

# El potencial del sorgo dulce como fuente de energía y proteína<sup>a</sup>

Rolando Cifuentes<sup>1</sup>, Ricardo Bressani<sup>2</sup>, & Carlos Rolz<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Centro de Estudios Agrícolas y Forestales, <sup>2</sup>Centro de Estudios en Ciencias y Tecnología de Alimentos, <sup>3</sup>Centro de Ingeniería Bioquímica, Instituto de Investigaciones, Universidad del Valle de Guatemala

**RESUMEN:** Se plantaron seis variedades de sorgo dulce en la Costa Sur de Guatemala y se determinaron el rendimiento y contenido de azúcares del tallo, la productividad de etanol, como también, la composición química y las características nutricionales del grano, con el objetivo general de agrupar las variedades que mostraran una productividad de etanol alta y a su vez, tuviesen adecuadas características nutricionales del grano. La variedad Top 76-6 fue superior en ambos términos. Dicha variedad mostró una producción de 42.15 Mg de tallo fresco por hectárea y 2.36 Mg de grano seco por hectárea. La productividad de etanol fue de aproximadamente 220 g etanol por kg de tallo seco, equivalente a 2,465 litros de etanol por hectárea. El grano tuvo el menor contenido de polifenoles y una adecuada calidad de la proteína, mostrando un PER igual a 1.07 y un 83.2 % de digestibilidad.

**PALABRAS CLAVE:** Sorgo dulce, Rendimiento del tallo, Rendimiento del grano, Contenido de azúcar, Productividad del azúcar, Productividad del etanol, PER del grano, Digestibilidad de la proteína.

## The potential of sweet sorghum as a source of ethanol and protein

**ABSTRACT:** Six sweet sorghum varieties were sowed in the Guatemalan Pacific coastal plains in order to determine their stalk yield and sugar content, the ethanol productivity, as well as, the chemical composition and nutritional characteristics of the grain, with the general objective of matching varieties with adequate ethanol productivity and with appropriate nutritional characteristics of the grain. The Top 76-6 variety gave the best combined outcome, high ethanol productivity and the best grain protein quality. The stem and grain average yields obtained were 42.15 Mg of fresh stalk/ha and 2.36 Mg dry grain/ha, respectively. The average ethanol productivity was 220 g ethanol per kg. of original dry stem, equivalent to 2,465 liters of ethanol per ha. The grain had the lowest polyphenol levels and an adequate relative protein quality indicated by a 1.07 PER value and a 83.2 % protein digestibility.

**KEY WORDS:** Sweet sorghum, Stem yield, Grain yield, Sugar content, Sugar productivity, Ethanol productivity, Grain PER, Protein digestibility

## Introducción

El planeta depende exclusivamente del petróleo para obtener los combustibles empleados en el transporte. Este recurso natural se agota y tiene un límite, no importando las nuevas tecnologías para su extracción o el descubrimiento de nuevos depósitos. Es necesario desarrollar fuentes alternas que sean económicamente factibles y tecnológicamente robustas. Los denominados biocombustibles de primera generación, léase el etanol y los ésteres metílicos o etílicos de los ácidos grasos se utilizan en varios países para ser mezclados con la gasolina y con el diesel respectivamente. En su producción se emplea tecnología confiable, la cual se encuentra ampliamente disponible, y lo que es importante, estas fuentes de energía poseen ventajas inherentes. Promueven el desarrollo agrícola, crean empleos, son carbono neutro y reducen las emisiones gaseosas. También tienen desventajas. Primero, emplean productos alimenticios como materias primas, lo cual consecuentemente afecta el suministro de alimentos y altera los precios en el mercado. Segundo, la tierra que generalmente se usaría para incrementar la producción de alimentos, o el área boscosa, se emplearía para producir los combustibles, lo cual llevaría a estimular la deforestación, la pérdida de biodiversidad y al aumento de las emisiones de gases de invernadero. Tercero, el incremento en el uso de la tierra resultaría en un deterioro ambiental debido al intenso uso de fertilizantes inorgánicos y plaguicidas que causaría mayor contaminación de las aguas superficiales.

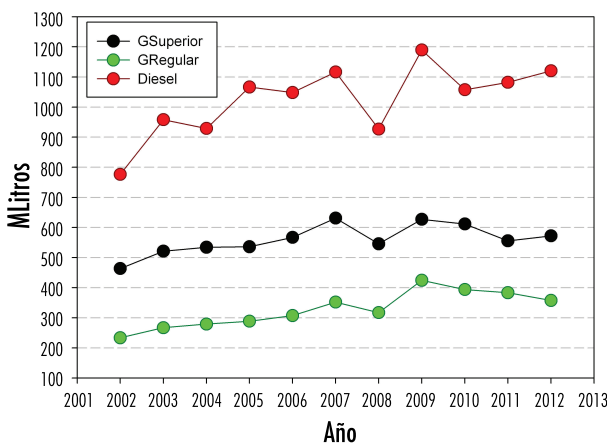
Encontrar un cultivo que evite las desventajas anteriores es un reto mayúsculo. Las plantas ricas en azúcar, especialmente aquellas que pueden denominarse como de multipropósito, como el sorgo dulce o azucarado (*Sorghum bicolor* (L.) es para muchos la mejor alternativa (Rooney et al. 2007; Prasad et al. 2007; Zhang et al. 2010; Linton et al. 2010; Yu et al. 2012). El sorgo o maicillo se encuentra en el quinto lugar de los cereales producidos mundialmente. Dependiendo de su variedad, produce diversos productos. Los sorgos que son eficientes productores de granos se emplean en la alimentación humana, los forrajeros en la alimentación animal, y los dulces o azucarados para producir miel. Esta última variedad acumula en su tallo al madurar una alta concentración de azúcar. El

<sup>a</sup> Se ha publicado una versión en la revista *Energy for Sustainable Development* 21 (2014) 13-19

sorgo posee un mecanismo fotosintético bastante eficiente y aprovecha al máximo los nutrientes del suelo. Requiere menos agua que la caña de azúcar y es tolerante tanto a la sequía como a las inundaciones. Tiene un ciclo corto de crecimiento y desarrollo y es capaz de retoñar varias veces. En un estudio reciente en el cual se compararon varias materias primas para producir etanol combustible, la caña de azúcar en Brasil y el sorgo dulce en China, resultaron ser las opciones mejores, ya que en ambos casos se mostraba el uso más eficiente de la tierra, el nitrógeno, el agua y la energía (de Vries et al. 2010).

Existen varias maneras de introducir al sorgo en la agricultura tropical. Una de ellas consistiría en incorporar el sorgo dulce a la operación normal de la industria cañera. Es decir, plantar el sorgo de manera que se coseche y que se emplee en las destilerías que procesan melaza, en el intervalo de tiempo en donde no hay zafra, logrando de esta manera que dichas plantas funcionen durante todo el año (Woods, 2001; Guigou et al. 2011). Otro escenario sería el de plantaciones de sorgo dulce en diferentes zonas del país, las cuales surtirían de materia prima a pequeñas biorefinerías (Bruins y Sanders, 2012), las cuales producirían etanol y productos alimenticios del grano del sorgo.

Guatemala es un país importador neto de combustibles líquidos derivados del petróleo, tal como puede apreciarse en la Gráfica 1. Las cifras mostradas indican un consumo actual de las gasolinas y el diesel del orden de los 2,000 Giga litros por año. Por otro lado, el país en años recientes ha mantenido una exportación de etanol combustible de aproximadamente 150 Mega litros por año, producidos en cinco destilerías que utilizan melazas de caña únicamente en tiempo de la zafra, aproximadamente 130 días al año. No es el propósito de este trabajo analizar porque existe esta disyuntiva, sino que, por el contrario ofrecer una alternativa a la caña de azúcar con el sorgo dulce, el cual, según la información existente, puede sembrarse en una amplia gama de microclimas, aun en tierras marginales, requiere menos fertilización y es más tolerante a la sequía e inundaciones que la caña de azúcar.



Gráfica 1. Importaciones de gasolinas superior y regular y diesel en el periodo 2002 al 2012

El presente estudio fue realizado para cumplir dos importantes objetivos. Primero, se deseaba cuantificar el rendimiento de algunas variedades de sorgo dulce expuestas a las condiciones ambientales, las características del suelo y a las prácticas agrícolas de la región cañera del país en la Costa Sur. Segundo, la identificación de aquellas variedades que tuviesen un rendimiento aceptable de etanol a la par de producir un grano de adecuadas características nutricionales. Este planteamiento dual coincide con la visión general de buscar una seguridad energética y alimenticia en forma simultánea y en la literatura consultada raramente se ofrecen detalles de cómo lograrla.

## Metodología

*Variedades empleadas, localidades y diseño experimental agrícola.* Se plantaron las variedades de sorgo dulce Dale, Della, M81E, Top 76-6, Sugar Drip y Umbrella, previamente ensayadas en el año 2009 (Rolz Asturias et al, 2010) en el mes de Febrero del 2011 en dos localidades, la finca privada El Paraíso en Cocal, Suchitepéquez, a una altitud de 182 msnm, identificada en este trabajo con la letra P, y en la estación experimental agrícola de la UVG en Campo Sur, Santa Lucia Cotzumalguapa, Escuintla, a una altitud de 300 msnm, identificada con las letras CS. El tipo de suelo en P fue clasificado como un Inceptisol y en CS como un Andisol. El primero es un suelo joven y el segundo es de origen volcánico.

En ambos sitios se empleó un diseño de bloques completo al azar con tres réplicas. En cada unidad experimental se sembraron pilones de 30 días espaciados por 20 cm, en 4 filas de 4 m de largo y una distancia entre filas de 0.5 m, lo cual implicaba una densidad de 100,000 plantas por hectárea. Se emplearon pilones en lugar de semilla para minimizar el daño causado por los pájaros. Se implementó una irrigación entubada por fila con una frecuencia de tres veces por semana hasta el tiempo de cosecha. El régimen de fertilización fue el siguiente: 150 kg de N por ha, un tercio dos semanas después de la siembra, un tercio luego de un mes y el tercio final dos meses después de la primera aplicación; 50 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y 50 kg de K<sub>2</sub>O por ha, dos semanas después de la siembra. En todas las variedades se observó la antesis aproximadamente a los 63 días y la cosecha se llevó a cabo a los 116 días, cuando el grano había alcanzado una textura al tacto adecuada.

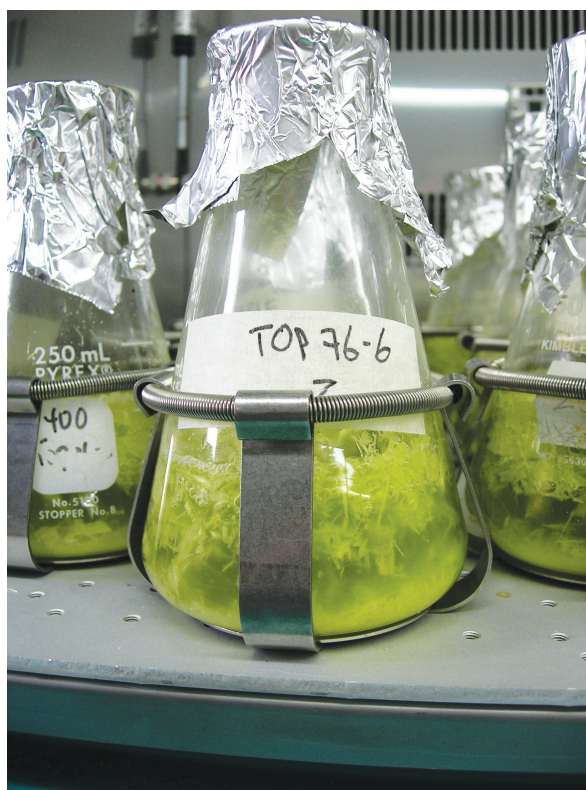
*Productividad de la biomasa del tallo.* De cada unidad experimental se cosecharon las dos filas centrales. Se removieron las hojas del tallo en forma manual, se eliminó la panoja conteniendo el grano y se registró el peso. La muestra se obtuvo de cuatro tallos escogidos al azar y cortados a ras de tierra temprano en la mañana. Se limpiaron manualmente del follaje y de hoja adherida y se les removió la parte superior. Ese mismo día se enviaron al Campo Central en la ciudad de Guatemala en donde se almacenaron a 10 °C hasta que se procesaron.

Los tallos descongelados se procesaron de la siguiente manera. Se cortó manualmente un segmento de dos de los tallos de cada variedad y de cada sitio. El segmento se escogió entre el segundo y cuarto nudo del tallo, contando de la parte inferior.

Luego se partieron en pedazos pequeños empleando un cuchillo y se pulverizaron en un molino de laboratorio de alta velocidad (IKA Works A11). Esta muestra compuesta se utilizó para los análisis de los azúcares y las pruebas de fermentación. El resto de los tallos se prensaron en un trapiche de tres rodos dentados de acero inoxidable accionado por un motor de 2 HP. En el jugo obtenido se determinó el Brix empleando un refractómetro digital (Sper Scientific Ltd Model 3000034) y luego se procedió con el análisis de los azúcares.

**Muestras del grano.** Las panojas conteniendo el grano se colectaron a mano empleando tijeras de podar. Una muestra compuesta se obtuvo de las panojas de las dos filas centrales de cada unidad experimental. Se colocaron en cajas plásticas perforadas bajo sombra y se dejaron varios días para una deshidratación parcial. Luego se removió el grano manualmente, se limpió y se obtuvo su peso. Se obtuvo una muestra representativa la cual sirvió para los análisis químicos y biológicos. La muestra se repartió en bandejas y se secó expuesta al ambiente. Se redujo su tamaño de partícula en un molino Wiley acoplado con una malla de 40. La composición química proximal se obtuvo empleando la metodología de la AOAC (AOAC, 1984) en dos fracciones de la muestra, incluyendo el análisis de los polifenoles (taninos). Para las pruebas biológicas se emplearon 3,000 g de la muestra a la cual se adicionaron un 4 % de una mezcla de minerales, 5 % de aceite comestible y un 1 % de una mezcla completa de vitaminas. Ocho ratas de 22 días de edad se asignaron a cada una de las variedades de sorgo en ensayo, alimentándose *ad libitum* por 28 días. Se obtuvo el peso cada 7 días. Se empleó leche descremada en polvo con un nivel de 9 % de proteína como referencia. Para evaluar la digestibilidad se emplearon 5 ratas por cada tratamiento. En la tercera semana del estudio se registró su peso al principio y al final de seis días, además del alimento ingerido y el peso de las heces. La digestibilidad de la proteína se estimó como el cociente del nitrógeno excretado sobre el nitrógeno ingerido (Pellet & Young, 1980). Los valores del cociente de la eficiencia proteica, PER, se estimaron como el cociente a los 28 días de la ganancia en peso sobre la proteína consumida.

**Levadura empleada, medio de cultivo y producción de etanol.** La levadura empleada en los ensayos fue una cepa de *Saccharomyces cerevisiae* empleada en las destilerías del país disponible comercialmente. Se creció en caldo *Sabourad* (Merck, 2 % glucosa, 0.5% de peptona animal y 0.5% de peptona de caseína) más un 1 % de sacarosa. Se agregaron 125 mL del caldo a un frasco de 250 mL, se esterilizó a 121 °C por 20 min, se enfrió, se inoculó con la levadura y se agitó a 250 rpm a 30 °C por 48 h (*Incubator Shaker Lab Companion Model SI-600*). Luego, la suspensión se centrifugó a 4,000 rpm y 10 °C (*Eppendorf Table-top Refrigerated Centrifuge Model 5804R*). El sólido se suspendió en agua deionizada y se ajustó la densidad óptica a 1.6, la cual correspondía a aproximadamente 1.2 g de levadura seca por litro. Un volumen de 100 mL se agregó a un frasco conteniendo una cantidad conocida de sorgo pulverizado,  $31.1 \pm 1.2$  g, empleando en promedio 20 g de levadura seca por kg de partículas secas de sorgo. Cada variedad de sorgo se ensayó en duplicado. Como se muestra en la Gráfica 2 la proporción agua-sólido empleada, que en promedio fue de  $16.33 \pm 2.60$  mL por g de sorgo seco, aseguraba que



Gráfica 2. Sistema de extracción-fermentación

inicialmente el sorgo estuviera inmerso en la fase líquida de manera de facilitar la extracción de los azúcares y su transformación simultánea a etanol. Los frascos se mantuvieron a 27 °C por 36 h (*Lab-Line Incubator Imperial III*). Los contenidos se filtraron en papel filtro *Whatman 1004-110*. Los sólidos se lavaron con agua destilada y se descartaron. Los líquidos filtrados se diluyeron a 250 mL y luego, se tomó una alícuota que se centrifugó a 10 °C a 4,000 rpm; en dicha muestra se cuantificaron el etanol y los azúcares por cromatografía, gaseosa y líquida de alta presión respectivamente.

Se empleó una extracción y fermentación simultánea debido a que es una metodología que a escala de laboratorio asegura la extracción prácticamente de todos los azúcares de la matriz sólida y de su conversión a etanol por la levadura (Rolz y de León, 2010; 2011). Por el contrario, cuando se utilizó prensado del tallo en un molino de tres tambores rotatorios en un solo paso, se obtuvo una extracción de solamente un 41 % de extracción del azúcar del tallo en el mejor de los casos. No se deseaba que un factor de una extracción parcial del azúcar, diferente en cada variedad, pudiera ejercer una influencia en los resultados.

**Determinaciones analíticas.** La humedad de los tallos de cada variedad se obtuvo de una muestra compuesta de material pulverizado que se deshidrató hasta peso constante a 65 °C. La muestra de cada variedad y sitio para cuantificar los azúcares se preparó de la siguiente manera: aproximadamente 50 g de material pulverizado se mezclaron con 250 mL de agua, se llevaron a ebullición manteniéndola por 30 min, luego se dejó

**Cuadro 1.** Productividad del tallo para las seis variedades de sorgo dulce, las dos variedades criollas de sorgo en los dos sitios

Variiedad	Productividad tallo <sup>a</sup> Mg tallo húmedo/ha (Paraiso)	Humedad <sup>b</sup> % (Paraiso)	Productividad tallo <sup>a</sup> Mg tallo húmedo/ha (Campo Sur)	Humedad <sup>b</sup> % (Campo Sur)
Dale	30.39 ± 10.13	76.54	36.29 ± 3.46	76.77
Della	30.43 ± 6.02	77.19	39.58 ± 1.97	78.45
M81-E	37.57 ± 10.30	80.73	42.66 ± 2.04	81.48
Sugar Drip	48.41 ± 11.85	80.81	36.92 ± 3.07	80.31
Top 76-6	39.96 ± 8.67	77.23	44.35 ± 2.17	79.73
Umbrella	40.44 ± 4.48	81.85	54.83 ± 1.99	80.65
Hibrido H8015	28.73 ± 4.61	77.86	25.05 ± 0.74	79.60
ICTA-Mictlán	18.29 ± 3.42	83.11	25.93 ± 1.87	81.68
Promedio ± ds	37.87 ± 6.83 <sup>a</sup>	79.42	42.44 ± 6.84 <sup>a</sup>	79.83

<sup>a</sup> El promedio se estimó tomando en cuenta únicamente las seis variedades de sorgo dulce

<sup>b</sup> Un dato para cada muestra compuesta

enfriar. La suspensión se filtró con ayuda de vacío empleando papel filtro *Whatman 1004-110*. En el filtrado los azúcares se determinaron empleando un cromatógrafo líquido de alta presión *Agilent 1100*, con un detector de índice de refracción *Agilent 1200*, una columna *Zorbax NH2*, de 25 cm de longitud, 4.6 mm de diámetro interno, y una mezcla de acetonitrilo en agua (70-30) como solvente. En las muestras fermentadas, el etanol se cuantificó empleando un cromatógrafo de gases *Agilent 6890N*, con una columna *HP-Plot Q* de 30 m de longitud y 32 mm de diámetro interno.

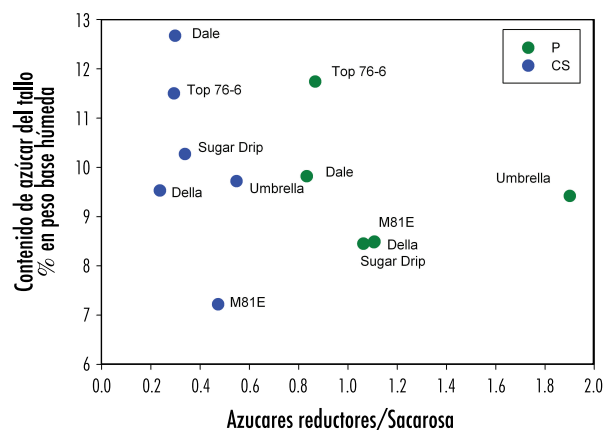
**Análisis estadístico.** Los análisis de variancia se realizaron empleando *GraphPad Prism 4*.

## Resultados

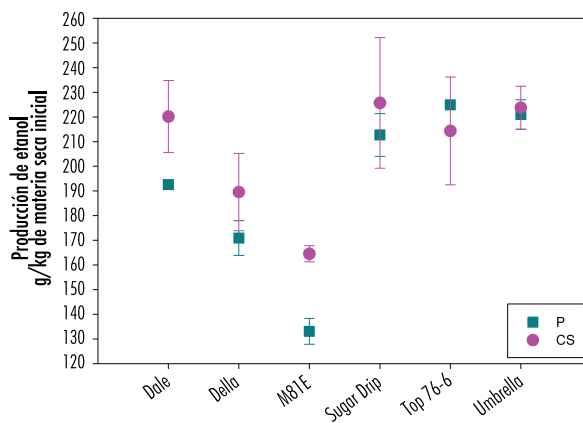
**Productividad y humedad del tallo.** La productividad de las variedades de sorgo se presenta en el Cuadro 1. No hubo diferencias significativas entre los dos sitios de experimentación (F: 2.901; P: 0.1143), entre las variedades de sorgo dulce (F: 2.577; P: 0.0832), ni tampoco en la interacción entre ambas (F: 1.746; P: 0.1987). Sin embargo, las cifras reportadas muestran que: a) la productividad de los sorgos nacionales fue inferior a las variedades de sorgo dulce en ambos sitios, y b) la humedad promedio de los tallos durante el corte fue la misma en ambos sitios.

**Contenido de azúcares en el tallo.** La Gráfica 3 presenta los azúcares totales en el tallo en el momento de la cosecha en función del cociente obtenido al dividir el contenido de azúcares reductores, es decir la suma de glucosa y fructosa, sobre el contenido de sacarosa, un azúcar no reductor, en ambos sitios. Los datos se obtuvieron en muestras compuestas provenientes de varios tallos para cada variedad y no se obtuvo un duplicado de otros tallos por lo que no fue posible llevar a cabo un análisis de variancia para determinar diferencias significativas.

Puede observarse que: a) los azúcares reductores fueron consistentemente mayores en las muestras del sitio P; y a su vez, el cociente anterior para todas las variedades estuvo > de 0.80; b) las variedades Della y Sugar Drip tuvieron el menor contenido de azúcar en el sitio P; c) la variedad M81E el menor contenido



**Gráfica 3.** Contenido de azúcar total en el tallo expresado en base húmeda en función del cociente obtenido al dividir los contenidos de glucosa y fructosa, azúcares reductores, sobre el contenido de sacarosa



**Gráfica 4.** Producción de etanol de las seis variedades de sorgo dulce en los dos sitios experimentales

de azúcar en el sitio CS y d) las variedades Top 76-6 y Umbrella mostraron similar contenido de azúcar en ambos sitios. A pesar de la dispersión encontrada en los datos se puede intuir una tendencia en donde una mayor cantidad de azúcares reductores significa un menor contenido total de azúcares en el tallo.

**Cuadro 2.** Productividad del grano de seis variedades de sorgo dulce en los dos sitios experimentales

Variedad	Productividad del grano Mg/ha, base seca (Paraíso)	Productividad del grano Mg/ha, base seca (Campo Sur)
Dale	*	2.37 ± 0.91
Della	1.22 ± 0.46	1.76 ± 0.75
M81-E	1.81 ± 0.85	3.36 ± 0.98
Sugar Drip	2.04 ± 0.84	2.80 ± 0.79
Top 76-6	1.69 ± 0.53	3.04 ± 1.41
Umbrella	2.62 ± 0.93	3.61 ± 1.48

\*Muestra extraviada

*Producción y rendimiento de etanol.* Los datos de la producción de etanol se muestran en la Gráfica 4. Las cifras para las variedades Sugar Drip, Top 76-6 y Umbrella estuvieron entre 200 y 250 g de etanol por kg de materia seca inicial. La variedad Top 76-6 produjo un promedio de aproximadamente 220 g. Dale y Della estuvieron cerca, o abajo, de los 200 g en ambos sitios. Un análisis de variancia bilateral mostro diferencias significativas entre variedades (F: 21.58; p: <0.0001) y entre sitios (F: 7.164, p: 0.0202) pero no en su interacción.

El rendimiento de etanol, definido como el cociente entre el etanol producido sobre los azúcares solubles consumidos, fue para las variedades de sorgo dulce, en promedio,  $0.44 \pm 0.06$  para el sitio P, y  $0.39 \pm 0.01$  para el sitio CS. Las diferencias fueron significativas entre variedades (F: 5.24, p: 0.0088), sitios de experimentación (F: 17.52, p: 0.0013) y su interacción (F: 5.17, p: 0.0093)

*Productividad del grano.* Los valores encontrados se encuentran reportados en el Cuadro 2. No hubo diferencias significativas entre variedades (F: 1.375; p: 0.2717), pero si hubo entre los dos sitios (F: 5.913; p: 0.0354). La interacción entre ambas variables fue despreciable (F: 0.1885; p: 0.9390). Los rendimientos obtenidos en el sitio CS fueron superiores que las del sitio P para todas las variedades. En el análisis de variancia no se incluyo la variedad Dale debido a que la muestra en el sitio P se extravió.

*Composición química y evaluación nutricional del grano.* En el Cuadro 3 se presenta la composición química del grano de las seis variedades de sorgo dulce. En términos generales puede decirse que se observó una variación natural entre variedades; también se observó que el grano de las variedades de sorgo dulce mostró una mayor cantidad de proteína y de aceite que el grano de las variedades criollas de sorgo. Las diferencias en el contenido de proteína no fueron significativas (F: 2.468, p: 0.1145), sin embargo, las diferencias en el contenido de aceite si lo fueron (F: 9.072, p: 0.0029).

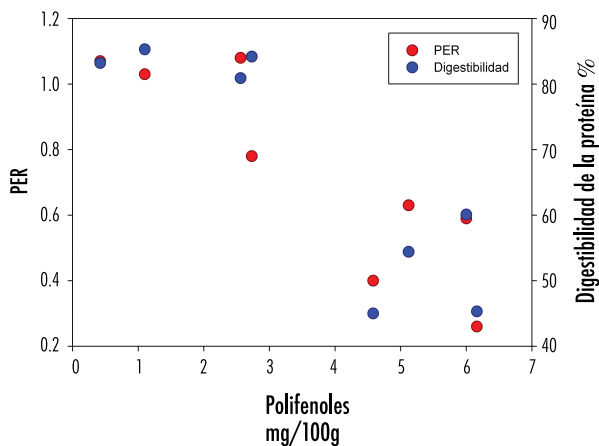
Los resultados de la evaluación biológica se encuentran en el Cuadro 4. Los valores PER estuvieron entre 0.26 para la variedad M81E hasta valores alrededor de la unidad para la variedad 76-6 y los dos sorgos nacionales. Algunas variedades mostraron baja digestibilidad de la proteína, tal el caso de M81E y Sugar Drip. Las variedades Dale y Top 76-6 y los dos sorgos criollos estuvieron cerca del valor de la proteína de la leche. En la última columna del cuadro se muestra el nivel de polifenoles (taninos) totales, el cual muestra una alta variación entre las variedades. La variedad con el menor valor de estos compuestos fue la variedad 76-6.

**Cuadro 3.** Composición química del grano, % base seca

Variedad	Humedad	Proteína	Aceite	Ceniza	Fibra
Dale	5.85 ± 0.29	12.39 ± 0.33	3.47 ± 0.25	1.74 ± 0.03	1.93 ± 0.26
Della	6.35 ± 0.67	12.01 ± 0.59	3.41 ± 0.19	1.62 ± 0.05	1.98 ± 0.14
M81E	6.55 ± 0.81	12.84 ± 0.64	3.53 ± 0.13	2.03 ± 0.13	2.99 ± 0.42
Sugar Drip	6.05 ± 0.72	11.97 ± 0.68	3.12 ± 0.39	1.77 ± 0.08	2.22 ± 0.33
Top 76-6	6.59 ± 0.54	12.11 ± 0.14	3.73 ± 0.19	1.92 ± 0.04	2.48 ± 0.20
Umbrella	6.66 ± 0.68	12.51 ± 0.78	3.92 ± 0.15	1.47 ± 0.19	3.72 ± 0.54
Hibrido H8015	6.51 ± 1.23	10.85 ± 0.94	2.63 ± 0.12	1.02 ± 0.10	2.60 ± 0.27
ICTA Mictlán	6.57 ± 0.60	11.12 ± 0.38	2.83 ± 0.04	1.84 ± 0.07	2.56 ± 0.17

**Cuadro 4.** Evaluación biológica del grano de las variedades de sorgo

Variedad	Aumento de peso corporal g	PER	Digestibilidad de la proteína %	Polifenoles totales mg/100g
Dale	20	0.78	84.2	2.73
Della	16	0.63	54.4	5.12
M81E	6	0.26	45.3	6.16
Sugar Drip	8	0.40	45.0	4.58
Top 76-6	23	1.07	83.2	0.42
Umbrella	15	0.59	60.1	6.00
Hybrid H8015	24	1.08	80.9	2.56
ICTA Mictlan	25	1.03	85.3	1.10
Milk	130	2.44	87.6	-



Gráfica 5. Tendencia lineal entre el PER y el contenido de polifenoles

Como se muestra en la Gráfica 5 existe una correlación lineal entre el PER y el contenido de polifenoles totales para los sorgos azucarados. La Gráfica 6 muestra la diferencia del color del grano de la variedad M81E, de alto contenido de taninos, y el grano de la variedad 76-6, la variedad de más bajo contenido de taninos.

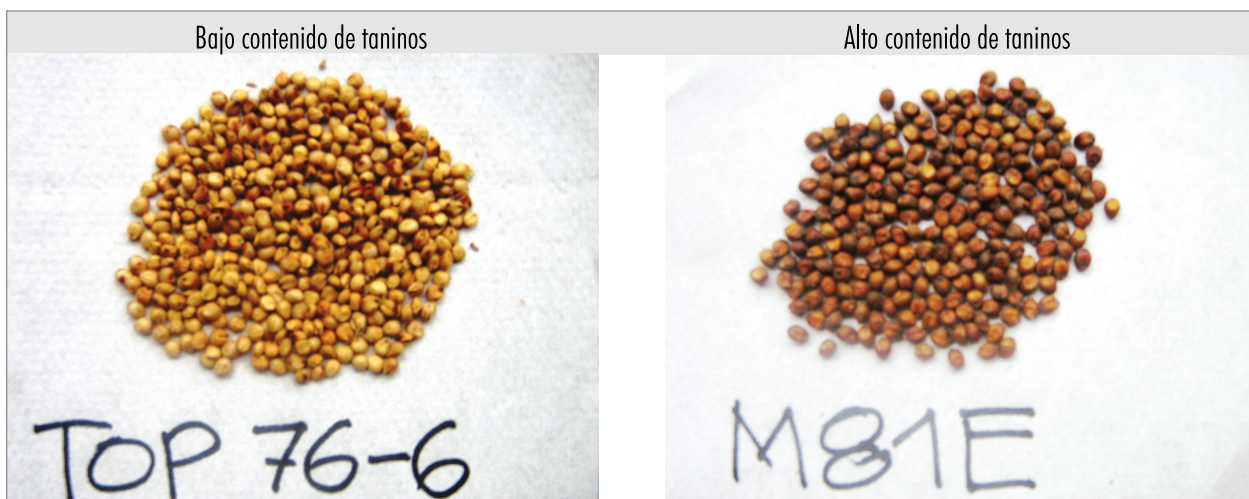
## Discusión

El principal objetivo del trabajo fue el de identificar aquellas variedades de sorgo dulce de las cuales se obtuviera un rendimiento de etanol atractivo y produjeran un grano con apropiadas características nutricionales. En la sección anterior se informaron los resultados de la productividad del tallo, el contenido de azúcares al corte, la productividad de etanol, el rendimiento del grano, su composición química y evaluación

nutricional. A continuación se presenta la discusión de los resultados en el orden anterior y tomado en cuenta el objetivo general expuesto.

*Productividad del tallo y contenido de azúcar.* Se esperaba encontrar diferencias de la productividad del tallo entre variedades y entre los dos sitios de experimentación (Cuadro 1). El resultado de la prueba estadística mostró, en el umbral de incertidumbre, que no existían diferencias significativas. Por otro lado, los datos obtenidos se encuentran en el mismo orden de magnitud de aquellos reportados en climas tropicales de Indonesia (Tsuchihashi y Goto, 2004), India (Rajendran et al. 2000), y Brasil (Albuquerque et al. 2012), aun tomando en cuenta las diferencias en el mes de inicio del ensayo, espaciamiento de plantas, nivel de fertilización, precipitación, frecuencia de riego y otras condiciones de suelo y ambiente, que pudieron existir en dichos informes. Un efecto significativo en el rendimiento se ha observado bajo las siguientes circunstancias, en diferentes años en el mismo sitio (Tamang et al. 2011; Russo y Fish, 2012), niveles de fertilización abajo de 90-110 kgN/ha (Erickson et al. 2012), o un nivel bajo de la humedad del suelo (Miller y Ottman, 2010; Vasilakoglou et al. 2011; Cosentino et al. 2012).

Todas las variedades de sorgo dulce mostraron el mismo tiempo de la antesis y la maduración. Resultados similares se informaron en Indonesia (Tsuchihashi and Goto, 2004). Sin embargo, en climas templados y subtropicales, algunas variedades han mostrado una maduración tardía, como la 76-6 y la M81E, en comparación de aquellas que han tenido una maduración temprana, como la Dale (Erickson et al. 2012). Esta diferencia puede ser causada por la intensidad de la radiación solar y el recubrimiento por nubes, que son específicas a la latitud. Las cifras de azúcares totales (Gráfica 3) estuvieron en el mismo orden de magnitud que aquellas reportadas para la variedad Wray en regiones tropicales de Indonesia (Tsuchihashi and Goto, 2004) y para varios híbridos cosechados en India (Chavan et al. 2009).



Gráfica 6. Comparación del color del grano

Es bien conocido (Lingle et al. 2012) que los tallos del sorgo dulce tienen en la maduración más azúcares reductores que la caña de azúcar. Existen diferencias entre variedades para la proporción de azúcares reductores (Teeter et al 2011). Por ejemplo, el contenido de sacarosa, expresado como un porcentaje de los azúcares totales, se ha informado que oscila entre 57 a 87, un intervalo amplio, y que el de glucosa, que predomina sobre la fructosa, varía entre 13 a 28 % (Curt et al. 1995; Amaducci et al. 2004; Sipos et al. 2009). Se esperaba, entonces, que el cociente de los azúcares reductores sobre la sacarosa fuera diferente para las variedades ensayadas (Gráfica 3). Este cociente puede ser considerado como un indicador para establecer el momento apropiado de cosecha, en conjunto con el comúnmente empleado de establecer el desarrollo del grano.

*Producción del etanol.* La producción de etanol se reportó en términos de g de etanol por kg de biomasa seca del tallo. De esta manera, es posible compararlos con la cifra que se obtendría al emplear un sorgo dulce ideal usado como referencia que contuviese 500 g de hexosas fermentables y 500 g de carbohidratos estructurales por kg de tallo seco. Empleando un rendimiento teórico de hexosas a etanol por levadura de 0.51, un cálculo simple da 255 g de etanol, la cual puede tomarse como referencia. Todos los datos experimentales (Gráfica 4) estuvieron debajo de 226 g de etanol por kg de tallo seco.

El promedio de la producción de etanol fue mayor en el sitio CS. Dicho resultado se esperaba pues el promedio del contenido de azúcar del tallo en CS también fue superior. La producción de etanol de la variedad Top 76-6 fue de aproximadamente 220 g por kg de tallo seco, cifra que equivale a 2,465 litros de etanol por hectárea. Las variedades Sugar Drip y Umbrella se acercaron a esta cifra. La concentración de etanol en el frasco al final de la fermentación era lo suficientemente baja para evitar alguna inhibición de la levadura y el consumo de azúcares (datos no informados) estuvo entre el 96 y el 100 % de la cantidad inicial en el tallo. Por lo anterior se deduce que las diferencias encontradas en la producción de etanol entre las distintas variedades (Gráfica 4) podrían haberse originado ya sea, por que los azúcares no estaban biológicamente disponibles, o por la presencia de inhibidores en algunas variedades de sorgo dulce, como se sugirió recientemente (Ratnavathi et al. 2010; Chohnan et al. 2011), o por ambas causas.

Se cree que la variación en la proporción de los azúcares individuales entre las variedades no fue un factor de influencia en la producción de etanol. Se conoce que glucosa es el azúcar preferido para ser transportado hacia dentro de la célula de la levadura, además se sabe que parte de la sacarosa es hidrolizada por la presencia de la invertasa en la membrana celular formando glucosa y fructosa que a su vez son transportados (Berthels et al. 2004; Perez et al. 2005). Por lo anterior se estima que la tasa de consumo de azúcar fue la misma en todos los experimentos, pero no necesariamente la cantidad total de azúcar transportada hacia el interior.

Algunos autores han reportado la producción de etanol de las hexosas solubles del tallo en litros por hectárea. Tew et al (2008) para las variedades Dale, M81E, Rio, Theis y Topper, cosechadas a 119 DAP (días después de plantadas) reportaron 3,380, 2,780, 3,000, 2,950 y 2,620 litros/ha respectivamente. Miller y

Ottman (2010) para la variedad M81E reportaron valores entre 2,639 a 2,878 litros por hectárea. Erickson et al (2011) informaron que en los dos años de experimentación, en todos los sitios experimentales, en todas las fechas de sembrado y para todas las variedades se obtuvo un promedio de 3,611 litros/ha. Recientemente, Dutra et al (2013) para las variedades Rio, Dale, Willey y Wray, la producción estuvo entre 949 a 2,066 litros por hectárea. Finalmente, Rao et al (2013) para variedades híbridas de India, entre 925 a 1,440 litros/ha. Todos estos valores están en el mismo orden de magnitud de los 2,465 litros/ha que se estimaron para la variedad Topper en este trabajo. Sin embargo, los autores de las referencias citadas anteriormente calcularon la producción de etanol del rendimiento del tallo fresco y su contenido de azúcar, suponiendo valores de extracción del azúcar y rendimiento a etanol de valores reales de los ingenios de caña de azúcar y las destilerías. Los datos reportados en este trabajo obtenidos experimentalmente por una extracción y fermentación simultánea de los azúcares confirman las anteriores suposiciones.

Son escasos todavía las pruebas de extracción del azúcar del sorgo dulce en instalaciones industriales, una referencia informa de una prueba piloto realizada en Australia (Webster et al. 2004) en donde la eficiencia de extracción del azúcar estuvo entre el 70 y el 80 %, cifras relativamente bajas al compararla con las logradas procesando caña en el mismo equipo, de 90 a 95 %, aunque se resaltaba que los ajustes en la maquinaria necesarios para incrementar la extracción a valores aceptables eran factibles. Woods (2001) también informó de dos pruebas a escala industrial en Zimbabwe empleando las variedades de sorgo dulce Keller y Cowley. La productividad final de etanol informada fue de 3,000 litros por hectárea, aunque no indicaron la eficiencia en la extracción del azúcar del tallo.

*Producción, composición química y evaluación nutricional del grano.* El orden de magnitud de los valores reportados para la producción del grano se encuentran dentro del intervalo informado por otros investigadores, por ejemplo, en China, 2.2 a 7.5 Mg por hectárea (Zhao et al. 2009; Wang and Liu, 2009; Zhang et al. 2010), en India, hasta 2.6 Mg/ha (Blümmel et al. 2009), en Indonesia, 2.4 Mg/ha (Tsuchihashi and Goto, 2004), y en Nigeria, 2.5-2.6 Mg/ha (Nasidi et al. 2010). Los valores del contenido de proteína y grasa para sorgo de grano se han documentado como 7 a 15 % y 1.5 a 6.0 % respectivamente (Dicko et al. 2006). Los valores de fibra cruda y cenizas han oscilado entre 3.2 a 5.1 % y 1.5 a 2.1 % respectivamente (Pérez-Carrillo and Serna-Saldívar, 2006). Los resultados acá informados para variedades de sorgo dulce (Cuadro 3) se encuentran en los rangos anteriores. Los valores PER encontrados en este trabajo están por arriba de aquellos reportados previamente para sorgo de grano, los cuales se encuentran entre 0.113 y 0.703 (Shayo et al, 2001). Los valores de polifenoles colocan a las variedades ensayadas de sorgo dulce como sorgos de tipo taninos (Anyango et al. 2011).

La relación lineal negativa entre el PER y el contenido de polifenoles (Gráfica 5) fue un resultado clave que permitió seleccionar a la variedad Top 76-6 como posiblemente la mejor variedad para cumplir con los dos objetivos de la investigación, una alta productividad de etanol de los azúcares del tallo y un

grano con la mejor característica nutricional. Sin embargo, es pertinente resaltar que aunque las variedades Sugar Drip y Umbrella mostraron también una alta productividad de etanol (Gráfica 4), la evaluación nutricional del grano fue decepcionante (Cuadro 4).

## Conclusiones

Los resultados experimentales presentados y la discusión de los mismos permiten concluir que la variedad de sorgo dulce Top 76-6 plantada en la zona del Pacífico de Guatemala podría ser considerada como un cultivo que podría asegurar una seguridad energética y alimenticia en una forma sostenible. La producción promedio del tallo fresco y del grano seco fue de 42.15 Mg/ha y 2.36 Mg/ha respectivamente. La productividad promedio de etanol fueron aproximadamente 220 g de etanol por kg de tallo seco, cifra equivalente a 2,465 litros de etanol por hectárea. El grano tuvo el menor contenido de polifenoles y una adecuada calidad de la proteína, mostrando un PER igual a 1.07 y un 83.2 % de digestibilidad.

## Agradecimiento

Los experimentos informados fueron parcialmente financiados por un contrato con el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA) quien por medio del programa Food for Progress 2010 (FFP10) financió la ejecución del presente estudio (Contrato OGS: FCC-520-2010/026-00).

## Bibliografía

- Albuquerque CJB, Tardin FDE, da Costa-Parrella RA, de Souza-Guimaraes A, Mendes de Oliveira R, de Jesus-Silva KM (2012) Sorgo sacarino em diferentes arranjos de plantas e localidades de Minas Gerais Rev Bras Milho Sorgo **11**: 79-95
- Amaducci S, Monti A, Venturi G (2004) Non-structural carbohydrates and fibre components in sweet and fibre sorghum as affected by low and normal input techniques Ind Crops Prod **20**: 111-118.
- Anyang JO, de Kock HL, Taylor JRN (2011) Evaluation of the functional quality of cowpea-fortified traditional African sorghum foods using instrumental and descriptive sensory analysis LWT-Fd Sci Technol **44**: 2126-2133
- AOAC (1984) Official Methods of Analysis 14 ed. Association of Official Analytical Chemists, Washington
- Berthels NJ, Cordero-Otero RR, Bauer FF, Thevelein JM, Pretorius IS (2004) Discrepancy in glucose and fructose utilisation during fermentation by *Saccharomyces cerevisiae* wine yeast strains FEMS Yeast Res **4**: 683-689
- Blümmel M, Rao SS, Palaniswami S, Shah L, Reddy BVS (2009) Evaluation of sweet sorghum used for bio-ethanol production in the context of optimizing whole plant utilization Anim Nutr Feed Technol **9**: 1-10
- Bruins ME, Sanders JPM (2012) Small-scale processing of biomass for biorefinery Biofuels Bioprod Bioref **6**: 135-145
- Chavan U, Patil JV, Shinde, MS (2009) An assessment of sweet sorghum cultivars for ethanol production Sugar Tech **11**: 319-323
- Chohnan S, Nakane M, Rahman MH, Nitta Y, Yoshiura T, Ohta H, Kurusu Y (2011) Fuel ethanol production from sweet sorghum using repeated-batch fermentation J Biosci Bioeng **111**: 433-436

- Cosentino SL, Mantineo M, Testa G (2012) Water and nitrogen balance of sweet sorghum (*Sorghum bicolor moench* (L.) cv. Keller under semi-arid conditions Ind Crops Prod **36**: 329-342
- Curt MD, Fernandez J, Martínez M (1995) Productivity and water use efficiency of sweet sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) cv. Keller in relation to water regime Biomass Bioenerg **8**: 401-409
- de Vries SC, van de Ven GWJ, van Ittersum MK, Giller KE (2010) Resource use efficiency and environmental performance of nine major biofuel crops, processed by first-generation conversion techniques Biomass Bioenerg **34**, 588-601
- Dicko MH, Gruppen H, Traoré AS, Voragen AGJ, van Berkel WJH (2006) Sorghum grain as human food in Africa: relevance of content of starch and amylase activities African J Biotechnol **5**: 384-395
- Dutra ED, Barbosa Neto AG, de Sousa RB, de Moraes MA, Tabosa JN, Simoes R, Menezes C (2013) Ethanol production from the stem juice of different sweet sorghum cultivars in the state of Pernambuco, Northeast of Brazil Sugar Tech. **15**: 316-321
- Erickson JE, Helsel ZR, Woodard KR, Vendramini JMB, Wang Y, Sollenberg LE, Gilbert RA (2011) Planting date affects biomass and brix of sweet sorghum grown for biofuels across Florida Agron. J. **103**: 1827-1833
- Erickson JE, Woodard KR, Sollenberger LE (2012) Optimizing sweet sorghum production for biofuel in the Southeastern USA through nitrogen fertilization and top removal Bioenerg Res **5**: 86-94
- Guigou M, Lareo C, Pérez LV, Lluberas ME, Vázquez D, Ferrari MD (2011) Bioethanol production from sweet sorghum: evaluation of post-harvest treatments on sugar extraction and fermentation Biomass Bioenerg **35**: 3058-3062
- linge SE, Tew TL, Rukavina H, Boykin DL (2102) Post harvest changes in sweet sorghum I: Brix and sugars Bioenerg Res **5**: 158-167
- Linton JA, Miller JC, Little, RD, Petrolia DR, Coble KH (2011) Economic feasibility of producing sweet sorghum as an ethanol feedstock in the southeastern United States Biomass Bioenerg **35**: 3050-3057
- Miller AN, Ottman MJ (2010) Irrigation frequency effects on growth and ethanol yield in sweet sorghum Agronom J **102**, 60-70
- Nasidi M, Akunna J, Deeni Y, Blackwood D, Walker G (2010) Bioethanol in Nigeria: comparative analysis of sugarcane and sweet sorghum as feedstock sources Energ Environ Sci **3**: 1447-1457
- Pellet P, Young VR (1980) Nutritional Evaluation of Protein Food, United Nations University, Tokyo
- Perez M, Luyten K, Michel R, Riou C, Blondin B (2005) Analysis of *Saccharomyces cerevisiae* hexose carrier expression during wine fermentation: both low- and high-affinity Hxt transporters are expressed FEMS Yeast Res **5**, 351-361
- Pérez-Carrillo E, Serna-Saldívar SO (2006) Cell wall degrading enzymes and proteases improve starch yields of sorghum and maize Starch/Stärke **58**: 338-344
- Prasad S, Singh A, Jain N, Joshi JC (2007) Ethanol production from sweet sorghum syrup for utilization as automotive fuel in India Energy Fuels **21**, 2415-2420
- Rajendran C, Ramamoorthy K, Backiyarani S (2000) Effect of deheading on juice quality characteristics and sugar yield of sweet sorghum J Agron Crop Sci **185**: 23-26
- Rao SS, Patil JV, Umakanth AV, Mishra JS, Ratnavathi CV, Shyam Prasad G, Dayakar Rao B (2013) Comparative performance of sweet sorghum hybrids and open pollinated varieties for millable stalk yield, biomass, sugar quality traits, grain yield and bioethanol production in tropical Indian condition Sugar Tech **15**: 250-257
- Ratnavathi CV, Suresh K, Kumar BSV, Pallavi M, Komala VV, Seetharama N (2010) Study on genotypic variation for ethanol production from sweet sorghum juice Biomass Bioenerg **34**: 947-952
- Rolz C, de León R (2010) Converting developing and mature sugarcane carbohydrates into ethanol Eng Life Sci **10**: 439-445



- Rolz C, de León R (2011) *Ethanol fermentation from sugarcane at different maturities* Ind Crop Prod **33**: 333-337
- Rooney WL, Blumenthal J, Bean B, Mullet JE (2007) *Designing sorghum as a dedicated bioenergy feedstock* Biofuels Bioprod Bioref **1**: 147-157
- Russo VM, Fish WW (2012) *Biomass, extracted liquid yields, sugar content or seed yields of biofuel feedstocks as affected by fertilizer* Ind Crops Prod **36**: 555-559
- Shayo NB, Laswai HS, Tiisekwa BPM, Nnko SAM, Gidamis AB, Njoki P (2001) *Evaluation of nutritive value and functional qualities of sorghum subjected to different traditional processing methods* Int J Fd Sci Nutr **52**: 117-126
- Sipos B, Réczey J, Somorai Z, Kádár Z, Dienes D, Reczey K (2009) *Sweet sorghum as feedstock for ethanol production: enzymatic hydrolysis of steam-pretreated bagasse* Appl Biochem Biotechnol **153**: 151-162
- Tamang PL, Bronson KF, Malapati A, Schwartz R, Johnson J, Moore-Kucera J (2011) *Nitrogen requirements for ethanol production from sweet and photoperiod sensitive sorghums in the Southern High Plains* Agronom J **103**: 431-440
- Teetor VH, Duclos DV, Wittenberg ET, Young KM, Chawhuaymark J, Riley MR, Ray DT (2011) *Effects of planting date on sugar and ethanol yield of sweet sorghum grown in Arizona* Ind Crops Prod **34**: 1293-1300
- Tew TL, Cobill RM, Richard EP (2008) *Evaluation of sweet sorghum and sorghumxSudangrass hybrids as feedstocks for ethanol production*. Bioenerg Res **1**: 147-152
- Tsuchihashi N, Goto Y (2004) *Cultivation of sweet sorghum and determination of its harvest time to make us as the raw material for fermentation, practice during rainy season of dry land of Indonesia* Plant Prod Sci **7**: 442-448
- Vasilakoglou I, Dhima K, Karagiannidis N, Gatsis T (2011) *Sweet sorghum productivity for biofuels under increased soil salinity and reduced irrigation* Field Crops Res **120**: 38-46
- Webster AJ, Hoare CP, Sutherland RF, Keating BA (2004) *Observations of the harvesting, transporting and trial crushing of sweet sorghum in a sugar mill* Proc Aust Soc Sugar Cane Technol **26**: 2004
- Wang F, Liu C-Z (2009) *Development of an economic refining strategy of sweet sorghum in the Inner Mongolia region of China* Energ Fuels **23**: 4137-4142
- Woods J (2001) *The potential for energy production using sweet sorghum in southern Africa* Energ Sustain Dev **5**: 31-38
- Yu J, Zhang T, Zhong J, Zhang X, Tan T (2012) *Biorefinery of sweet sorghum stem* Biotechnol Adv **30**: 811-816
- Zhang C, Xie G, Li S, Ge L, He T (2010) *The productive potentials of sweet sorghum ethanol in China* Appl Energ **87**: 2360-2368
- Zhao YL, Dolat A, Steinberger Y, Wang X, Osman A, Xie GH (2009) *Biomass yield and changes in chemical composition of sweet sorghum cultivars grown for biofuel* Field Crops Res **111**: 55-64