

Bioenergía y calidad forrajera a partir de sorgo: ¿son objetivos contrapuestos?

Bioenergy and forage quality from sorghum: are they conflicting objectives?

Marcelo G. Torrecillas, María S. Borlandelli, Luis M. Bertoia

m.torrecillas@agrarias.unlz.edu.ar, msborlandelli@gmail.com,
luis.bertoa@agrarias.unlz.edu.ar

Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Lomas de Zamora, Buenos Aires, Argentina

Recibido 15/09/2023; Aceptado: 12/10/2023

Resumen: El sorgo es un cultivo multipropósito que provee grano y tallos que pueden ser utilizados para la producción de azúcar, alcohol, papel, jarabe, alimentación animal en todas sus variantes (forraje en verde, silaje, henos, diferidos, etc.) y eventualmente como biocombustible. La ventaja estratégica del cultivo es que presenta alta productividad bajo condiciones desfavorables. El objetivo de este experimento fue evaluar cuatro morfotipos de sorgo, en función de los caracteres relacionados con el rendimiento y calidad de la biomasa y que definen la aptitud conjunta de bioenergía y calidad forrajera. Se detectó significancia en la interacción Híbrido×Campaña (Hib×Camp) sólo para las variables sólidos solubles totales (SST), Digestibilidad de la MS (Dig) y Lignina detergente ácido (LDA). Hubo efectos significativos del morfotipo para la mayoría de las variables y de la campaña para Rendimiento de biomasa seca (RBS) y Rendimiento de etanol celulósico (RE_{cel}). El morfotipo fotosensitivo convencional (Triunfo) mostró superioridad numérica para RBS, aunque sin diferencias estadísticas con Sugargraze y Argenfor195Fb. En ambas campañas, ADV2800 (Fotosensitivo BMR) registró los valores más elevados para Dig y contenido de hemicelulosa (Hcel). Cuando el objetivo sea biomasa y obtención de energía a través de combustión directa, aquellos materiales con médula seca y altos valores

de LDA serán los más apropiados. No obstante, dicha configuración de la MS estará contrapuesto con un perfil adecuado de calidad forrajera

Palabras-clave: Sorgo; biomasa; etanol; aptitud forrajera; valor calorífico.

Abstract: Sorghum is a multipurpose crop that provides both grain and stalks that can be used for the production of sugar, alcohol, paper, syrup, various forms of animal feed (green forage, silage, hay, deferred feed, etc.), and potentially as a biofuel. The strategic advantage of this crop is its high productivity even under unfavorable conditions. The objective of this experiment was to evaluate four different sorghum morphotypes based on traits related to biomass yield and quality, which collectively determine their suitability for bioenergy and forage quality. Significant effects in the Hybrid×Season interaction (Hib×Seas) only for the variables Total Soluble Solids (TSS), Dry Matter Digestibility (Dig), and Acid Detergent Lignin (ADL) were found. There were significant effects of the morphotype for most variables, and of season for Dry Biomass Yield (DBY) and Cellulosic Ethanol Yield (CEY). Conventional photosensitive morphotype (Triunfo) showed numerical superiority for DBY, although without statistical differences from Sugargraze and Argenfor195Fb. In both seasons, ADV2800 (BMR Photosensitive) recorded the highest values for Dig and hemicellulose content (Hcel). When the objective is biomass and obtaining energy through direct combustion, materials with dry pith and high ADL values will be most suitable. However, this configuration of dry matter will be counterbalanced with an appropriate forage quality profile.

Keywords: Sorghum; biomass; ethanol; forage aptitude; heating value.

1. Introducción

El etanol obtenido a partir de cultivos agrícolas o bioetanol y la biomasa de combustión directa se perfilan como recursos energéticos potencialmente sostenibles, que pueden ofrecer ventajas medioambientales y económicas a largo plazo, en contraposición a las fuentes convencionales (Scott et al., 2015).

En este sentido, el sorgo es un cultivo multipropósito que provee granos y tallos que pueden ser utilizados para la producción de azúcar, alcohol, papel, jarabe, alimentación animal en todas sus variantes (forraje en verde, silaje, henos, diferidos, etc.) y eventualmente biocombustible (Stamenkovic et al., 2020). La ventaja estratégica del

cultivo es que presenta alta productividad bajo condiciones desfavorables como suelos salinos, pobremente estructurados y temporariamente inundados (Houx et al., 2013; Promkhambut et al., 2011) y aún en esos ambientes tiene capacidad de producir lignocelulosa, azúcar y almidón (Qiu et al., 2017) y además posee tolerancia a estrés hídrico (Propheter et al., 2010) y estrés térmico (Druille et al., 2020). La especie ofrece gran diversidad morfológica entre los diferentes biotipos (sileros, forrajeros, fotosensitivos, etc.) con presencia de variados rasgos morfológicos, todos ellos de elevada producción de biomasa y potencialmente aprovechables para la transformación de bioenergía.

Por otro lado, la calidad forrajera también está condicionada por el biotipo de sorgo y rasgos de mejora que poseen (BMR, stay-green, leafy, etc.). En principio, algún carácter como el contenido de azúcares en tallo estaría en línea con una adecuada aptitud silera, y al mismo tiempo, óptima producción de etanol a partir del jugo azucarado (Fonseca de Almeida et al., 2019). Aunque también hay consenso en cuanto a que la composición de la biomasa y su potencial, en relación a la producción de bioetanol, varía considerablemente con el genotipo (Li et al., 2017, Zhao et al., 2009).

El valor de una especie forrajera está determinado principalmente por la degradabilidad del tejido vegetativo y la producción de la biomasa por unidad de superficie y tiempo (Blummel y Rao, 2006). La degradabilidad o digestibilidad está afectada por la estructura de la pared celular y además la celulosa y hemicelulosa de dicha pared constituyen una fuente de energía para los rumiantes. Asimismo, el incremento en la digestibilidad está negativamente relacionado con la lignina, lo cual también significa un incremento en la eficiencia de conversión de la biomasa a bioetanol (Dien et al., 2009).

El objetivo de este experimento fue evaluar cuatro morfotipos contrastantes de sorgo, en función de los caracteres relacionados con el rendimiento y calidad de la biomasa y que definen la aptitud conjunta de bioenergía y calidad forrajera.

2. Materiales y Métodos

Los ensayos se llevaron a cabo en el Establecimiento “Santa Rosa de los Cerrillos” (Pdo. Monte, Bs. As.), durante las campañas (Camp) 2019/20 y 2020/21 y fueron sembrados en el período del 9/11 al 20/11. En ambas campañas la preparación del terreno se realizó mediante labranza convencional, sobre un suelo con las siguientes características: 2019/20: 2,9% MO, pH 5,9, 10,1 ppm de P ext., 16,2 ppm N-NO₃⁻ y

antecesor soja y 2020/21: 3,5% MO, pH 6,3, 15,8 ppm P ext., 20,1 ppm N-NO₃⁻ y antecesor girasol. La siembra se efectuó con maquinaria experimental.

Se realizó un control preventivo de malezas aplicando 2,0 kg ha⁻¹ de atrazina [6-cloro-N-etil-N'-(1-metil-etil)-1,3,5-triazina-2,4-diamina] + 1,3 l ha⁻¹ de Dual Gold® (s-metolaclor) como tratamiento de preemergencia. Toda la semilla sembrada fue tratada con Concep III®. Al momento de la siembra, en ambas campañas, se fertilizó con 110 kg/ha de Easy start plus (18-24-5). En la campaña 2020/21 se efectuó un control preventivo de pulgón de la caña de azúcar (*Melanaphis sacchari*) con formulación de Tiametoxán (14,1%) + Lambdacialotrina (10,6%).

Los híbridos fueron seleccionados en base a diferencias en arquitectura de planta y aptitud productiva. Los híbridos (Hib) fueron: ADV2800® (Fotosensitivo BMR), Triunfo® (Fotosensitivo convencional), Sugargraze® (Silero de baja proporción de panoja) y Argenfor195Fb® (Silero de baja proporción de panoja, médula seca).

Se utilizó un diseño experimental de tres bloques completamente aleatorizados y la parcela experimental consistió de cuatro surcos de 5,2 m de longitud, separados 0,5 m entre surcos.

El momento de corte fue ajustado en cada híbrido, en fotosensitivos (ADV2800 y Triunfo) se realizó cuando las plantas alcanzaron 0,9 m de amarillamiento basal y en los restantes materiales se efectuó cuando alcanzaron el estado de grano pastoso duro (E₈₂) (Torrecillas et al., 2011).

La metodología de cosecha consistió en cortar tres metros lineales (3m) de ambos surcos centrales 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 en 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 biomasa seca por unidad de superficie (RBS).

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

Recibido 08/10/2023; Aceptado: 21/10/2023

Sobre las muestras obtenidas se realizaron las siguientes determinaciones de calidad:

- Contenido de Lignina Detergente ácido (%) (LDA).
- Contenido de Hemicelulosa (%) (Hcel).
- Contenido de Celulosa (%) (Cel).

Calculados en base a las expresiones:

Hcel = FDN-FDA

Cel = FDA-LDA

- Digestibilidad *in vitro* de la MS (%) (Dig).

Las determinaciones de Fibra Detergente Neutro (FDN), Fibra Detergente Ácido (FDA), Lignina Detergente Ácido (LDA) y dFDN se efectuaron mediante la técnica de bolsitas filtrables en incubadores ANKOM220 (ANKOM technology Corp., Fairport, NY) (Vogel et al., 1999) y Daisy II (ANKOM technology Corp., Fairport, NY).

Sobre todas las muestras se efectuó la medición de Valor Calórico Superior (VCS) (Kcal/kg), llevada a cabo en Faq-UNL, mediante la Norma ASTM D-2382.

De acuerdo a la expresión de Corn (2009) y a partir de la variable SST se calculó el rendimiento de azúcar fermentable (RAF) y a partir del término de predicción de Zhao et al. (2009) el rendimiento teórico de etanol a partir de azúcares (REazu) y rendimiento de etanol celulósico determinado a partir de valores de hemicelulosa y celulosa, de acuerdo a la expresión de Zhao et al. (2012).

Se efectuó un ANOVA combinado entre ambas campañas y las comparaciones entre medias se realizó por medio del test de Diferencias Mínimas Significativas (DMS) con un nivel de significancia de $p < 0,05$. Se realizó el estudio de correlaciones fenotípicas de Pearson entre las variables evaluadas.

Para todos los análisis estadísticos se utilizó el software INFOSTAT (Di Rienzo et al., 2020).

3. Resultados y discusión

Condiciones climáticas

La campaña 2020/21 mostró casi 123 mm menos que la media histórica y casi 90 mm por debajo de la campaña 2019/20, con bajos registros en los meses de Nov y Dic, lo cual se vio evidenciado con dificultades en la implantación y en las primeras etapas de crecimiento vegetativo (Tabla 1).

Los valores temperatura, en función de la media mensual, se ubicaron dentro del rango normal del registro histórico.

Tabla 1.

Distribución de precipitaciones (mm) y temperatura media (°C) en el período crítico del cultivo y registro histórico de 35 años en la zona de influencia, para las campañas 2019/20 y 2021/22.

Mes	2019/20		2020/21		Histórico (1960-1996)	
	mm	°C	mm	°C	mm	°C
Nov	44	20,1	29	20,5	119,8	19,2
Dic	213	22,7	37	23,0	105,2	22,0
Ene	62	24,6	112	24,0	90	23,2
Feb	80	21,7	136	22,1	121,6	21,9
Total	399		314		436,6	

En relación a los materiales que panojaron y en líneas generales para ambas campañas, el material más temprano (Argenfor195Fb) alcanzó el estado de mitad de floración (E₆) 82 días después de emergencia, mientras que Sugargraze lo hizo en 93 días. No existieron condiciones restrictivas de crecimiento para desencadenar un período prolongado de latencia en los híbridos. La altura de planta de los híbridos participantes varió de 3,64 (Argenfor195Fb) a 2,68 m (ADV2800).

Variables relacionadas al rendimiento de biomasa y bioenergía

Hubo efectos significativos del morfotipo en la mayoría de las variables y de la campaña para RBS y REcel (Tabla 2). La no ocurrencia de interacción entre híbridos y campañas para los caracteres de rendimiento (RBS, REazu y REcel), mostró un comportamiento coincidente de los híbridos en ambas campañas evaluadas.

Cuando se analizó RBS, pudo comprobarse que la campaña 2019/20 tuvo una performance superior de casi 6 t/ha, con respecto a la 2020/21 (Tabla 3). El morfotipo fotosensitivo convencional (Triunfo) mostró superioridad numérica (24,52 tMS/ha),

aunque sin diferencias estadísticas con Sugargraze y Argenfor195Fb. Dichos resultados están en un todo acuerdo con los reportes de Roozeboom et al. 2019, Olson et al. 2013 y Tamang et al. 2011, quienes resaltaron para este tipo de materiales, aspectos determinantes como período extendido de crecimiento vegetativo, alta relación biomasa de tallo/hojas y mayor tasa de remobilización desde hojas y entrenudos inferiores. Asimismo, el morfotipo fotosensitivo BMR fue superado significativamente por el resto (Tabla 2). En ese sentido, la presencia del rasgo BMR supone en general una merma de rendimiento de MS del orden de 15-20%, con respecto a la contraparte convencional (Oliver et al., 2005).

Tabla 2.

Medias obtenidas del combinado entre campañas de: Contenido de Celulosa (Cel), Contenido de Hemicelulosa (Hcel), Valor calorífico superior (VCS), Rendimiento de azúcar fermentable (RAF) y Rendimiento de etanol a partir de azúcares (RE_{azu}) y análisis de varianza (ANAVA).

Hib	Cel	Hcel	VCS	RAF	RE _{azu}
	(%)	(%)	(Kcal/kg)	(t/ha)	(L/ha)
Triunfo	39,06 a	25,27 b	3936 ab	2,68 b	1179 b
ADV2800	34,10 b	27,91 a	3814 b	2,06 c	1370 c
Argenfor195Fb	38,61 a	25,45 b	4035 a	1,27 d	846 d
Sugargraze	39,27 a	24,97 b	3847 b	5,32 a	3537 a
ANAVA					
Hib	*	*	*	*	*
Camp	ns	ns	ns	ns	ns
Hib×Camp	ns	ns	ns	ns	ns

Tabla 3.

Rendimiento de biomasa seca (RBS) y Rendimiento de etanol celulósico (RE_{cel}), valores del análisis combinado (Comb) sobre cuatro morfotipos de sorgo, durante las campañas 2019/20 y 2020/21 y valores de las campañas, promediados entre híbridos.

	Triunfo	ADV2800	Argenfor195Fb	Sugargraze
<i>RBS</i>				
			tMS/ha	
Comb	24,52 a [¶]	17,21 b	22,09 a	23,17 a
2019/20	24,72 a [#]			
2020/21	18,77 b			
<i>RE_{cel}</i>				
			L/ha	
Comb	8159 a	5536 b	7375 a	7723 a
2019/20	8244 a			
2020/21	6152 b			

[¶] Medias en una fila seguidas por la misma letra no difieren significativamente a nivel de 0,05.

[#] Medias en una columna seguidas por la misma letra no difieren significativamente a nivel de 0,05.

En relación a VCS, el morfotipo silero de médula seca se ubicó al tope del ránking (4036 Kcal/kg), aventajando significativamente al resto de los híbridos. Dicha variable discrimina a aquellos híbridos más adecuados para la obtención de energía vía combustión directa (pirólisis).

En contraposición a lo último, la performance de los morfotipos para la variable RAF está en relación con el contenido de SST (médula jugosa) y el buen comportamiento de Sugargraze también supone que sus valores fueron traccionados por buen desempeño para RBS.

En línea con lo reportado por Yue et al. (2021), que el rendimiento de azúcar fermentable, en híbridos de sorgo con médula jugosa, es el componente más importante para la producción de etanol de primera generación. Entonces, con la misma tendencia en los resultados que esta última variable, se destacó el comportamiento de Sugargraze para el rendimiento de etanol a partir de azúcares (RE_{azu}), donde aventajó (3537 l/ha) y casi duplicó los valores del fotosensitivo convencional (1780 l/ha).

Con el mismo patrón de ordenamiento, los tres morfotipos convencionales superaron significativamente al híbrido BMR, cuando se evaluó REcel. La merma de 30% en RBS ocurrida para ADV2800 (fotosensitivo BMR) impactó negativamente en su performance para REcel. Asimismo, el mejor resultado en RBS para la campaña 2019/20, también se vio reflejado en los valores de REcel. Es de destacar que, aún con bajo nivel de RBS, cuando el objetivo fuera la obtención de etanol de segunda generación, el hecho que en el material BMR se conjuguen alto Dig y bajo LDA, determinará menor demanda de energía para el proceso de hidrólisis del residuo lignocelulósico (Cotton et al., 2013).

Variables relacionadas con la calidad forrajera

En el ANOVA combinado se encontró significancia en la interacción Hib×Camp para las variables SST, Dig y LDA. Como consecuencia de dicha interacción se observó cambios relativos en los rankings y comportamientos diferenciales de los híbridos según la campaña considerada, para las mencionadas variables (Tabla 4).

Si bien SST es determinante en la definición del rendimiento de etanol a partir de azúcares (REazu), también está asociado a la aptitud de los híbridos para silaje de planta entera. Asimismo, un adecuado contenido de SST en tallo contribuye a sostener la preferencia y palatabilidad animal, aún en situaciones de aprovechamiento tardío (diferidos).

En ambas campañas, ADV2800 (Fotosensitivo BMR) registró los valores más elevados para Dig, con un valor medio de 11 puntos porcentuales por encima del inmediato inferior. Este resultado está muy vinculado a los valores de LDA, donde dicho híbrido logró los menores registros, con 4,09% para 2019/20 y 4,13% para 2020/21, lo cual constituye un 36% menos del valor más elevado (Argenfor195Fb). Es clara y está bien demostrado la superioridad del rasgo BMR, en términos de digestibilidad de la MS, con respecto a su contraparte no BMR (Oliver *et al.*, 2005, Yerka et al., 2015).

Tabla 4.

Medias de Sólidos solubles totales (SST), Digestibilidad de la MS (Dig) y Lignina detergente neutro (LDA) sobre cuatro morfotipos de sorgo, durante las campañas 2019/20 y 2020/21.

Variable	Triunfo	ADV2800	Argenfor195Fb	Sugargraze
2019/2020				
SST (°B)	6,8 b	4,6 c	3,3 c	10,3 a
Dig (%)	43,96 b	54,84 a	41,52 c	38,77 d
LDA (%)	5,47 b	4,09 c	6,12 a	5,79 ab
2020/2021				
SST (°B)	8,9 b	6,4 c	3,1 d	13,5 a
Dig (%)	43,08 bc	59,69 a	40,39 c	44,11 b
LDA (%)	5,26 b	4,13 c	7,12 a	5,13 bc

Medias en una fila seguidas por la misma letra no difieren significativamente a nivel de 0,05.

En el presente experimento, el morfotipo BMR superó significativamente al resto para Hcel (27,91%), lo cual coincide con lo informado por Dien et al. (2009) y Fonseca de Almeida et al. (2019) (Tabla 2). Al mismo tiempo, registró el menor valor para Cel (34,1%) y en este sentido, estos resultados también concuerdan con los obtenidos por Fonseca de Almeida *et al.* (2019).

Contrariamente, Sugargraze tuvo un comportamiento variable para Dig en ambas campañas, lo cual probablemente contribuyó a la interacción, ya que en 2019/20 fue el peor material posicionado (38,77%), pero estando en segundo lugar (44,11%) junto al fotosensitivo convencional en 2020/21. Pudo observarse un comportamiento más regular por parte de Argenfor195Fb, ya que en ambas campañas obtuvo un valor elevado de LDA, que se correspondió con mala performance en Dig y SST. Dichos resultados confirman que, si bien no presentó diferencias significativas con Sugargraze

y Triunfo para RBS, aquel híbrido no estaría bien posicionado en cuanto a su perfil de calidad forrajera.

Las correlaciones fenotípicas entre las variables están expresadas en la Tabla 4. El conocimiento de las estimaciones de correlación permitió evaluar el grado de asociación entre dos caracteres. Estos valores muestran influencia positiva o negativa entre las variables, facilitando la predicción del comportamiento de otras.

Los mayores valores de correlación significativa fueron observados entre RE_{cel}×RBS (0,98), RAF×SST (0,91), RE_{azu}×SST (0,92), Cel×Dig (-0,88) y LDA×Dig (-0,80). También se observó asociación significativa y positiva entre VCS×LDA, lo cual está en un todo acuerdo con lo observado por Maksimuk et al. 2021.

De tal forma, cuando el objetivo sea biomasa y obtención de energía a través de combustión directa, aquellos materiales con médula seca y altos valores de LDA serán los más apropiados. De acuerdo a lo hallado por Diallo et al. (2019) y coincidente con lo encontrado en este experimento, dicha configuración de calidad de la MS se contrapone con un perfil adecuado de calidad forrajera.

Entonces, la asociación negativa detectada entre RBS y Dig y la positiva entre RBS y Cel y RBS y RE_{cel} reafirma que los componentes estructurales de la fibra contribuyen al volumen de biomasa, pero en desmedro de la calidad de la materia seca. No obstante, cuando el objetivo sea la obtención de bioenergía a partir de azúcares, los híbridos adecuados para tal fin tendrán un perfil compatible con adecuada calidad forrajera.

Tabla 5.

Coeficientes de correlación fenotípica de Pearson entre las variables: Rendimiento de biomasa seca (RBS), Valor calorífico superior (VCS), Sólidos solubles totales (SST), Digestibilidad de la MS (Dig), Lignina detergente ácido (LDA), Contenido de Celulosa (Cel), Contenido de Hemicelulosa (Hcel), Rendimiento de azúcar fermentable (RAF), Rendimiento de etanol a partir de azúcares (RE_{azu}) y Rendimiento de etanol celulósico (RE_{cel}).

Variable	RBS	VCS	SST	Dig	LDA	Cel	Hcel	RAF	RE _{azu}
VCS	0,28								
SST	0,09	-0,31							
Dig	-0,46*	-0,38	-0,15						
LDA	0,21	0,53*	-0,22	-0,80*					
Cel	0,46*	0,28	0,31	-0,88*	0,61*				
Hcel	0,02	-0,01	-0,31	0,54*	-0,46*	-0,63*			
RAF	0,25	-0,33	0,91*	-0,24	-0,12	0,31	-0,23		
RE _{azu}	0,25	-0,32	0,92*	-0,23	-0,11	0,30	-0,22	0,98*	
RE _{cel}	0,98*	0,29	0,08	-0,49*	0,22	0,49*	0,06	0,24	0,23

* Significativo a nivel de 0,05

4. Referencias bibliográficas

Blümmel, M. & Rao, P. P. (2006). Economic value of sorghum stover traded as fodder for urban and peri-urban dairy production in Hyderabad, India. *International Sorghum and Millets Newsletter* 47, 97-100.

Corn, R. J. (2009). *Heterosis and composition of sweet sorghum* Ph.D diss. Soil and Crop Sciences. Texas A&M Univ. College Station. <https://repository.tamu.edu/bitstream/handle/1969.1/ETD-TAMU-2009-12-7409/CORN-DISSERTATION.pdf?sequence=3>

Cotton, J., Burow, G., Acosta Martínez, V. & Moore-Kucera, J. (2013). Biomass and cellulosic ethanol production of forage sorghum under limited water conditions. *Bioenerg. Res.*, 6, 711-718. <https://doi.org/10.1007/s12155-012-9285-0>

Diallo, B., Li, M., Tang, C., Ameen, A., Zhang, W. & Xie, G.H. (2019). Biomass yield, chemical composition and theoretical ethanol yield for different genotypes of energy sorghum cultivated on marginal land in China. *Industrial Crops and Products*, 137, 221-230.

Dien, B. S., Jung, H. J. G., Vogel, K. P., Casler, M. D., Lamb, J. F.S., Iten, L., Mitchell, R. B. & Sarath, G. (2006). Chemical composition and response to dilute-acid pretreatment and enzymatic saccharification of alfalfa, reed canarygrass, and switchgrass. *Biomass and Bioenergy*, 30,880-891.

Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., Gonzalez, L., Tablada, M. y Robledo, C. W. InfoStat (versión 2020) [Software]. Córdoba, Argentina: Centro de Transferencia InfoStat, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Córdoba. <http://www.infostat.com.ar>

Druille, M., Williams, A., Torrecillas, M., Kim, S., Meki, N. y Kiniry, J. (2020). Modeling climate warming impacts on grain and forage sorghum yields in Argentina. *Agronomy*, 10, 964. <http://doi:10.3390/agronomy10070964>

Fonseca de Almeida, L. G., Costa Parrella, R. A., Ferreira Simeone, M. L., Oliveira Riveiro, P. C., Soares dos Santos, A., Vieira da Costa, A. S., Guimarães, A. G. & Schaffert, R. E. (2019). Composition and growth of sorghum biomass genotypes for ethanol production. *Biomass and Bioenergy*, 122, 343-348.

Houx, J. H., Roberts, C. A. & Fritsch, F.B. (2013). Evaluation of sweet sorghum bagasse as an alternative livestock feed. *Crop Sci.*, 53, 1784-1790.

Li, M., Wang, J., Du, F., Diallo, B. & Xie, G. H. (2017). High-throughput analysis of chemical components and theoretical ethanol yield of dedicated bioenergy sorghum using dual-optimized partial least squares calibration models. *Biotechnol. Biofuels* 10, 206.

Maksimuk, Y., Antonava, Z., Krouk, V., Korsakova, A. & Kursevich, V. (2021). Prediction of higher heating value (HHV) based on the structural composition for biomass. *Fuel*, 299(1), 120860.

Oliver, A, Pedersen, J., Grant, R. & Klopfenstein, T. (2005). Comparative effects of the sorghum bmr-6 and bmr-12 genes: I. Forage sorghum yield and quality. *Crop Sci.*, *45*, 2234-2239.

Olson, S. N.; Ritter, K., Medley, J., Wilson, T., Rooney, W. L. & Mullet, J.E. (2013). Energy sorghum hybrids: Functional dynamics of high nitrogen use efficiency. *Biomass and Bioenergy*, *56*, 307-316.

Promkhambut, A., Polthanee, A., Akkasaeng, C. & Younger, A. (2011). Growth, yield and aerenchyma formation of sweet and multipurpose sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) as affected by flooding with different growth stages. *Aust. J. Crop Sci.*, *5*, 954-965.

Propheter, J. L., Staggenborg, S. A., Wu, X. & Wang, D. (2010). Performance of annual and perennial biofuel crops: Yield during the first two years. *Agron. J.*, *102*, 806-814.

Qiu, S., Yadav, M. & Yin, L. (2017). Characterization and functionalities study of hemicellulose and cellulose components isolated from sorghum bran, bagasse and biomass. *Food Chem.*, *230*, 225-233.

Roozeboom, K. L., Wang, D., McGowan, A. R., Propheter, J. L., Staggenborg, S. A. & Rice, C.W. (2019). Long-term biomass and potential ethanol yield of annual and perennial biofuel crops. *Agron. J.*, *111*, 74–83

Scott, V., Haszeldine, R. S., Tett, S. F. & Oschlies, A. (2015). Fossil fuels in a trillion tonne world. *Nature Climate Change*, *5*, 419-423.

Stamenkovic, O., Siliveru, K., Veljkovic, V., Bankovic-Ilic, I., Tasic, M., Ciampitti, I., Dalovic, I., Mitrovic, P., Sikora, V. & Prasad, V. (2020). Production of biofuels from sorghum. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *124*, 109769.

Suwarti, E., Massinai, R. & Pabendon, M. B. (2018). Evaluation of sweet sorghum (*Sorghum bicolor* L. [Moench]) on several population density for bioethanol production. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, *141*, 012032.

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.

Torrecillas, M.G., Cantamutto, M. A. & Bertoia, L. M. (2011). Head and stover contribution to digestible dry matter yield on grain and dual-purpose sorghum crop. *Aust. J. Crop Sci.*, 5, 116-122.

Vogel, K.; Pedersen, J., Masterson, S. & Toy, J. (1999). Evaluation of a filter bag system for NDF, and IVDMD forage analysis. *Crop Sci.*, 39, 276-279.

Yerka, M., Watson, A., Toy, J., Erickson, G., Pedersen, J. & Mitchell, R. (2015). Yield and forage value of a dual-purpose bmr-12 sorghum hybrid. *Crop Sci.*, 55, 681-687.

Yue, M.; Wang, Z.; Dun, B.; Han, F. & Li, G. (2021). Simplified methods of estimating fermentable sugar yield in sweet sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] stems. *Industrial Crops and Products*, 169, 113652.

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 biofuel. *Field Crops Res.*, 111, 55-64.

Zhao, Y. L., Steinberger, Y., Shi, M., Han, L. P. & Xie, G. H. (2012). Changes in stem composition and harvested produce of sweet sorghum during the period from maturity to a sequence of delayed harvest dates. *Biomass and Bioenergy*, 39, 261-273.