantas, pueden vivir asociados o en simbiosis, incrementando el suministro, la disponibilidad y el acceso físico de nutrientes que favorecen mayor crecimiento** (Barea et al., 2002). También se definen como fertilizantes orgánicos naturales que promueven la disponibilidad de nutrientes y contribuyen a proporcionárselos a las plantas y a mejorar la calidad del suelo, creando un entorno microbiológico natural (FAO, 2009). De manera similar se menciona también que son una base de microorganismos que se desarrollan naturalmente en el suelo, se aíslan de él y, al inocularlos nuevamente en la rizosfera de la planta, incrementan sus poblaciones; asimismo, mediante su actividad biológica ponen a disposición de las plantas importantes nutrientes necesarios para el desarrollo del cultivo, así como sustancias promotoras de crecimiento, y contribuyen a la mineralización de la materia orgánica del suelo. Con base en lo anterior, se describen evidencias del uso actual y potencial de los biofertilizantes en la producción de caña de azúcar para reducir el uso de fertilizantes de origen químico y contribuir a su producción sostenible.

Nutrición de la caña de azúcar

La caña de azúcar es un cultivo altamente extractor de nutrientes del suelo y requiere considerables dosis de fertilización de macro y micronutrientes para suplir sus necesidades. Lo anterior se debe a su elevada capacidad de producción de biomasa (tallos molederos, follaje, cepa y raíces), que significa entre 20 y 35 t ha⁻¹ de materia seca; en peso fresco alcanzan un valor cercano o su-

perior a 100 t ha⁻¹, lo cual asociado a la prolongada duración de su ciclo, implica una extracción de nutrientes del suelo de entre 800 a 1500 kg ha⁻¹ por año, sobresaliendo el potasio y silicio, seguidos de nitrógeno, fósforo y otros nutrimentos (Cuadro 2).

La fertilización nitrogenada es muy importante para el cultivo; además, algunos suelos pueden requerir aportes de fósforo y, en casos especiales, de potasio. Por esta razón resulta fundamental que el productor realice con frecuencia análisis de suelo para que, junto a los registros de la producción de caña y azúcar de años anteriores, pueda optimizar la elección de nutrientes y dosis a agregar en cada lote de cultivo. Diversos autores mencionan dosis de fertilizantes integradas de 130 unidades de nitrógeno (N), 39 de fósforo P₂O₅ (P), 280 de potasio KO₂ (K), 47 de calcio (Ca), 47 de magnesio (Mg) y 60 de azufre (S) (Hernández et al., 2008). Otros recomiendan una dosis de 160_N-80_P-80_K y FIRA (2007) aconseja aplicar 500 kg de 16_N-16_P-16_K en planta. Actualmente existe preocupación por el intenso uso de insumos químicos en la producción de caña de azúcar, ya que ello encarece los costos de producción, contamina el ambiente y los mantos acuíferos. Por lo que la biotecnología a base de biofertilizantes podría fortalecer el desarrollo sostenible del este cultivo.

Biofertilizantes microbianos

Se han realizado ensayos para el uso de biofertilizantes a base de bacterias promotoras de crecimiento vegetal (PGPB, por sus siglas en inglés). El Cuadro 3 muestra las principales PGPB y sus efectos benéficos estudiados en caña de azúcar, realizados en Cuba (Torriente, 2010).

Estudios en Brasil demuestran que con la fertilización con bajos niveles

Cuadro 1. Principales estados productores de caña de azúcar en México en millones de toneladas por año.

ESTADOS	2008	2009	2010	2011	2012
Veracruz	18.2	16.1	18.7	17.4	18.1
Jalisco	5.9	5.7	6.2	5.5	6.3
Oaxaca	3.5	3.7	3.6	3.6	3.6
San Luis Potosí	3.8	3.8	3.0	3.5	2.5
Tamaulipas	3.2	3.8	2.7	3.5	3.5
TOTAL	51.1				

Fuente: Escenario Base 2009-2018 www.siacon.sagarpa.gob.mx

Cuadro 2. Extracción de nutrientes del suelo por el cultivo de caña de azúcar

Nutrientes	Cantidad extraída (kg ha ⁻¹ por año)
Potasio	300 – 350
Silicio	200 – 300
Nitrógeno	130 – 200
Fósforo	80 – 100
Calcio	55 – 60
Magnesio	35 – 45
Azufre	20 – 30

de nitrógeno (menos de 50 kg ha⁻¹) se obtienen rendimientos semejantes a los de países donde los cultivos se fertilizan con altas dosis de este mismo elemento (120-300 kg ha⁻¹), como es el caso de Estados Unidos (Hawái), Cuba, Venezuela y México (Caballero-Mellado *et al.*, 1995). Se han reportado ganancias económicas por sustitución de los fertilizantes químicos en rangos de 25 a 32% en más de 76% de las experiencias evaluadas en campo, mostrando respuesta positiva e incrementos de entre 25% y 35% en el rendimiento (Ortega *et al.*, 2009). Experimentos realizados en plantas inoculadas con *Gluconacetobacter diazotrophicus* en el estado de Morelos (México) (Caballe-

ro-Mellado *et al.*, 1995) indicaron que aun con bajas dosis de nitrógeno (50 kg ha⁻¹) los rendimientos fueron muy similares a los observados con elevadas dosis de fertilización mineral (300 kg ha⁻¹), lo cual fue atribuido a que las PGPB favorecieron a las plantas a través de diferentes mecanismos listados en el Cuadro 4; por ejemplo, la bacteria *Azospirillum brasilense* ha incrementado los rendimientos agrícolas en diferentes cultivos de interés económico, gracias al aporte de las fitohormonas del crecimiento vegetal y como fijadora de nitrógeno.

Se le ha dado especial interés a bacterias con capacidad de solubilizar fosfatos inorgánicos en forma de compuestos de aluminio (Al), hierro (Fe) y calcio (Ca), cuya composición química limita la disponibilidad y absorción de fósforo (P) por las plantas. La actividad de las bacterias solubilizadoras de fosfatos interviene directamente en el incremento de la capacidad de crecimiento de las especies vegetales que son inoculadas, y dentro de éstas se encuentran especies tales como *Enterobacter agglomerans*, *Bacillus megaterium*, *Bacillus sp.*, y *Acidithiobacillus spp.*, entre otras, con capacidad de solubilizar fosfatos a partir de fuentes inorgánicas insolubles y fitato (Alarcón y Ferrera-Cerrato, 2000). De manera similar, las bacterias que participan en la fijación

Cuadro 3. Principales bacterias promotoras de crecimiento vegetal utilizadas en el cultivo de la caña de azúcar.

Especies de bacterias aisladas en caña de azúcar	Efectos beneficiosos principales en la planta	Principales estudios realizados
<i>Azospirillum brasilense</i>	Fijación de nitrógeno Producción de fitohormonas de crecimiento vegetal	Aislamientos, identificación y validación en campo Medios de cultivo
<i>Azotobacter sp.</i>	Fijación de nitrógeno Producción de fitohormonas de crecimiento vegetal	Aislamiento, identificación y caracterización, validación en campo
<i>Acetobacter diazotrophicus</i> (<i>Gluconacetobacter diazotrophicus</i>)	Fijación de nitrógeno Producción de fitohormona vegetal Estimulador del crecimiento	Aislamientos, identificación y caracterización, validación en campo
<i>Burkholderia cepacia</i> (<i>Pseudomonas</i>)	Efectos antagónicos ante los hongos patógenos	Mecanismos de acción de la bacteria
<i>Pantoea sp.</i>	Mecanismo de acción como bacteria endófito	Aislamientos

Fuente: Torriente (2010).

Cuadro 4. Mecanismos benéficos de las especies promotoras de crecimiento vegetal.

Mecanismo de acción en la planta con diversas especies de PGPB
Fijación de nitrógeno
Síntesis de fitohormonas
Promoción del crecimiento de la raíz y proliferación de pelos radicales
Mejoramiento de la absorción de agua y nutrientes
Solubilización de los fosfatos di, tricálcicos y otros minerales
Inhibición del crecimiento de microorganismos patógenos
Producción de sideróforos, que son los iniciadores de la resistencia sistémica inducida (ISR)

Fuente: Torriente (2010)

biológica del nitrógeno y la solubilización del fósforo inorgánico tienen capacidad de inducir cambios fisiológicos en la planta, los cuales estimulan la tasa de crecimiento. Los mecanismos de la planta son activados por estas bacterias que están relacionadas con la síntesis de reguladores del crecimiento (Alarcón y Ferrera-Cerrato, 2000). En el Cuadro 5 se enlistan biofertilizantes usados en diferentes cultivos, así como sus beneficios en la planta inoculada (Figura 1).

Uso de enmiendas orgánicas en caña

Los abonos o enmiendas en suelos representan otro biofertilizante importante en la producción de cultivos y, por lo tanto, tienen impacto en la producción de caña de azúcar; dentro de los principales se menciona la utilización de cachaza, compost de cachaza, vinaza, estiércol y compost de estiércol. Lozano (2001) empleó 75 t ha⁻¹ de cachaza fresca y 75 t ha⁻¹ de compost de cachaza como abono en el cultivo de caña de azúcar y con ello demostró que de ambas formas puede incorporarse al suelo (no existió diferencia significativa en la producción del cultivo), por lo que la cachaza es una alternativa de fertilización orgánica para la producción de caña, contribuyendo al mejoramiento del suelo y del ambiente. Otras investi-

gaciones usando materiales orgánicos estabilizados, como los citados por Hernández *et al.* (2006), no observaron diferencia estadística significativa en rendimiento (t ha⁻¹) en un estudio de fertilización en caña de azúcar con dos dosis de vinaza (150 y 250 m³ ha⁻¹), fertilización química (160_N-80_P-80_K), composta de cachaza (15 t ha⁻¹) y un testigo sin fertilizar. Sin embargo, la fertilización química y la composta superaron al testigo y a los tratamientos de vinaza, con 33 y 11 t ha⁻¹, respectivamente. En cuanto a contenido de macronutrientes N y P en tejido vegetal, se reportó una diferencia significativa entre el testigo y la dosis alta de vinaza. En cambio, en porcentaje de K, el testigo registró valores similares al tratamiento fertilizado con composta, los cuales fueron significativamente menores a la fertilización química y a las dosis de vinaza. En cuanto a los elementos Ca, Mg, Cu (cobre), Fe, Zn (zinc) y B (boro), fueron estadísticamente iguales en todos los tratamientos. De igual forma, no observaron diferencia significativa en grados Brix, sacarosa, azúcares reductores, fibra y humedad, por lo que la calidad de los jugos de la caña de azúcar fue estadísticamente igual a la obtenida con fertilización química. Arreola-Enríquez *et al.* (2004) evaluaron los efectos de

tres dosis de cachaza 5, 10 y 15 t ha⁻¹ (enriquecida con N (0.6%) y K (0.2%)), con respecto a la fertilización química con fórmula 12_N-60_P-60_K y un testigo sin fertilización, registrando diferencias significativas y una relación directa entre el método, la dosis de fertilización y el aporte de materia orgánica, resultando mayor en la de 15 t ha⁻¹, excepto en la mineral y sin fertilizar (2.57%). En las dosis 10 y 15 t ha⁻¹ de abono órgano-mineral de cachaza, el contenido (mg kg⁻¹) de NO₃⁻ y NH₄⁺ respondieron de mejor forma que el resto de los tratamientos. Encontraron también una diferencia significativa en la dosis de 10 t ha⁻¹ (84.6 t ha⁻¹ de tallos moladeros), en cambio, el testigo y la fertilización química sólo obtuvieron 35 t ha⁻¹ y 52 t ha⁻¹, respectivamente. No encontraron efecto en la calidad del jugo (determinada por grados Brix, sacarosa, pureza y fibra). La calidad de los jugos no presentaron diferencia significativa, como también lo observó Heinrichs *et al.* (2010). Gómez y Rodríguez (2000) estudiaron los efectos de la fertilización a base de vinaza combinada con la fertilización mineral sobre la productividad del cultivo en primera y segunda soca de caña de azúcar. Los tratamientos fueron tres niveles de fertilización mineral (0 kg ha⁻¹, 180 kg ha⁻¹ N+160 kg ha⁻¹ P₂O₅+220 kg ha⁻¹ K₂O y 80 kg ha⁻¹ N+45 kg ha⁻¹ P₂O₅), combinados con cinco niveles de vinaza (0 m³ ha⁻¹, 25 m³ ha⁻¹, 50 m³ ha⁻¹, 75 m³ ha⁻¹ y 100 m³ ha⁻¹, obteniendo valores en rendimiento en azúcar y en caña superiores con la aplicación de la vinaza. Se observaron también mejores resultados con los niveles de 50 m³ ha⁻¹ en plantilla y de 100 m³ ha⁻¹ en primera y segunda soca, mostrando una eficiencia significativa, como material fertilizante y una reducción del efecto contaminante en los acuíferos del subsuelo.

Cuadro 5. Biofertilizantes a base de bacterias promotoras de crecimiento vegetal, biocontroladores de patógenos y uso de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) empleados en diferentes cultivos.

Especies biofertilizantes	Efectos beneficios para la planta
Pseudomonas	Bacteria promotora del crecimiento, Control biológico
Hongos micorrízicos arbusculares	Facilitan la asimilación de nutrimentos Ayudan a la funcionalidad fisiológica de la planta para su crecimiento; permiten la disponibilidad y aprovechamiento de nutrimentos
Microorganismos de la rizosfera	Absorción de nutrimentos minerales y agua
Cyanobacteria <i>Anabaena</i> <i>Nostoc</i> spp. <i>Cylindrospermum</i> spp. <i>Aulosira</i> spp. <i>Tolypothrix</i> spp.	Son excelentes fijadores de nitrógeno

Fuente: Alarcón *et al.* (1998).

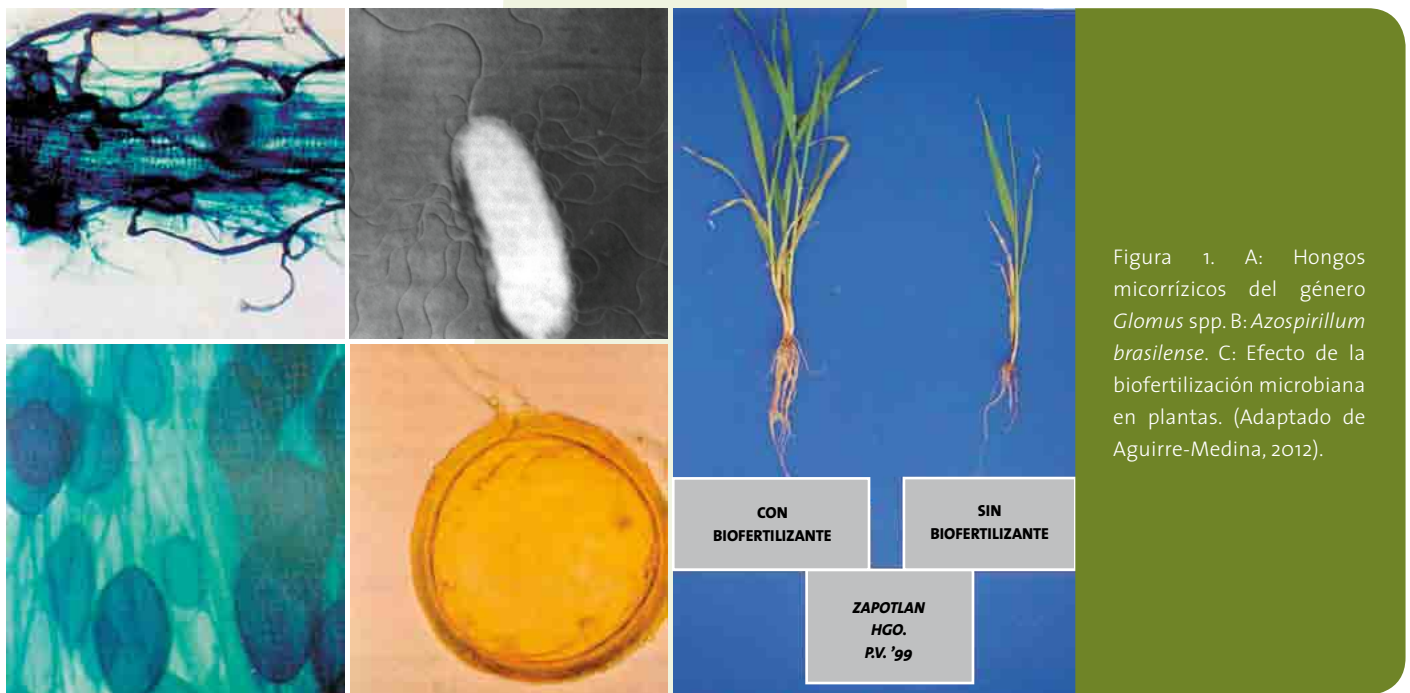


Figura 1. A: Hongos micorrízicos del género *Glomus* spp. B: *Azospirillum brasilense*. C: Efecto de la biofertilización microbiana en plantas. (Adaptado de Aguirre-Medina, 2012).

CONCLUSIONES

Es recomendable incorporar en los paquetes tecnológicos del cultivo de caña de azúcar, fuentes orgánicas para la nutrición, tales como biofertilizantes microbianos y enmiendas orgánicas, además de incluir buenas prácticas agrícolas y aplicar el manejo integrado de la fertilidad del suelo, con el fin de mejorar la producción y la productividad. Promover acciones como la cosecha en verde, evitar la quema de la materia orgánica e impulsar la capacitación a las organizaciones de cañeros, son acciones que rendirán frutos a mediano y largo plazos en la productividad y sostenibilidad del cultivo.

LITERATURA CITADA

Aguirre-Medina, J.F., Aguirre C. J.F., Cadena-Iñiguez J., Avendaño-Arrazate C.H. 2013. Biofertilización en plantas de la selva húmeda tropical. Editorial Colegio de Postgraduados. Primera edición. 104 p.

Arreola-Enríquez J., Palma-López D.J., Salgado-García S., Camacho-Chiu W., Obrador-Olán J.J., Juárez-López J.F., Pastrana-Aponte L. 2003. Evaluación de abono organo-mineral de cachaza en la producción y calidad de la caña de azúcar. *Terra Latinoamericana* 22: 351-357.

Alarcón A. Ferrera-Cerrato R. 2000. Biofertilizantes: importancia y utilización en la agricultura. *Agricultura Técnica en México* 26: 191-203.

Alarcón A., Ferrera-Cerrato R., Villegas-Monter A. Almaraz S.J.J. 1998. Efecto de la simbiosis micorrízica en la fotosíntesis de *Citrus volkameriana* Tan & Pasq. *In. Zulueta R., R., Escalona A., M. Y Trejo A., D. (eds.) Avances de la Investigación Micorrízica en México.* Universidad Veracruzana. Xalapa, Ver. México. p. 119-126.

Barea J.M., Azcón R., Azcón-Aguilar C. 2002. Mycorrhizosphere interactions to improve plant fitness and soil quality. *Antonie Van Leeuwenhoek International Journal of General and Molecular Microbiology*, 81(1-4): 343-351.

Caballero-Mellado J., Fuentes-Ramírez L.E., Reis V.M., Martínez-Romero E. 1995. Genetic Structure of *Acetobacter diazotrophicus* populations and identification of a new genetically distant group. *Applied and Environmental Microbiology* 61: 3008-3013.

FIRA. 2007. Caña de azúcar. Análisis de costos cosecha sin quema. http://www.fira.gob.mx/Nd/CANA_DE_AZUCAR-Analisis_de_Costos_cosecha_sin_quema.pdf.

FAO. 2009. Glosario de biotecnología para la agricultura y la alimentación. <http://www.fao.org/docrep/004/y2775s/y277500.htm>

FAOSTAT. 2011. Estadísticas de producción de alimentos. Caña de azúcar. <http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>

FAOSTAT. 2013. Estadísticas de producción de alimentos. Caña de azúcar. <http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>

Gómez J. Rodríguez O. 2000. Efecto de la vinaza en la productividad de la caña de azúcar (*Saccharum officinarum*). *Revista de la Facultad de Agronomía (LUZ)* 17: 318-326.

Heinrichs R.A., Santos E.T.B., Monteiro de Figueiredo A., Musac S., Paschoaloto J.R.D., Filho C.V. 2010. Soil chemical attributes, technological quality and yields of sugar cane. 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World. 1-6 August 2010, Brisbane, Australia.

Hernández M.G.I., Salgado G.S., Palma L.D.J., Lagunes E.L.C., Castelán E.M., Ruíz R.O. 2008. Vinaza y composta de cachaza como fuente de nutrientes en caña de azúcar en un gleysol mólico de Chiapas. *INTERCIENCIA* 33: 855-860.

Ortega E., Fernández L.; Ortega-Rodés P., Rodés R. 2009 La fijación biológica del nitrógeno en la caña de azúcar. [En línea] La Habana: Laboratorio de Fisiología Vegetal, Facultad de Biología, Universidad de la Habana [Consultado: 12/2/2009 Disponible en: <<http://www.uh.cu/...Ortega/...Ortega/>

SAGARPA. 2011. Estudio de gran visión para la identificación de necesidades de riego y drenaje en las zonas de abasto cañeras y propuestas de tecnificación en zonas potenciales como base para el desarrollo de proyectos de inversión. Etapa I. Escenario Base 2009-2018. Proyecciones para el Sector Agropecuario de M - www.siacon.sagarpa.gob.mx.

SIAP. 2009. Sistemas Producto Agrícolas. Caña de azúcar. siap.gob.mx/sipro/portales/agricolas/caña/descripcion.pdf

Torriente D. 2010. Aplicación de bacterias promotoras del crecimiento vegetal en el cultivo de la caña de azúcar. *Perspectivas de su uso en Cuba. Cultivos Tropicales* 31: 19-26.

EFECTO DEL HIDRÓXIDO DE CALCIO Y CONSERVACIÓN DE ALIMENTOS A BASE DE RESIDUOS DE CAÑA DE AZÚCAR

Aranda-Ibáñez, E.M.^{1,4,5}; Ramos-Juárez, J.A.¹; Lázaro-Que, C.J.²; Vargas-Villamil, L.M.¹; Hernández-Mendo, O.³; Salgado-García, S.¹

¹Colegio de Postgraduados-Campus Tabasco, Km. 3,5 Periférico Carlos A. Molina s/n. H. Cárdenas, Tabasco. CP 86500. México. ²Delegación de SAGARPA Villahermosa Tabasco. ³Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Km. 36,5 Carr. México-Texcoco, Montecillo Texcoco Estado de México. ⁴Línea prioritaria de investigación Biotecnología microbiana, vegetal y animal. ⁵Línea prioritaria de investigación Agroecosistemas sustentables.

* Autor responsable: ramosj@colpos.mx

RESUMEN

Con el fin de mejorar el valor nutritivo de alimentos a base de residuos de la cosecha mecanizada de la caña de azúcar (RCMCA), se evaluaron cuatro niveles de hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) (0%, 3%, 6% y 9%) y cuatro tiempos de conservación (0, 20, 40 y 60 días) en un diseño completamente al azar con arreglo factorial. Se registró interacción en todas las variables estudiadas, resaltando que el pH fue mayor a medida que se incrementó el nivel de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, independientemente de los días de conservación. La materia seca (MS) disminuyó conforme transcurrió el tiempo de conservación, independientemente de los niveles de $\text{Ca}(\text{OH})_2$. El contenido de proteína cruda (PC) en todos los tratamientos fue mayor de 10%. El contenido de FDN y FDA disminuyeron con la adición de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y los días de conservación estudiados. La degradación *in situ* de la materia seca (DIMS), de la fibra detergente neutro (DIFDN), de la fibra detergente ácida (DIFDA), así como la tasa de degradación y fracción soluble, aumentaron con los niveles de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, concluyendo que el contenido de PC en los RCMCA fue mayor a 10% en todos los tratamientos. La adición de hidróxido de calcio disminuye el contenido de FDN, FDA y mejora la degradación de la materia seca y componentes fibrosos de los RCMCA, además de aumentar el contenido de cenizas.

Palabras claves: hidróxido, calcio, residuos mecanizados de caña; incubación ruminal

INTRODUCCIÓN

La cosecha mecanizada de la caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) genera grandes cantidades de residuos fibrosos (hojas, vainas, cogollos etcétera) que están disponibles en el periodo de seca y constituyen una fuente potencial de alimentos para los rumiantes (Martin, 2004). La presencia del polímero de lignina en las paredes



celulares de los residuos de la cosecha mecanizada de la caña de azúcar (RCMCA) puede limitar la degradación efectiva de los polisacáridos presentes en ella (Sun *et al.*, 2006). La mayoría de los enlaces entre lignina, hemicelulosa y celulosa son de tipo éster o éter, susceptibles a ser hidrolizados con tratamientos alcalinos (Wang *et al.*, 2012). El hidróxido de sodio (NaOH) es una de las sustancias alcalinas más utilizada, pero su manejo se considera peligroso (Chaudhry, 1998); por el contrario, el hidróxido de calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ es menos peligroso, disponible y económico. Con tal fin se evaluaron tratamientos para conservar y mejorar el valor nutritivo de alimentos a base de RCMCA con la adición de hidróxido de calcio.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se realizó en el *Campus* Tabasco del Colegio de Postgraduados (km 21 Carretera Cárdenas-Coatzacoalcos, Tabasco, México), con clima cálido húmedo, abundantes lluvias en verano, temperatura promedio de 26 °C y precipitación de entre 2000-2500 mm (INEGI, 2010). En campo se recolectaron 250 kg de RCMCA de la variedad de caña CP 20-86, la cual fue molida con una criba de cuatro mm y se mezcló con los ingredientes indicados en el Cuadro 1.

Se tomaron cinco kilos de cada mezcla y se embalaron herméticamente en bolsas negras de polietileno, extrayendo el aire con una aspiradora (Koblenz®). El diseño utilizado fue completamente al azar, con arreglo factorial 4×4, tomando los niveles de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (0%, 3%, 6% y 9%) como primer factor y al tiempo de conservación (0, 20, 40 y 60 días) con tres repeticiones como segundo; cada bolsa representó una unidad experimental. El procesamiento de los datos se realizó mediante el paquete estadístico R, Foundation for statistical computing, versión 2.10.1 (2009). Se determinó materia seca (MS), proteína cruda (PC), según la AOAC (2000), fibra detergente neutro (FDN) y fibra detergente ácido (FDA), según Van Soest *et al.* (1991), nitrógeno amoniacal (N-NH_3), según McCullough *et al.* (1967), ácido láctico (SIGMA, 1990), y el pH se midió con un potenciómetro J.T Baker, modelo pH10. La degradación *in situ* de la materia seca (DIMS) se determinó por la metodología de Ørskov *et al.* (1980); se utilizaron tres semovientes canulados en rumen, con un peso vivo promedio de 729 ± 98 kg. Los horarios estudiados fueron: 3:15, 7:15, 12:30, 19:45, 31:45 y 78:45 horas y cada semoviente

(toro) se tomó como una repetición. Para comparar la DIMS entre tratamientos (T1-T16) en cada tiempo de incubación, se utilizó un análisis de varianza en un arreglo factorial de dos factores (Montgomery, 2004), tomando los tratamientos como un factor y el tiempo de incubación ruminal como el otro. A los residuales de las bolsas del horario 31:45 h, utilizadas en la determinación de la DIMS, se les determinó el porcentaje de FDN y FDA con la metodología de Van Soest *et al.* (1991) para obtener la degradación *in situ* de la fibra detergente neutra y fibra detergente ácido. En las comparaciones múltiples se utilizó la prueba de Tukey (1953). Las pruebas estadísticas se consideraron significativas cuando $P < 0.05$; el paquete estadístico utilizado fue STATGRAPHICS Centurión XV. 15.2.06 (StatPoint, 2007) (Figura 1).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se registró interacción en el contenido de MS (Cuadro 2), la cual disminuyó conforme transcurrieron los días de conservación, independientemente de los niveles de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, atribuido a la utilización de los carbohidratos solubles como fuentes energéticas en los procesos metabólicos de los lactobacilos, aunque también pudiera deberse a la pérdida de los AGV, debido a la temperatura que se utilizó para el secado de las muestras, como ha sido reportado por Freitas *et al.* (2007). Cavali *et al.* (2010) mencionan que la disminución de la MS durante el ensilaje de la caña de azúcar se debe principalmente a la producción de gases (CO_2) durante el proceso de fermentación.

De manera semejante, se determinó interacción con el contenido de cenizas, la cual aumentó en sus valores

Cuadro 1. Ingredientes utilizados para hacer los alimentos a base de ¹RCMCA.

Ingredientes %	Alimentos			
	1	2	3	4
Caña molida	30	30	30	30
Pulido de arroz	10	10	10	10
² Vitafert	15	15	15	15
Urea	1	1	1	1
Sal mineral	0.5	0.5	0.5	0.5
Sulfato de magnesio	0.3	0.3	0.3	0.3
¹ RCMCA	43.2	40.2	37.2	34.2
³ Ca (OH) ₂	0	3	6	9

¹ Residuos de la cosecha mecánica de caña de azúcar.

² Producto biológico obtenido por fermentación líquida compuesto de bacterias lácticas y levaduras.

³ Hidróxido de calcio.



Figura 1. A-B: Recolección de paja de caña de azúcar. C: Tratamiento de la paja con hidróxido de calcio. D: Embolsado para digestión.

en forma directa por la adición del $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Cuadro 2). Con respecto al contenido de PC, se registró también un incremento a los 20 días de conservación en los niveles 0%, 3% y 6% de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, lo cual pudiera estar relacionado con la dis-

Cuadro 2. Efecto de niveles de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y días de conservación en el contenido de materia seca (MS), cenizas y proteína cruda (PC) de alimentos elaborados con RCMA.

Niveles de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (%)	Días de conservación	MS (%)	Cenizas (%)	PC (%)
0	0	61.43 ^{de}	16.59 ^l	11.71 ^{bcd}
0	20	60.43 ^g	18.38 ^{hi}	15.93 ^a
0	40	61.57 ^{de}	17.28 ^k	16.11 ^a
0	60	56.67 ^j	17.84 ^j	16.16 ^a
3	0	63.17 ^b	20.16 ^g	10.48 ^e
3	20	62.63 ^{bc}	18.20 ^{ij}	11.22 ^d
3	40	62.67 ^{bc}	22.42 ^f	11.84 ^{bc}
3	60	59.53 ^h	18.80 ^h	11.32 ^{cd}
6	0	64.33 ^a	22.48 ^f	11.47 ^{cd}
6	20	61.47 ^{de}	25.62 ^e	12.30 ^b
6	40	61.73 ^{de}	26.49 ^d	11.79 ^{bcd}
6	60	61.30 ^{ef}	28.14 ^c	11.35 ^{cd}
9	0	64.30 ^a	35.89 ^a	11.48 ^{cd}
9	20	61.50 ^{de}	27.93 ^c	11.50 ^{cd}
9	40	62.13 ^{cd}	29.77 ^b	11.39 ^{cd}
9	60	60.57 ^{fg}	29.86 ^b	11.35 ^{cd}
		EE±0.0054***	EE±0.0036***	EE±0.0041***

abcdefghi Medias con distinto superíndice en la misma columna difieren a $P < 0.05$ (Tukey, 1953), *** $P < 0.001$

minución de la MS, como ha sido anotado por Rodríguez *et al.* (2001); sin embargo, cuando se adicionó 9% de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, no se encontraron diferencias en el contenido de PC entre los días de conservación (Cuadro 2). El contenido de FDN y FDA disminuyó con la adición de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en todos los niveles y todos los tiempos de conservación evaluados (Cuadro 3). Lo anterior podría estar relacionado a la hidrólisis alcalina sobre la fracción fibrosa. Por otra parte, la disminución de la fracción fibrosa durante los días de conservación en todos los niveles de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ estudiados, podría atribuirse a que los lactobacilos utilizan la hemicelulosa y celulosa solubilizada.

En este sentido, Balieiro Neto *et al.* (2007) indicaron que existe un efecto del óxido de calcio sobre la fracción fibrosa del ensilaje de caña de azúcar, debido al rompimiento de los enlaces moleculares de tipo éster entre el ácido fenólico y la hemicelulosa y la celulosa. Por su parte, Cavali (2010) evaluó niveles de óxido de calcio (0, 0.5, 1, 1.5 y 2%) en ensilaje de caña de azúcar y encontró una disminución lineal de la fracción fibrosa por efecto de los niveles de óxido de calcio, y mencionó que este efecto se debe al rompimiento de los enlaces éster entre los ácidos fenólicos y glucosídicos de la pared celular, exponiendo más la hemicelulosa y celulosa a los microorganismos.

El pH inicial (día 0) fue de 5.47, 10.75, 12.90 y 13.24 para los diferentes niveles de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y mostró disminución con los días de conservación hasta valores de 4.58, 7.65, 8.50,

Cuadro 3. Efecto de niveles de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y días de conservación en el contenido de FDN y FDA en alimentos elaborados con RCMCA.

Nivel de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (%)	Días de conservación	FDN (%)	FDA (%)
0	0	61.31 ^a	33.34 ^a
0	20	53.36 ^b	29.43 ^b
0	40	53.33 ^b	29.23 ^b
0	60	53.44 ^b	28.26 ^c
3	0	52.40 ^c	29.37 ^b
3	20	51.53 ^d	28.35 ^c
3	40	45.57 ^e	25.28 ^e
3	60	44.42 ^f	24.51 ^f
6	0	42.40 ^g	27.44 ^d
6	20	37.31 ^h	23.71 ^g
6	40	31.64 ⁱ	21.38 ^h
6	60	31.69 ⁱ	20.23 ⁱ
9	0	36.77 ^h	17.23 ^j
9	20	25.44 ^j	16.44 ^k
9	40	25.31 ^j	16.62 ^{jk}
9	60	24.38 ^k	13.41 ^l
		EE±0.0051***	EE±0.0051***

abcdefghijkl Medias con diferentes superíndice en la misma columna difieren a $P < 0.05$ (Tukey, 1953). *** $P < 0.001$

y 11.43. Esta misma tendencia fue reportada por Cavali *et al.* (2010) en un estudio donde probaron niveles de óxido de calcio (0%, 0.5%, 1%, 1.5% y 2%) en ensilaje de caña de azúcar. La concentración de ácido láctico aumentó principalmente con los niveles 0%, 3% y 6% de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Cuadro 4).

La reducción del pH se debió a una neutralización parcial del ambiente alcalino por los ácidos orgánicos formados durante el proceso de fermentación, principalmente el ácido láctico (Molina, 1983; Pina *et al.*, 2009). En este sentido, en estudios realizados con caña de azúcar fermentada, Rodríguez (2001) y Ramos *et al.* (2006) indicaron que existe alta correlación entre pH y las concentraciones de amoníaco y ácido láctico ya que, a medida que se incrementa la concentración de amoníaco, el pH se eleva, mientras que al aumentar la de ácido láctico, éste disminuye. La concentración de nitrógeno amoniacal (N-NH_3) aumentó, registrando su mayor valor con 3% de hidróxido de calcio, lo cual fue coincidente con lo anotado por Bolsen *et al.* (1983) al evaluar paja de trigo en ensilaje, tratada con 5% de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ durante 60 días de conservación. La adición de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ al 9% en los diferentes días de conservación registró los mayores valores de pH y las menores concentraciones de N-NH_3 .

Cuadro 4. Efecto de niveles de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y días de conservación en el pH, ácido láctico y N-NH_3 en los alimentos elaborados con RCMCA.

Nivel $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (%)	Días de conservación	pH	Ácido láctico (%)	N-NH_3 (%)
0	0	5.47 ^h	2.92 ^f	0.24 ^h
0	20	3.56 ^j	5.17 ^c	4.43 ^f
0	40	4.26 ⁱ	6.35 ^a	4.75 ^e
0	60	4.58 ⁱ	6.05 ^b	5.10 ^d
3	0	10.76 ^d	1.63 ^h	0.31 ^h
3	20	7.25 ^g	4.59 ^d	8.36 ^b
3	40	7.71 ^g	4.09 ^e	8.72 ^a
3	60	7.65 ^g	5.77 ^b	7.39 ^c
6	0	12.90 ^a	1.22 ⁱ	0.22 ^h
6	20	10.39 ^d	2.00 ^g	1.50 ^g
6	40	9.28 ^e	2.70 ^f	1.72 ^g
6	60	8.50 ^f	4.34 ^{de}	4.57 ^{ef}
9	0	13.24 ^a	1.53 ^h	0.21 ^h
9	20	12.26 ^b	1.44 ^{hi}	0.22 ^h
9	40	12.26 ^b	1.66 ^h	0.26 ^h
9	60	11.43 ^c	1.39 ^{hi}	0.27 ^h
		EE±0.0035***	EE±0.0019***	EE±0.0019***

abcdefghij Medias con distinto superíndice en la misma columna difieren a $P < 0.05$. *** $P < 0.001$

Autores como Bolsen *et al.* (1983) mencionan que un pH elevado es indicativo de una fermentación restringida, lo que se refleja en una baja concentración de ácidos orgánicos y amoníaco, tendencia semejante a lo observado en la presente evaluación, con los tratamientos de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ al 9% en todos los tiempos de conservación. Se tiene conocimiento de que pH en rangos de 3.8 a 4.1 es un indicador de buena conservación del ensilaje, lo cual concuerda con el tratamiento testigo (sin $\text{Ca}(\text{OH})_2$); sin embargo, la adición de 9% de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ elevó el pH hasta 13.24 en el día cero y posteriormente descendió a 11.43 en el 60. El pH final alcalino en este tipo de procesos donde se utiliza $\text{Ca}(\text{OH})_2$, no se relaciona con una fermentación inadecuada (Cavali *et al.*, 2010), ya que la disminución del pH y la producción de ácido láctico en relación con el tiempo de conservación, son una evidencia de la fermentación y la acción microbiana por la adición del cultivo de lactobacilos (vitafert). En este proceso el objetivo de la adición de un álcali fue buscar una degradación de las estructuras de la fibra de los RCMCA y romper los enlaces éter de los enlaces lignocelulósicos de las paredes celulares, además de la conservación del material, lo cual quedó evidenciado por la disminución del contenido de la FDN, FDA (Cuadro 3), además del incremento en la degradación in situ de la MS, FDN, FDA. (Cuadro 5, 6 y 7) (Balieiro Neto *et al.*, 2007).

Cuadro 5. Efecto de niveles de Ca(OH)₂ y días de conservación en la degradación *in situ* de la MS (%) en los alimentos elaborados con RCMCA.

Tratamientos	Horarios (horas)					
	3:15	7:15	12:30	19:45	31:45	78:45
T1 0-0	28.13 ^a	32.70 ^a	35.74 ^a	40.37 ^a	46.21 ^a	52.63 ^b
T2 0-20	34.28 ^c	33.11 ^a	39.40 ^b	41.15 ^a	50.25 ^c	54.43 ^c
T3 0-40	34.38 ^c	35.23 ^b	39.50 ^b	44.34 ^b	49.95 ^b	50.47 ^a
T4 0-60	32.50 ^b	36.33 ^b	40.83 ^c	43.33 ^b	48.31 ^b	51.09 ^a
T5 3-0	30.75 ^b	37.56 ^c	41.11 ^c	48.18 ^c	56.12 ^d	63.92 ^e
T6 3-20	35.37 ^c	35.83 ^b	41.22 ^c	48.94 ^c	59.23 ^e	64.05 ^e
T7 3-40	38.06 ^d	38.38 ^{cd}	42.44 ^d	48.74 ^c	60.38 ^e	66.71 ^f
T8 3-60	31.50 ^b	32.26 ^a	43.22 ^d	48.87 ^c	57.02 ^d	61.56 ^d
T9 6-0	32.64 ^b	39.21 ^d	46.20 ^e	52.26 ^d	66.38 ^f	75.69 ^g
T10 6-20	39.00 ^d	45.18 ^e	50.96 ^f	53.72 ^d	72.17 ^g	78.91 ^h
T11 6-40	40.87 ^e	47.79 ^f	51.02 ^f	58.38 ^f	76.43 ^h	83.68 ^j
T12 6-60	45.53 ^f	50.64 ^g	50.18 ^f	56.66 ^e	71.46 ^g	83.18 ^j
T13 9-0	40.85 ^e	47.80 ^f	54.12 ^g	56.75 ^e	75.35 ^h	80.72 ⁱ
T14 9-20	40.69 ^e	50.03 ^g	55.22 ^g	58.70 ^f	78.49 ⁱ	86.46 ^k
T15 9-40	46.96 ^f	52.49 ^h	58.13 ^h	61.26 ^g	79.45 ⁱ	86.46 ^k
T16 9-60	45.23 ^f	53.74 ^h	57.65 ^h	60.23 ^g	79.06 ⁱ	86.90 ^k
EE ±	±0.20 ^{***}	±0.20 [*]	±0.20 [*]	±0.20 ^{**}	±0.20 ^{***}	±0.20 ^{***}

Medias con letras distintas en una misma columna difieren, prueba de Tukey (1953).

*P<0.05, **P<0.01, ***P<0.001; ¹Tratamientos: Nivel de Ca (OH)₂-Días de conservación.

Cuadro 6. Efecto de niveles de Ca(OH)₂ y días de conservación en la DIFDN y DIFDA en horario de 31:45 h de alimentos elaborados con RCMCA.

Nivel de Ca(OH) ₂ (%)	Días de conservación	DIFDN (%)	DIFDA (%)
0	0	27.95 ^g	12.45 ^k
0	20	24.41 ^{hi}	11.83 ^k
0	40	23.88 ^{hi}	12.52 ^k
0	60	22.14 ⁱ	6.07 ^l
3	0	33.58 ^f	25.03 ⁱ
3	20	38.03 ^e	27.98 ^h
3	40	32.60 ^f	21.06 ^j
3	60	24.89 ^h	11.60 ^k
6	0	39.45 ^{de}	39.79 ^e
6	20	43.26 ^c	42.76 ^d
6	40	45.42 ^{bc}	47.84 ^b
6	60	34.88 ^f	33.75 ^g
9	0	40.78 ^d	36.03 ^f
9	20	46.16 ^b	45.30 ^c
9	40	48.60 ^a	49.60 ^a
9	60	46.51 ^{ab}	37.29 ^f
		EE ± 0.0157 ^{***}	EE ± 0.0114 ^{***}

abcdefghijkl Medias con diferentes superíndice en la misma fila difieren a P<0.05 (Tukey, 1953).

***P<0.001

El Cuadro 7 muestra cómo la tasa de degradación y la de fracción soluble se incrementaron con la adición del Ca(OH)₂. A este respecto, Cavali (2010) encontró también que la fracción soluble del ensilaje de caña de azúcar aumenta linealmente con niveles de óxido de calcio (0%, 0.5%, 1%, 1.5% y 2%), al igual que la degradación *in vitro* de la MS. Por su parte, Silva *et al.* (2004) observaron un aumento en la digestibilidad del bagazo de caña con la adición de Ca(OH)₂ y concluyeron que esto estuvo relacionado con la hidrólisis alcalina por la ruptura de los enlaces intermoleculares de puente de hidrogeno, aumentando con ello la digestión de celulosa y hemicelulosa.

CONCLUSIONES

El Contenido de PC en los RCMCA fue mayor a 10% en todos los tratamientos estudiados. La adición de Ca(OH)₂ disminuyó el contenido de FDN, FDA y mejoró la degradación de la materia seca y de los componentes fibrosos de los RCMCA. También incrementó el contenido de cenizas. Se observó buen aspecto de conservación en el producto final.

LITERATURA CITADA

- AOAC. 2000. Official Methods of Analysis. 16th Ed. Off. Agric. Chem., Washington, D.C., U.S.A.
- Baleiro-Neto G., Siqueira G.R., Reis A.R., Nogueira J.R., Piza T.M., Piza T.A.P. 2007. Calcium oxide as additive on the sugarcane ensilage. Rev. Bras. Zootec. 36:1231-1239.
- Bolsen K.K., Tetlow R.M., Wilson R.F. 1983. The effect of calcium and sodium hydroxides and of sodium acrylate on the fermentation and digestibility *in vitro* of ensiled whole-crop wheat and barley harvested at different stages of maturity. Anim. Feed Sci. Technol. 9:37-47.
- Cavali J., Pereira G.O., Valadares C.S., Santos E.M., Pinto de Carvalho G.G., Santos M.V., Porto O.M., Rodríguez F.J. 2010. Bromatological and microbiological characteristics of sugarcane silages

Cuadro 7. Efecto de los niveles de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y días de conservación sobre la fracción soluble e insoluble potencialmente degradable y tasas de degradación de alimentos elaborados con RCMA.

Tratamientos	Parámetros			
	Fracción (%)			
	*SO	*IPD	*Kd (h^{-1})	Error
T1 0-0	28.46	71.54	0.0064	3.43
T2 0-20	30.90	69.10	0.0066	4.29
T3 0-40	32.62	67.38	0.0054	5.16
T4 0-60	32.28	67.72	0.0055	4.84
T5 3-0	30.30	69.70	0.0109	4.48
T6 3-20	31.66	68.34	0.0109	4.90
T7 3-40	32.52	67.48	0.0117	4.84
T8 3-60	30.49	69.51	0.0103	5.35
T9 6-0	30.01	69.99	0.0181	4.01
T10 6-20	32.56	67.44	0.0213	5.08
T11 6-40	32.19	67.81	0.0268	4.64
T12 6-60	35.14	64.86	0.0223	5.37
T13 9-0	33.21	66.79	0.0248	5.53
T14 9-20	31.95	68.05	0.0306	4.61
T15 9-40	34.41	65.59	0.0322	5.71
T16 9-60	33.69	66.31	0.0323	5.75

*SO=Soluble; *IPD=Insoluble potencialmente degradable; *Kd=Tasa de degradación (h^{-1}); *Hidróxido de calcio; Tratamientos: Nivel de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ /Días de conservación.

- treated with calcium oxide. Rev. Bras. Zootec. 39(7):1398-1408
- Chaudhry A.S. 1998. In vitro in sacco digestibility of wheat Straw treated with calcium oxide and sodium hydroxide alone or with hydrogen peroxide. Anim. Feed Sci. Technol. 74:301-313.
- Freitas A.W.P., Rocha F.C., Fagundes J.L., Fonseca R. 2007. Nutritional quality of sugar cane treated with calcium oxide. J. Anim. Sci. 85(Suppl.1), 347.
- INEGI. 2010 <<http://www.inegi.gob.mx>> / Consultado: 22 Abril de 2012
- Martín P.C. 2004. La alimentación del ganado con caña de azúcar y sus subproductos. Editorial EDICA, La Habana.
- McCullough H. 1967. The determination of ammonia in whole blood by direct colorimetric method. Clin. Chem. 17:297-304.
- Molina E., Boza J., Aguilera J.F. 1983. Nutritive value for ruminants of sugar cane bagasse ensiled after spray treatment with different levels of NaOH. Anim. Feed Sci. Technol. 9:1-17.
- Montgomery D.C. 2004. Diseño y análisis de experimentos. 2a Ed. Limusa Wiley, México, D.F.
- Ørskov E.R., Hovell F.D., Mould. 1980. Uso de la técnica de la bolsa de nylon para la evaluación de los alimentos. Prod. Anim. Trop. 5:195-213.
- Pina D.S., Tedeschi L.O., Valadares S.C., Azevedo J.A., Detmann E., Anderson R. 2009. Influence of calcium oxide level and time of exposure to sugarcane on in vitro and in situ digestive kinetics. Anim. Feed Sci. Technol. 153:101-112.
- Ramos J.A., Elías A., Herrera F. 2006. Procesos para la producción de un alimento energético-proteico para animales. Efecto de cuatro fuentes energéticas en la fermentación en estado sólido (FES) de la caña de azúcar. Rev. Cubana Cienc. Agric. 40 (1) 51-58.
- Rodríguez Z., Boucourt R., Elías A., Madera M. 2001. Dinámica de fermentación de mezclas de caña (*Saccharum officinarum*) y boniato (*Ipomea batata* Lam.). Rev. Cubana Cienc. Agric. 35:147.
- SIGMA. 1990. Lactate, quantitative, enzymatic determination of lactate in whole blood at 340 nm (Procedure No. 826-uv) USA. 31 p.
- Silva V.M., Pereira V.L., Lima G.S. 2004. Producción, conservación y utilización de alimentos para caprinos y ovinos. <http://www.ipa.br/OUTR/CAPR/teproag.htm> /Consultado: 07 de Mayo de 2012/.
- Stapoint Inc. 2007. STATGRAPHICS Centurion XV versión 15.2.06. <<http://www.statgraphics.com>>
- Software R. 2009. Foundation for statistical computing, versión 2.10.1.
- Sun X., Andrew I., Joblin K., Harris P., McDonald A., Hoskin S. 2006. Polysaccharide compositions of leaf cell walls of forages chicory (*Cichorium intybus* L.) Plant Science. 170:18-27.
- Tukey J. 1953. The Problem of Multiple Comparisons. Unpublished manuscript. Princeton University.
- Van Soest P.J., Robertson J.P., Lewis B.A. 1991. Symposium: carbohydrate methodology, metabolism, and nutritional implications in dairy cattle. J. Dairy Sci. 74:3583-3597
- Wang Z., Ruyi L., Xu J., Marita J.M., Hatfield D.R., Qu R., Cheng J.J. 2012. Sodium hydroxide pretreatment of genetically modified switchgrass for improved enzymatic release of sugars. Bioresour. Technol. 110:364-370.

