

EL SORGO AZUCARADO COMO MATERIA PRIMA PARA LA PRODUCCION DE ALCOHOL CARBURANTE: LA EXPERIENCIA DE INIA LA ESTANZUELA



Ing. Agr. Alberto Fassio ¹
 Ing. Agr. Federico D'Ottone ²
 Téc. en lech. Marcelo J. Rodríguez ¹
 Ing. Agr. (MSc) Sergio Ceretta ¹
 Q.F. PhD Daniel Vázquez ³
 Carlos Rabaza ¹
 Glenda Vergara ¹

¹ Programa Nacional de Cultivos de Secano

² Asesor privado

³ Laboratorio Calidad industrial de Cultivos

En Uruguay la principal fuente de energía es el petróleo. Hasta este momento no existen yacimientos de hidrocarburos en explotación, por lo que para la producción de combustibles el país depende de la importación de petróleo. Por esta razón, desde principios del siglo XX se están buscando fuentes alternativas de energía, una de ellas son los agrocombustibles o biocombustibles.

A nivel mundial, el principal agrocombustible es el etanol o alcohol etílico, seguido del biodiesel, combustible derivado de aceites o grasas naturales.

El primero se obtiene por un proceso de fermentación, donde los azúcares simples son metabolizados por microorganismos y transformados en alcohol.

Cuantitativamente, las principales materias primas para la producción de etanol provienen de dos grandes clases de cultivos, los amiláceos y los sacarígenos. Mientras que los primeros, denominados cultivos cerealeros depositan azúcares en forma de almidón (polisacáridos) en los granos, los segundos, acumulan en solución acuosa sacarosa y otros azúcares simples en el jugo de los tallos. Los principales cultivos sacarígenos para la producción de biocombustibles son la caña de azúcar (*Saccharum officinarum* Linn.) y el sorgo azucarado (*Sorghum bicolor* Linn.).

Los primeros ensayos en el país se iniciaron en la década de 1940, y desde entonces no se ha demostrado ninguna limitación excluyente para el cultivo. En el período 2005-2010, INIA ha venido trabajando en el cultivo de sorgo con el fin de determinar los principales aspectos de manejo y características con el objetivo de maximizar la producción de alcohol por hectárea. En los primeros años este trabajo fue llevado adelante con el apoyo de ALUR.

CARACTERÍSTICAS DEL SORGO AZUCARADO

El sorgo azucarado y el sorgo granífero pertenecen a una misma especie pero el primero acumula mayor cantidad de azúcares en el tallo.

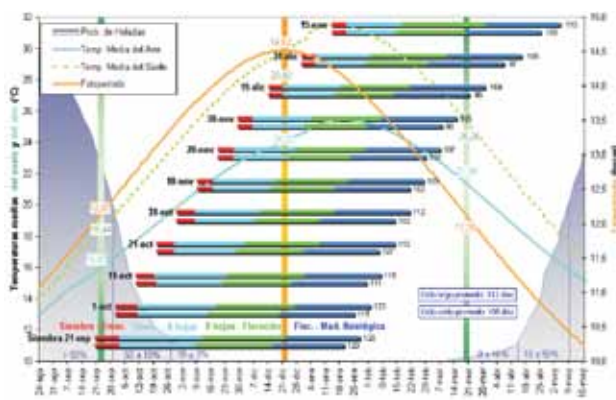


Figura 1 - Climatología y fenología del sorgo para distintas épocas de siembra en el norte del país.

Otras diferencias de carácter fisiológico son una mayor acumulación de biomasa en el tipo azucarado y una mayor eficiencia en la utilización de agua y nitrógeno. En la región se comporta como un cultivo anual de manejo similar al sorgo granífero, a diferencia de la caña de azúcar que es un cultivo plurianual cuya implantación requiere de tallos “semilla”. Sin embargo el sorgo azucarado en otros ambientes es una especie perianual (3 o más años), con capacidad de sobrevivir luego de un primer ciclo reproductivo por efecto del rebrote. Al tratarse de una especie subtropical no evolucionó para sobrevivir en condiciones frías, por tanto el cultivo está muy condicionado a los eventos de frío extremo del invierno.

En el Uruguay debido a la ocurrencia de heladas no recomendamos a priori, el manejo del sorgo azucarado como perianual, sumado a las implicancias que conlleva dejar improductivo el campo durante el invierno y buena parte de la primavera por la expectativa no segura de un buen rebrote. El sorgo azucarado es una planta de fotosíntesis tipo C4, lo que le permite usar con más eficiencia las condiciones de alta radiación y requiere alta temperatura (cerca a los 30°C) para un óptimo crecimiento.

ASPECTOS CLAVES PARA LA OBTENCIÓN DE BUENOS RENDIMIENTOS

Calidad de semilla

Se debe verificar el poder germinativo del lote de semilla a utilizar, el que debe cumplir como mínimo la reglamentación actual (75% de germinación), además de un buen vigor de semilla y tratamiento con insecticida de ser necesario. Lo anterior es clave para sembrar en fechas tempranas, sin afectar la implantación del cultivo.

Elección del cultivar

La utilización de cultivares ya evaluados como sorgos de tipo azucarado, permite asegurar la obtención de jugos con altos contenidos de azúcar.

En estas categorías los cultivares seleccionados en el sureste de los Estados Unidos y sus derivados, se han destacado como los de mayor potencial y estabilidad (Ej.: M 81E, Topper 76-6, etc.).

Fecha de siembra y ciclo

Los resultados de los ensayos de fecha de siembra realizados entre 2005 y 2010, en INIA La Estanzuela, indican que con las siembras realizadas en el período octubre-noviembre se logran los mejores resultados (alto rendimiento de biomasa y etanol). Con ellas se evitan los mayores riesgos de heladas y las temperaturas son lo suficientemente altas para permitir el desarrollo inicial de las plantas. También se logra hacer coincidir el período pre-floración (de 8 hojas a floración) con el momento de máxima radiación solar (solsticio de verano) y el momento de floración con la ocurrencia de temperaturas máximas.

Con la información recabada en esos ensayos, fue posible producir un modelo de predicción fenológica para el sorgo azucarado, que se encuentra disponible en el sitio web: <http://www.inia.org.uy/online/site/79837211.php>. Utilizando dicho modelo, se generó la información fenológica correspondiente a sorgos de ciclo corto (barra inferior) y ciclo largo (barra superior), para 11 fechas de siembra, localizadas en el norte y sur del país (Figuras 1 y 2, respectivamente).

En ellos se puede observar el comportamiento fenológico del cultivo para las distintas fechas de siembra y relacionarlo con las probabilidades de heladas (tempranas y tardías), las temperaturas medias (del aire y del suelo) y el fotoperíodo. Esta información permite estimar en función del ciclo del cultivar seleccionado y la zona geográfica (norte o sur del Río Negro), la fecha de siembra que permita una mejor expresión del potencial de rendimiento del cultivo.

La combinación temperatura-largo del día (fotoperíodo) determina la duración del ciclo fenológico. En la medida

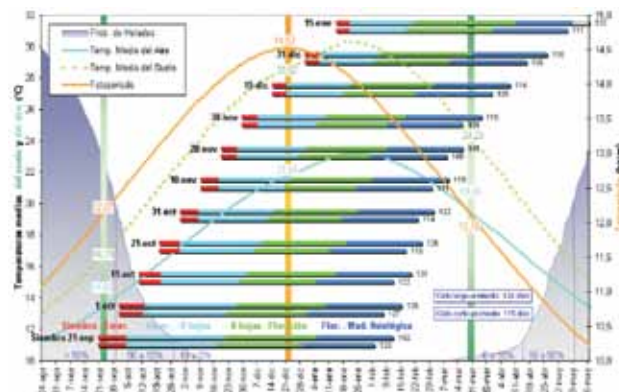


Figura 2 - Climatología y fenología del sorgo para distintas épocas de siembra en el sur del país.

en que se atrasa la fecha de siembra, el ciclo del sorgo se va acortando, hasta mediados-fines de diciembre, fecha en que comienza a alargarse, siembras posteriores a esa fecha limitan la producción de etanol.

Las fechas de siembra más adecuadas se ubican en los meses de octubre y noviembre, tanto para la región norte como para el sur. Las diferencias de ciclo (en días) entre un sorgo de ciclo corto y uno de ciclo largo no justifican una siembra temprana de ciclos cortos para adelantar las cosechas, ya que éstos rinden menos que los largos.

Población y distribución

En la zafra 2005-2006 se realizó en INIA La Estanzuela, con fecha de siembra 10/11/2005, un ensayo irrigado con 2 cultivares: Topper 76-6 y M 81 E. El ensayo se realiza con dos grupos de distribución de plantas, un grupo de poblaciones equidistantes (distribución cuadrada) y otro grupo de poblaciones con distancia fija entre hileras 0,70 m (distribución rectangular). En ambos grupos las distribuciones de plantas se ajustaron a tres poblaciones: 60000, 95000 y 130000 plantas por hectárea. Dicho ensayo mostró diferencias significativas para distribución y cultivares (Cuadro 1).

Los resultados indican que la distribución cuadrada es la más adecuada independientemente de la población y el cultivar. Esto es esperable si no hay limitación de radiación lumínica y agua durante las etapas claves del cultivo, ya que la distribución cuadrada maximiza la efi-

ciencia del uso del espacio, favoreciendo mayor intercepción de la luz por parte de las plantas.

A campo es posible lograr una distribución cuadrada, pero a los efectos de la cosecha se puede variar esta distribución en función de la maquinaria disponible. No debería descartarse la adaptación de las cosechadoras a las condiciones ideales de siembra o tender a ella.

La población de plantas no tuvo efecto significativo para rendimiento de materia verde, posiblemente debido a la compensación en el número de tallos por macollamiento. Cada cultivar en las diferentes distribuciones y poblaciones llega a niveles muy similares de número de tallos, se puede observar también que el diámetro de los tallos en los diferentes tratamientos es similar.

En condiciones productivas promedio se recomienda una población de aproximadamente 120000 plantas/ha. Con esta población de plantas, los cultivos no tienen los riesgos de aquellos con exceso de población y a su vez permite al cultivo aprovechar la ocurrencia de buenas condiciones de crecimiento mediante el potencial de macollamiento.

El cultivar M 81 E presentó mejores rendimientos que Topper 76-6, debido en parte a su mayor largo de ciclo y mayor altura de plantas. Fue el que tuvo mayor respuesta a la distribución cuadrada, siendo ésta la que presentó el rendimiento máximo: 156000 kg/ha de materia verde. No obstante, también presentó mayor vuelco que el Topper 76-6 en todas las condiciones.

Cuadro 1 - Resultados del ensayo de distribución y densidad 2005-2006.

DIST.	CULTIVAR Y DISTANCIA	POBLACIÓN (pl/ha)	ALTURA DE PLANTA (m)	MACOLLAGE (%)	VUELCO (0-4)	DIÁMETRO TALLO (cm)	REND. M. V. (Kg/ha)	Nº TALLOS/HA
RECTANGULAR	M 81 (0.24 0.70)	60000	3.1	358	3.8	1.7	111438	215000
	M 81 (0.15 0.70)	95000	3.0	236	3.8	1.6	99202	224103
	M 81 (0.11 0.70)	130000	3.0	156	2.7	1.9	87630	202222
	TOP (0.24 0.70)	60000	2.6	483	1.3	1.8	110375	290000
	TOP (0.15 0.70)	95000	2.8	313	1.2	1.5	90250	297179
	TOP (0.11 0.70)	130000	2.6	241	1.2	1.5	86245	312963
	PROMEDIOS		2.9	298	2.3	1.7	97523	256911
CUADRADA	M 81 (0.40)	60000	3.1	459	3.2	1.8	150222	275556
	M 81 (0.30)	95000	3.2	300	4.0	1.8	152528	285000
	M 81 (0.28)	130000	2.8	238	3.0	1.6	156000	309524
	TOP (0.40)	60000	2.8	548	2.8	1.7	136111	328889
	TOP (0.32)	95000	2.8	333	1.5	1.8	119806	316667
	TOP (0.28)	130000	2.8	257	1.3	1.7	144238	334286
	PROMEDIOS		2.8	380	1.9	1.7	133385	326614

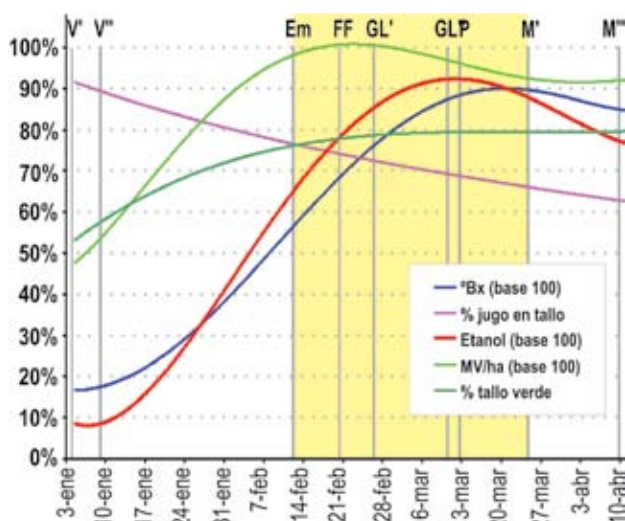


Figura 3 - Evolución de 5 variables (°Bx, % de jugo en tallo, rendimiento de etanol y materia verde por ha. en base 100 el máximo observado y % de tallo verde) a medida que avanza el ciclo del cultivo (basadas en ensayos 2005-2010).

Como corolario, los mejores rendimientos se obtienen en distribución cuadrada mientras que el macollamiento funciona como mecanismo regulador de la población de tallos en función de las condiciones del ambiente.

Evolución del contenido de °Bx, % jugo, materia verde, % de tallo verde y etanol obtenido.

A medida que el cultivo se va desarrollando y las plantas alcanzan su máxima área foliar, momento en que la capacidad fotosintética llega a los niveles máximos, se produce un significativo incremento en el contenido de azúcares, estos eventos se dan en los estadios de embuche-floración (Figura 3).

OBJETIVOS PRODUCTIVOS PARA OBTENCIÓN DE BUENOS RENDIMIENTOS EN ETANOL

El principal objetivo es la obtención de la máxima cantidad de etanol/ha dentro de un balance económicamente positivo, para ello hay que priorizar la obtención de azúcares lo cual derivará de una relación óptima entre la cantidad de jugo obtenida y su concentración de azúcares (°Bx).

La cantidad de etanol producida en base a tallos de sorgo azucarado está dada por la siguiente fórmula:

$$\text{ETANOL (l/ha)} = (\text{MV kg/ha}) \times (\%T/100) \times (\%J/100) \times (\text{°Bx}/100) \times (\text{REA}) \times (1/\text{DAE}) \times \text{FE}$$

Donde MV = materia verde total; %T = (kg tallo verde/kg MV)*100; %J = (kg jugo/kg tallo verde)*100; °Bx = concentración de azúcar en el jugo; REA = Relación en peso de etanol/azúcar; DAE = densidad del alcohol etílico y FE = factor de eficiencia de todo el proceso.

De acuerdo a la información obtenida, los cultivares de tipo “azucarado” de buen comportamiento en la región mantienen, para distintas épocas de siembras y manejos, algunas proporciones que podemos asumir como constantes.

El jugo del tallo es extraído a nivel industrial por efecto de la presión del o de los trapiches sobre los tallos. Cada trapiche sea industrial o experimental posee características propias que determinan variaciones en la capacidad de extracción. Es por ello que proponemos experimentalmente, para que los datos sean comparables, el método de secado en estufa para determinar el % de jugo contenido en los tallos. El mismo es estimado en base a la humedad evaporada al punto que deseamos, punto dado por un valor de extracción de referencia (ej. Laboratorio de Cala de ALUR).

El porcentaje de tallos con respecto al total de materia verde para cosechas desde floración a madurez y post-madurez, varía aproximadamente de un 70% a 80%, contrariamente a lo que ocurre con el porcentaje de jugo contenido en los tallos que varía aproximadamente de 80% a 70% en el mismo período y sentido cronológico (Figura 3). En promedio, podemos asumir un 75% tanto para % de tallos en la materia verde total como para % de jugo en los tallos.

Al no disponer de información de la eficiencia industrial en la relación peso etanol/azúcar, le adjudicamos un valor de 0,50 basado en resultados experimentales obtenidos por C. Lareo (comunicación personal).

La eficiencia global del proceso (FE) es variable, y dependerá de factores locales y particulares de cada emprendimiento. Consideramos que un valor de 0.85, contempla las pérdidas de cosecha (despanojamiento), transporte e industrialización.



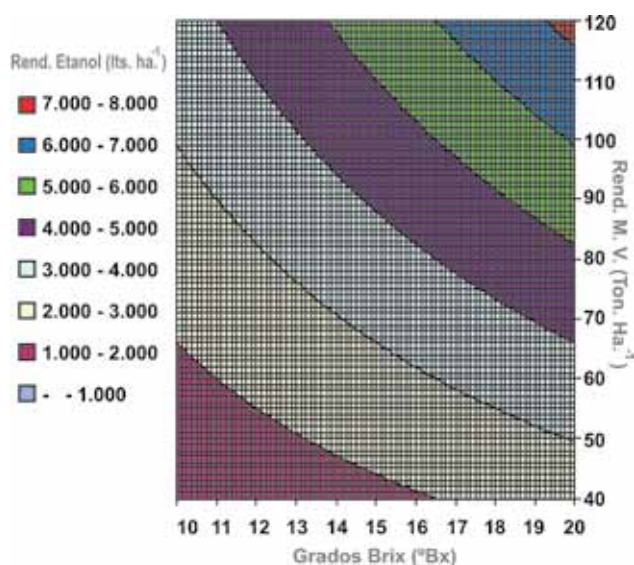


Figura 4 - Rendimientos de etanol para diferentes valores de materia verde por ha y °Bx.

En resumen, para las condiciones de Uruguay podemos utilizar los siguientes valores:

%T = 75% %J = 75% REA = 0,50 DAE = 0,789 kg/l
FE = 0,85

Restarían dos variables a analizar: Materia Verde por hectárea y °Bx del jugo obtenido.

Se puede afirmar que poco más de la mitad de la biomasa verde de un cultivo de sorgo azucarado es jugo, por tanto a mayor biomasa más jugo.

Los rendimientos para la región, en condiciones de secano y siembras de octubre-noviembre, pueden variar desde 40000 hasta 120000 kg/ha de materia verde. La variabilidad es causada fundamentalmente por los diferentes registros pluviales anuales. La concentración de azúcares puede variar entre 10 y 20 °Bx y es afectada principalmente por el momento fenológico de cosecha y la ocurrencia de siembras tardías. El objetivo primario de aumentar la producción de materia verde derivará en la máxima obtención de jugo, y se puede alcanzar sembrando en fecha óptima (octubre-noviembre) y con buena disponibilidad de agua (irrigación). Para maximizar los °Bx deberemos partir de cultivos sembrados en fecha óptima y a su vez realizar la cosecha en el momento fenológico mas adecuado (lechoso-pastoso a madurez).

Según los resultados obtenidos, podemos afirmar que en Uruguay el sorgo azucarado puede producir en el entorno de los 80000 kg/ha de materia verde, con 20 °Bx lo que resultaría en una producción de etanol igual o superior a los 4800 l/ha. En cultivos irrigados podría estimarse el rendimiento promedio de etanol en 6000 litros por hectárea, obtenido a partir de 100000 kg/ha de

materia verde con 20 °Bx. El riego, a la vez de permitir alcanzar mayores rendimientos contribuye a que los mismos sean más estables a través de los años. Toda esta información se resume en la Figura 4, donde es posible correlacionar biomasa con °Bx.

Ventana de cosecha

Se define como ventana de cosecha el período durante el cual el material producido está en condiciones de ser cosechado, para ser procesado en el ingenio. En el caso de la industria sucro-alcoholera de Bella Unión, la caña de azúcar se cosecha normalmente a partir del mes de mayo lo que implica tener el ingenio improductivo una buena parte del año por falta de materia prima. En este sentido el cultivo de sorgo azucarado se presenta como un complemento muy interesante ya que posibilitaría disponer de materia prima para el ingenio a partir de marzo, ampliando considerablemente el número de días en que el ingenio permanece activo.

Doble cosecha estacional de sorgo azucarado

Durante marzo y abril se cosechan las siembras tempranas y normales del sorgo azucarado. Con un manejo diferente, se puede lograr una cosecha más adelantada realizando dos cortes en el mismo cultivo, lo que permitiría lograr una primera cosecha alrededor del 15 de febrero, en estadio embuche-floración, y una segunda en abril-mayo sobre el rebrote, en estadio post-floración. Esta doble cosecha será en términos generales similar en productividad de etanol a la cosecha única, pero tendrá la ventaja de contribuir a incrementar la producción total del sistema, mediante un alargamiento del período productivo del ingenio.



La propuesta anterior implicaría duplicar los costos de cosecha y transporte, un balance económico y/o energético nos dará para cada caso particular la factibilidad de realizar esta práctica.

Cosecha diferida en pie

En cultivos sembrados en octubre-noviembre no se ha observado en los ensayos una reducción significativa en el contenido de azúcar al diferir la cosecha hasta por 45 días. Sería la herramienta más importante para ampliar el periodo de cosecha de ser necesario.

CONCLUSIONES GENERALES

- El manejo del cultivo de sorgo azucarado está dirigido a la obtención de azúcares simples disueltos en el jugo del tallo, de cuya fermentación se obtiene etanol carburante. Por lo tanto se priorizará la producción de tallos, en vez de granos o forraje: esto implica la utilización de prácticas de manejo y cultivares específicos.
- Desde el punto de vista agroclimático, todo el país es una región muy apta para el cultivo de sorgo azucarado. El mismo no tiene en nuestro país ninguna limitante que afecte su potencial como cultivo productor de materia prima para un ingenio, siempre que se cumplan los criterios que permitan aprovechar al máximo las condiciones agrometeorológicas que requiere (agua, luz y temperatura). Tanto en el sur como en el norte del país se han logrado rendimientos que confirman que existen condiciones climáticas óptimas para el cultivo.
- El rango de fecha de siembra óptima para la producción de etanol se sitúa entre los meses de octubre -noviembre. El límite de fecha de siembra para la producción de etanol se sitúa entre el 15 y 31 de diciembre.
- Se desarrolló un modelo de predicción de la ocurrencia de estadios fenológicos relevantes del sorgo azucarado para diferentes fechas de siembra y ciclo del cultivar. El mismo se encuentra disponible en <http://www.inia.org.uy/online/site/79837211.php>.
- Los mayores rendimientos se obtuvieron con distribuciones cuadradas, independientemente de la población y cultivar utilizado. Se estima que 120000 plantas/ha puede considerarse una población óptima que permite un buen desempeño de las plantas en condiciones de estrés (hídrico) y determina una excelente capacidad de responder ante buenos ambientes de producción (ej. año húmedo) mediante la promoción del macollaje.
- En las condiciones de Uruguay y para siembras ubicadas dentro del rango óptimo (octubre-noviembre) es posible obtener rendimientos de materia verde entre 40000 y 120000 Kg/ha dependiendo de la disponibilidad de agua (precipitaciones). En condiciones de riego se estima que este rango puede situarse entre 80000 y 120000 kg/ha. La disponibilidad de riego dará a su vez

mayor estabilidad de los rendimientos en una serie de años. En base a lo anterior, el cultivo de sorgo azucarado es capaz de producir 4800 l/ha de etanol en años normales y 6000 l/ha en años húmedos o en condiciones de riego.

- El sorgo azucarado sembrado en octubre-noviembre puede ser cosechado a partir de marzo-abril, esto lo convierte en una excelente alternativa para incrementar la eficiencia de la industria sucro-alcoholera basada en caña de azúcar, ya que posibilita incrementar significativamente el número de días en que el ingenio está productivo.

- Es posible diferir la cosecha en pie hasta 45 días sin que se produzcan mermas significativas del contenido de azúcar en el tallo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bergeret, P.W. y Fernandez Paolillo, W. (1956). Estudio de diversas variedades de sorgo azucarado y sus posibilidades alcohólicas. Apartado de la revista de Ingenieros Agrónomos.
- Cassou, S., Valverde, J. y Verde, R. (1983). Efecto de tres factores de producción en sorgo sacarígeno. Tesis Ingeniero Agrónomo.
- Doggett, H. (1988). Sorghum. Second edition. Tropical agricultural series. Longman Scientific, Essex, UK.
- Fassio, A. (2006). Cultivo de sorgo azucarado para la producción de alcohol etílico en el litoral SW del país. INIA – ANCAP. Serie Actividades de Difusión N°472. Consultado el 1 de Junio de 2011, de: http://www.inia.org.uy/publicaciones/documentos/ad/ad_472.pdf
- Fassio, A., Ibañez, W., Rodríguez, M. y Cesán, A. (2010). Modelos de predicción de estadios fenológicos para Girasol, Maíz, Sorgo granífero, forrajero, azucarado y silero. Consultado el 1 de Junio de 2011, de: <http://www.inia.org.uy/online/site/79837211.php>
- Fassio, A., Vázquez, D. y Ceretta, S. (2007). RENDIMIENTO DE ETANOL A PARTIR DE JUGOS DE SORGO AZUCARADO. Consultado el 1 de Junio de 2011, de: http://www.inia.org.uy/estaciones/la_estanzuela/actividades/documentos/proyecto_sorgo_azucarado_inia_ancap_2007.pdf
- Fassio, A., Vázquez, D. y Ceretta, S. (2007). SORGO AZUCARADO PARA PRODUCCION DE ALCOHOL: Efecto de la fecha de siembra y variables de manejo de cosecha y post-cosecha sobre el rendimiento y calidad del jugo. Serie Actividades de Difusión N°478. Consultado el 1 de Junio de 2011, de: http://www.inia.org.uy/publicaciones/documentos/ad/ad_478.pdf
- Martínez Haedo, M. y Albano, S. (2007). Efecto de la época de siembra, densidad y cultivar sobre la productividad de sorgo azucarado. Tesis Ingeniero Agrónomo.
- Vanderlip, R. L. (1993). How a Sorghum Plant Develops. Kansas State University. Consultado el 1 de Junio de 2011, de: <http://www.ksre.ksu.edu/library/crpls2/s3.pdf>