

Aptitud bioenergética de sorgo: Explorando la mejor combinación de tipo de híbrido y momento de madurez

Torrecillas, M.¹, Borlandelli, M.S¹., Campos F.²

¹Facultad de Ciencias Agrarias, UNLZ.

²Becario CIN, UNLZ

Introducción

El uso de fuentes de energía renovable está creciendo a nivel mundial y la búsqueda de biomasa alternativa para la producción de combustibles, tales como el etanol, se ha intensificado.

El sorgo dulce como cultivo tropical tiene la capacidad de almacenar azúcares fermentables en el tallo y además como residuo sólido (bagazo) puede ser utilizado para la producción de energía eléctrica, biocombustible (etanol de segunda generación), alimento animal o fertilizante orgánico (Monti and Venturi, 2009; Ratnavathi *et al.*, 2010).

El sorgo dulce es un cultivo con alto potencial bioenergético y altamente competitivo con el maíz debido a su rendimiento teórico de etanol, pero con menor energía invertida (Smith and Buxton, 1993; Hunter and Anderson, 1997). Además, el sorgo presenta alta productividad bajo condiciones desfavorables, como tolerancia a estrés hídrico, suelos salinos, suelos pobremente estructurados, etc. (Sanderson *et al.*, 1992), y aún en esos ambientes tiene capacidad de producir lignocelulosa, azúcar y almidón (Rooney *et al.*, 2007).

Existen dos tipos de sorgo que tienen alto potencial para la producción de bioenergía, sorgo dulce (Híbridos sileros) y fotosensitivos. En los primeros, la producción de etanol puede ser a partir del jugo azucarado acumulado en los tallos y del residuo celulósico de los tallos luego de la extracción de azúcar. Los híbridos forrajeros fotosensitivos están caracterizados por su gran altura de planta y elevados rendimientos de materia verde. Debido a que requieren de una duración del día de 12 h para florecer, permanecen en estado vegetativo durante un período prolongado de tiempo. Debido a que algunos híbridos tienen médula seca pueden ser utilizados para la conversión a etanol celulósico, a partir de valores adecuados de hemicelulosa y celulosa, aunque otros también tienen la capacidad de acumular jugo azucarado y en estados avanzados de madurez registrar altos valores de Brix.

Existen dos parámetros importantes que contribuyen a la potencialidad de la biomasa azucarada de un sorgo como fuente productora de bioetanol: su rendimiento en términos de volumen de jugo azucarado producido por hectárea, y la concentración y calidad de azúcares solubles de dicho jugo.

El contenido real de azúcar presente en el jugo de la caña de sorgo incluye a la sacarosa y azúcares reductores (fructosa y glucosa). Un menor nivel de azúcares reductores indica que la mayoría de ellos han sido convertidos en sacarosa. Las proporciones de sacarosa, glucosa y fructosa dependen de la variedad, momento de corte, etapa de madurez, entre otros factores (Silva *et al.*, 2016).

Con respecto al momento de madurez, tiene una influencia pronunciada sobre la producción de biomasa y el contenido de carbohidratos en sorgo dulce. Por lo tanto la dinámica en la composición del cultivo permite, según el manejo, la selección de destinos productivos, ya que en estados tardíos de madurez es posible la opción de etanol celulósico (Zhao *et al.*, 2009)

El objetivo del presente experimento fue comparar cuatro híbridos de sorgo con diferente morfología, a través de la evaluación de atributos relacionados a la aptitud bioenergética, en cuatro momentos de maduración.

Materiales y Métodos

El experimento se llevó a cabo en el Est. Santa Rosa de los Cerrillos (Pdo. de Monte) (35°40'53.88"S, 58°42'18.08"O), durante la campaña 2015/16.

El tipo de suelo correspondió a un Argiudol típico, cuyo muestreo del perfil superficial de 0-20 cm tuvo las siguientes características: pH 5,73; Mat. Org. 2,67%; N org. 0,17% y P extractable 8,1 ppm.

El diseño experimental fue de bloques completos aleatorizados, en un arreglo de parcelas divididas con tres repeticiones. La parcela principal fue híbridos y la subparcela momento de maduración. La parcela experimental consistió de 6 surcos de 5,2 m, separados a 0,5 m, utilizándose los cuatro surcos centrales para los muestreos. Se evaluaron cuatro tipos de híbridos (Hib) de sorgo de morfología contrastante: Forrajero fotosensitivo convencional (Fot-c), Forrajero fotosensitivo BMR (Fot-bmr), Silero1 (con baja proporción de panoja) (Sil1) y Silero2 (con alta proporción de panoja) (Sil2).

El stand de plantas a cosecha aproximada fue de 6-8pl/m lineal en todos los híbridos. Se aplicó 130 kg ha⁻¹ de un fertilizante compuesto (21-17-3 + 1%MgO + 4% S) y el control de malezas se efectuó mediante la aplicación de 3,5 l ha⁻¹ de atrazina (50%) + 1,3 l ha⁻¹ de metolacoloro.

Se estudiaron cuatro momentos de madurez (MM), comprendidos entre E_{7.2} (estado de grano lechoso avanzado) y 15 días posteriores a E₉ (madurez fisiológica), en aquellos biotipos que presentaron grano. En los biotipos fotosensitivos (sin grano como indicador de madurez), se consideró en forma visual el grado de senectud de la sección basal de la planta (10, 20, 30 y 50% de amarillamiento).

La metodología de cosecha, para cada momento de corte, consistió en cortar un metro lineal (1m) y previa separación y descarte de la fracción panoja en aquellos híbridos que la tuvieran, se registró su peso. Dicho peso constituyó el rendimiento de materia verde de la fracción vegetativa por parcela. Se tomaron muestras de dicha fracción de cada parcela, se colocaron a estufa de ventilación forzada con una temperatura de 60°C hasta alcanzar peso constante. De acuerdo con el porcentaje de materia seca obtenido (MS) se calculó el rendimiento de materia seca por unidad de superficie (RMS).

Previo a cada cosecha se realizó la medición de sólidos solubles totales (SST) en el jugo en dos plantas representativas y en la sección central del tallo, utilizando un refractómetro portátil digital (ATAGO PAL-1, Atago USA). La variable SST se expresó en °Brix.

Se calculó el rendimiento estimado de azúcar (RA) en base a las expresiones de Wortmann *et al.*, 2010 y el rendimiento teórico de etanol (RE) a través de BessModel 20083.1 (Liska *et al.*, 2009).

Sobre las muestras obtenidas de tallo+hojas se realizaron las siguientes determinaciones de calidad:

Contenido de Hemicelulosa (%) (Cel).

- Contenido de Celulosa (%) (Hcel).

Calculados en base a las expresiones:

Hcel = FDN-FDA

Cel = FDA-LDA

Las determinaciones de Contenido de Fibra Detergente Neutro (FDN), Fibra Detergente Ácido (FDA) y Lignina Detergente Ácido (LDA) se efectuaron mediante la técnica de bolsitas filtrables (ANKOM) en incubador.

Los datos generados fueron sometidos a un análisis de varianza, mediante la utilización del programa estadístico INFOSTAT (Di Rienzo *et al.*, 2013). Las comparaciones entre medias se realizaron por medio de un test de Diferencias Mínimas Significativas (DMS) con un nivel de significancia de $p < 0,05$.

Resultados y Discusión

Los registros térmicos de la campaña fueron normales de acuerdo a valores históricos de la zona y el nivel de precipitaciones no determinó períodos de déficit, puesto que tanto magnitud y distribución fueron adecuadas y por encima de datos históricos. Durante el lapso de tiempo que incluyó al período crítico del cultivo (Nov-Feb) se registraron 508,5 mm, lo cual determinó un escenario ambiental de alto potencial productivo (Figura 1).

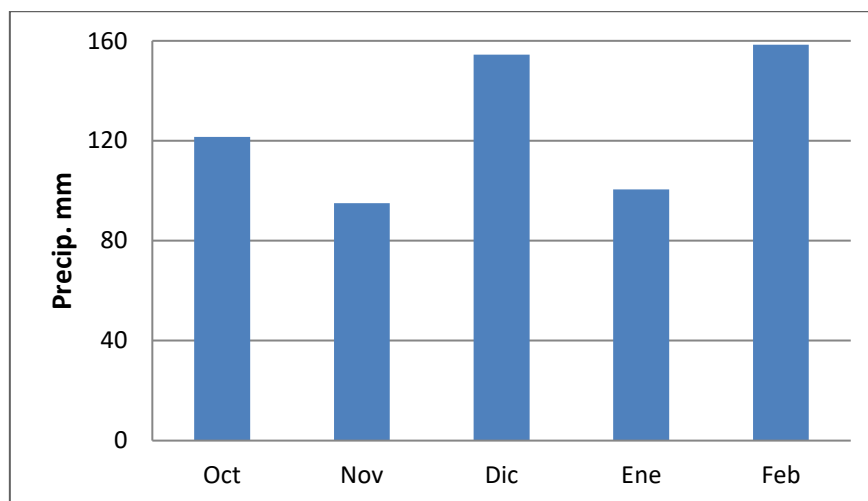


Figura 1. Registros pluviométricos de la campaña 2015/16. Ea. Santa Rosa de los Cerrillos (Pdo. de San Miguel del Monte)

Se registró significancia en la interacción Híbrido x Momento de madurez en todas las variables estudiadas, excepto MS y Hcel. En dichas variables se observó efectos significativos de Hib y MM.

INVESTIGACIÓN

Torrecillas *et al.*

Aptitud bioenergética de sorgo [...]

Considerando RA, cuando se realizó la apertura de la interacción se observó que el híbrido Fot-c en el MM2 superó significativamente al resto (9,47 t ha⁻¹) (Tabla 1). El Hib Sil1 estuvo bien posicionado en todos los momentos de madurez, intercalando su performance con Fot-c, donde los elevados valores de éste último se vieron traccionados por buen comportamiento para RMS.

Asimismo, analizando rendimiento teórico de etanol (RE) se observó un patrón similar de los valores de RA, donde Fot-bmr obtuvo valores de 35 a 52% inferiores que Fot-c (6299 l ha⁻¹). Al igual que lo reportado por Tamang *et al.* (2011) el híbrido fotosensitivo convencional tuvo el mejor comportamiento para aquella variable.

Sólo en los híbridos fotosensitivos se detectó un patrón definido en el ordenamiento de los MM para SST, puesto que en ambos casos dicha variable aumenta con el avance de la madurez. De todas maneras, Sil1 se posicionó al tope del ranking en todos los MM, con valores oscilando entre 20,1 y 15,2°Brix.

Tabla 1. Influencia de cuatro momentos de madurez sobre variables de interés bioenergético, en sorgos de diferente morfología.

Tipo de Hib	MM	RA(t ha ⁻¹)	RE(l ha ⁻¹)	SST(°Brix)	Cel(%)	RMS(t ha ⁻¹)
	MM1	6,48de	4307,56 de	9,3 c	31,26 e	27,16
Fot-c	MM2	9,47 g	6298,58 g	11,3 de	30,57 de	39,17 i
	MM3	8,25 fg	5485 fg	12,1 e	29,88 cde	30,11 gh
	MM4	8,17 fg	5430,11 fg	13,9 fg	37,06 g	29,43 fgh
	MM1	3,69 a	2455,78 a	6,15 a	30,9 e	23,82 bcd
Fot-bmr	MM2	3,89 ab	2586,44 ab	7,8 b	30,68 de	20,42 abc
	MM3	3,38 a	2247,79 a	8,45 bc	29,67 cde	18,05 a
	MM4	5,09 bc	3382,25 bc	10,9 d	35,79 fg	23,22 bcd
	MM1	7,49 ef	4980,95 ef	15,2 h	27,18 ab	25,14 cdef
Sil1	MM2	8,58 fg	5705,16 fg	14,8 gh	26,94 a	31,03 h
	MM3	7,92 f	5264,09 f	20,0 j	29,08	19,23 ab
	MM4	8,53 fg	5669,49 fg	17,6 i	28,38 abcd	24,28 cde
	MM1	8,34 fg	5747,23 fg	15,0 h	29,54 bcde	28,97 efgh
Sil2	MM2	5,34 cd	3551,32 cd	11,2 de	28,08 abc	25,33 cdefg
	MM3	2,82 a	1872,87 a	7,95 b	34,28 f	21,13 abc
	MM4	5,69 cd	3782,08 cd	13,7 f	29,79 cde	24,25 cde

Letras distintas en la misma columna y dentro de cada híbrido, indican diferencias significativas (p<0,05) entre momentos de madurez.

Promediando entre MM y considerando MS, los híbridos Sil1 y Sil2 superaron significativamente al resto, confirmando el hecho que los híbridos fotosensitivos tienen cierta limitación para alcanzar valores adecuados en dicho atributo. Cuando se promedió entre híbridos, los MM se escalonaron en orden ascendente desde MM1 (23%) hasta MM4 (26%) (Tabla 2).

Tabla 2. Contenido de Materia seca (MS).

Tipo de Hib ¹	MS(%)
Sil2	27,10 b
Sil1	26,12b
Fot-c	23,24a
Fot-bmr	22,0a
MM²	
MM4	26,21 b
MM3	24,10 ab
MM2	24,35 a
MM1	23,0 a

¹Valores promediados entre MM y ² valores promediados entre tipo de híbrido.

Para la variable Hcel se encontró un ordenamiento inverso de los momentos de maduración en comparación con el observado para MS, logrando valores significativamente superiores en MM1 (30,53%), MM2 (29,84%) y MM3 (29,64%) con respecto a MM4 (21,43%). En dicha variable y promediando entre MM, Fot-bmr tuvo un comportamiento significativamente superior frente a los híbridos restantes (Tabla 3). Ello estaría ligado a que los menores valores de lignina del Fot-bmr determinan magnitudes inferiores sobre FDA. Es de destacar que cuando el objetivo fuera la obtención de etanol de segunda generación, el menor contenido de lignina en la MS determinará menor demanda de energía para el proceso de hidrólisis del residuo lignocelulósico.

Tabla 3. Contenido de Hemicelulosa (Hcel).

Tipo de Hib ¹	Hcel(%)
Fot-bmr	30,72c
Fot-c	27,37b
Sil2	27,10ab
Sil1	26,26a
MM²	
MM1	30,53b
MM2	29,84b
MM3	29,64b
MM4	21,43a

¹Valores promediados entre MM y ² valores promediados entre tipo de híbrido.

Si bien tanto Fot-c como Fot-bmr se destacaron con mayores valores de Cel en todos los MM, se observó una situación particular con una alta performance de Sil2 en MM3 (34,28%), que posiblemente contribuyó en gran magnitud a la interacción HibxMM.

Por otro lado, en aquellos casos de híbridos que conjuguen buen comportamiento para Cel y RMS, como los Fot-c, los posiciona como aptos para la generación de energía a partir de su biomasa. En este sentido, la presencia del rasgo BMR determina un comportamiento inferior para RMS del Fot-bmr, ya que la merma de un 40-50% de lignina implicó en el presente experimento, una declinación del rendimiento del orden de 34% con respecto al Fot-c.

Si bien el factor composicional de la materia seca tuvo relevancia en la determinación de los valores finales de rendimiento teórico de etanol, en el híbrido fotosensitivo convencional la performance lograda pudo ser atribuida mayormente al elevado volumen de biomasa obtenido. Dichos resultados coinciden con los alcanzados por Borden (2011), quien evaluó comparativamente híbridos fotosensitivos, sileros y graníferos.

No se observó una tendencia clara en el ordenamiento de los momentos de madurez para RMS.

Considerando las variables claves para la obtención de etanol celulósico (Hcel y Cel), los momentos de madurez apropiados no son coincidentes para ambas variables.

Tanto Sil1 como Sil2 tuvieron adecuados valores para la predicción de rendimiento de etanol a partir del jugo azucarado, debido a su comportamiento más balanceado en las variables RMS y SST.

Bibliografía

Borden, D.R. (2011). Effect of harvest dates on biomass accumulation and composition in bioenergy sorghum. M.S. thesis. Texas A&M University, Texas, USA.

Di Rienzo, J.A., Casanoves, F., Balzarini, M.G., González, L., Tablada, M., Robledo, C.W. (2013). InfoStat versión 2013. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba. Argentina.

Hunter, E.L., Anderson, I.C. (1997). Sweet sorghum. *Hortic. Rev.* 21, 73-104.

Liska, A.J., Yang, H.S., Bremer, V.R., Klopfenstein, T.J., Walters, D.T., Erickson, G.E., Cassman, K.G. (2009). Improvements in life cycle energy efficiency and greenhouse gas emissions of corn-ethanol. *J. Ind. Ecol.* 13, 58-74.

Monti, A., Venturi, G. (2009). Comparison of the energy performance of fibre sorghum, sweet sorghum and wheat monocultures in northern Italy. *Europ. J. Agron.* 19, 35-43.

Ratnavathi, C.V., Suresh, K., Vijay Kumar, B.S., Pallavi, M., Komala, V.V., Seetharama, N. (2010). Study on genotypic variation for ethanol production from sweet sorghum juice. *Biomass Bioenergy.* 34, 947-952.

Rooney, W.L., Blumenthal, J., Bean, B., Mullet, J.E. (2007). Designing sorghum as a dedicated bioenergy feedstock. *Biofuels Bioprod. Bioref.* 1, 147-157.

Sanderson, M.A., Jones, R.M., Ward, J., Wolfe, R. (1992). Silage sorghum performance trial at Stephenville. Forage Research in Texas. Rep. PR-5018. 1992. Texas Agric. Exp. Stn., Stephenville.

INVESTIGACIÓN

Torrecillas *et al.*

Aptitud bioenergética de sorgo [...]

Silva, F.A., Ferreira, O.E., Costa Gravatim, H.G., Montijo, N.A., Mutton, M.A., Mutton, M.J. (2016). Technological quality of sweet sorghum processed without panicles for ethanol production. *Aust. J. Crop Sci.* 10, 1578-1582.

Smith, G.A., Buxton, D.R. (1993). Temperate zone sweet sorghum ethanol production potential. *Bioresour. Technol.* 43, 71-75.

Tamang, P.L., Bronson, K.F., 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. *Agron J.* 103, 431-440.

Wortmann, C.S., Liska, A.J., Ferguson, R.B., Lyon, D.J., Klein, R.N., Dweikat, I. (2010). Dryland performance of sweet sorghum and grain crops for biofuel in Nebraska. *Agron J.* 102, 319-326.

Zhao, Y.L., Dolat, A., Steinberger, Y., Wang, X., Osman, A., Xie, G.H. (2009). Biomass yield and changes in chemical composition of sweet sorghum cultivars grown for fuel. *Field Crops Res.* 111, 55-64.