

QUALIDADE DO CALDO PARA PRODUÇÃO DE ETANOL EM CULTIVARES DE SORGO SACARINO SOB ADUBAÇÃO NITROGENADA

CRISTÓBAL SOTO SOLANO¹, NIRALDO JOSE PONCIANO¹, ROGÉRIO FIGUEIREDO DAHER¹,
RAFAEL AUGUSTO DA COSTA PARRELLA², PAULO MARCELO DE SOUZA¹
e JOSÉ PACHELLI SARMET MOREIRA ROCHA¹

¹Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro Reitoria, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil,
csoto@uenf.br, ponciano@uenf.br, rogdaher@uenf.br, pmsouza@uenf.br, msimoes@uenf.br, pacellisarmet@gmail.com

²Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG, Brasil, rafael.parrella@embrapa.br

Revista Brasileira de Milho e Sorgo, v.16, n.3, p. 388-400, 2017

RESUMO - O sorgo sacarino tem potencial de uso como fonte de matéria-prima para a produção de bioetanol. Objetivou-se, com este estudo, analisar o efeito da adubação nitrogenada de cobertura na qualidade do caldo para produção de etanol de quatro cultivares de sorgo sacarino. O experimento foi conduzido em Campos dos Goytacazes-RJ, de janeiro a maio de 2014. Foram estudadas quatro cultivares de sorgo sacarino: BRS 506, BRS 508, BRS 509 e BRS 511 e cinco doses de nitrogênio (0, 80, 160, 240 e 320 Kg ha⁻¹), aplicadas aos 25 e 45 dias após semeadura. Os resultados mostraram que valor Brix, açúcares redutores totais, açúcares totais recuperáveis, volume do caldo e rendimento de etanol foram afetados pela adubação nitrogenada. Para todas as características, o valor máximo foi obtido pela dose de 240 kg de N ha⁻¹. Entre as cultivares, a BRS 506 mostrou-se superior em produção de caldo e rendimento de etanol. Enquanto a BRS 511 destacou-se nos atributos ART e ATR, e a cultivar BRS 508 sobressaiu-se no valor Brix. A cultivar BRS 506 apresentou melhor resultado combinado, com maior volume de caldo e rendimento de etanol com as doses de 204 e 212 kg N ha⁻¹, respectivamente.

Palavras-chave: biocombustíveis, rendimento de álcool carburante, atributos industriais, caracterização da matéria prima, genótipos.

QUALITY OF BROTH FOR ETHANOL PRODUCTION IN CULTIVARS OF SACARINE SORGHUM UNDER NITROGEN FERTILIZATION

ABSTRACT - Sweet sorghum has potential as a source of raw material for the production of bioethanol. The objective of this study was to analyze the effect of nitrogen topdressing on the quality of the juice for ethanol production from four cultivars of sorghum. The experiment was conducted in Campos, State of Rio de Janeiro, Brazil, from January to May 2014. Four cultivars of sorghum: BRS 506, BRS 508, BRS 509 and BRS 511 were studied, and five nitrogen rates (0, 80, 160, 240 and 320 kg ha⁻¹), applied to 25 and 45 days after sowing. The results showed that the value Brix, total reducing sugars, total recoverable sugars, broth volume and ethanol yield were affected by nitrogen fertilization. For all features, the maximum value was obtained for the dose of 240 kg N ha⁻¹. Among cultivars, BRS 506 was superior in production of broth and ethanol yield. BRS 511 stood out in the attributes ART and ATR, and BRS 508, in value Brix. BRS 506 had better combined result of higher volume of juice and ethanol yield with doses of 204 and 212 kg N ha⁻¹, respectively

Keywords: biofuels, fuel ethanol output, industrial attributes, characterization of raw materials, genotypes.

A matriz energética atual concentra-se em combustíveis de origem fóssil, que têm resultado poluidor, emitindo gases que contribuem e agravam o efeito estufa. Atualmente, várias fontes alternativas de energias renováveis são estudadas, a partir de matéria-prima vegetal para produção de biocombustíveis. O etanol é produzido mundialmente e em grande escala a partir da biomassa, utilizando como fontes culturas agrícolas que contenham quantidades consideráveis de açúcares, como no caso da cana-de-açúcar ou de culturas ricas em amido, como o milho.

Na busca de novas alternativas de energia renovável, a cultura do sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench.] se destaca, de forma semelhante à da cana-de-açúcar, por apresentar colmos suculentos com altos teores de açúcares diretamente fermentescíveis, os quais possibilitam a produção de etanol com até 93% de eficiência (Han et al., 2012). Além disso, seu bagaço pode ser aproveitado pela indústria na geração de energia e eletricidade, produção de etanol de segunda geração e, ainda, aproveitamento dos grãos que são úteis para consumo humano, produção de ração animal ou produção de combustíveis (Almodares & Hadi, 2009).

O sorgo sacarino é uma espécie rústica, que tem ampla adaptabilidade e tolerância a estresses abióticos. Além de ter ciclo curto de produção (de 100 a 120 dias para alto rendimento de biomassa), é cultivado a partir de semente, tem menor exigência de água e boa tolerância à seca, podendo ser explorado em larga escala e com grande adequabilidade a diversas condições de clima e solo (Durães, 2011; Ratnavathi et al., 2010; Prasad et al., 2007). Isso torna a cultura, dentre aquelas com potencial bioenergético, uma interessante opção para compor a matriz energética nacional como complemento ao cultivo da cana-de-açúcar.

A cultura do sorgo sacarino pode ser empregada como alternativa para adiantar o início da safra da cana-de-açúcar, sendo estabelecida e colhida no período da entressafra, nos meses de novembro a maio. Desta forma, reduz-se o período de ociosidade da indústria alcooleira, que não ficaria sem matéria-prima para a produção de álcool, haja vista que, nessa época, os canaviais encontram-se em pleno desenvolvimento vegetativo sem ainda alcançar a maturidade adequada para seu aproveitamento industrial. Outra vantagem é que sua implantação e colheita são totalmente mecanizadas e seu processamento industrial pode utilizar as mesmas instalações destinadas à produção de etanol proveniente da cana-de-açúcar.

Variedades de sorgo sacarino diferem muito no potencial de produção de etanol e qualidade do caldo e em sua adaptação a diversas condições de solo e clima (Ratnavathi et al., 2010). Assim, variedades com colmos de porte alto e diâmetro grosso, alta porcentagem de suco extraído, suco com alto teor de Brix e xarope de alta qualidade são os preferidos para a produção de biocombustível, além alta resistência a acamamento, doenças e seca (Ratnavathi et al., 2010).

Em relação à adubação nitrogenada, poucas são as informações específicas para esta cultura. As recomendações técnicas, muitas vezes, têm sido baseadas na cultura de sorgo forrageiro (May et al., 2012), sorgo granífero e do milho (Civardi et al., 2011). O sorgo é responsivo à adubação nitrogenada, sendo o nitrogênio (N) um dos macronutrientes de maior demanda para a produção de biomassa (Silva & Lovato, 2010).

Apesar disso, fatores edafoclimáticos, como textura do solo, regime de chuvas e os fatores genéticos inerentes a cada cultivar, devem ser considerados na recomendação de nitrogênio, principalmente em cultivares de alto rendimento de biomassa (May et al.,

2012) e que têm apresentado boa qualidade de suco (Miri & Rana, 2014). Diante do exposto, este trabalho objetivou avaliar o efeito da adubação nitrogenada de cobertura na qualidade do caldo extraído de colmos de quatro cultivares de sorgo sacarino para obtenção de etanol.

Material e Métodos

O estudo foi conduzido em área experimental localizada no município de Campos dos Goytacazes, no Norte Fluminense, situado entre a latitude $-21^{\circ}45'15''S$ e a longitude $41^{\circ}19'28''E$ e altitude média de 13 m, durante o período de janeiro a maio de 2014. O solo é classificado como Cambissolos háplico. O clima da região conforme a classificação de Köppen é Cwa do tipo quente úmido com temperatura média do mês mais frio em torno de $21^{\circ}C$, e do mais quente, em torno de $27^{\circ}C$. A precipitação média anual de 1.023 mm, concentrada no período de outubro a janeiro.

Os dados sobre as variações na temperatura e na precipitação média por decêndios são apresentados na Tabela 1. Análise do solo foi realizada em julho 2013, no Centro de Análises do Solo da UFRRJ, Campos dos Goytacazes-RJ, na camada do solo de 0 a 0,20 m com os seguintes atributos químicos: pH = 5,5; P (Extrator Carolina do Norte) = 7 mg dm^{-3} ; K = 38 mg dm^{-3} ; Ca = 2,0; Mg = 0,9; Al = 0,0; T = 6,3 ($\text{cmol}_c\text{ dm}^{-3}$); MO = $19,1\text{ g dm}^{-3}$ e V = 48%. O solo

recebeu $1,20\text{ t ha}^{-1}$ de calcário dolomítico (PRNT 80 %), no dia 22/09/2013, para correção da acidez e elevação da saturação por bases a 60%.

O delineamento experimental utilizado foi em blocos ao acaso, no esquema fatorial 4×5 , envolvendo 20 tratamentos, constituídos pela combinação de quatro cultivares (BRS 506, BRS 508, BRS 509 e BRS 511), com cinco doses de nitrogênio (0, 80, 160, 240 e 320 kg ha^{-1}) e quatro repetições por tratamento. As unidades experimentais ou parcelas foram constituídas por quatro linhas de 5 m de comprimento, espaçadas em 0,70 m para um estande de 120.000 plantas por hectare. A área útil da parcela para avaliação das características agrônômicas e industriais foi constituída pelas duas linhas centrais de 3 m de comprimento, eliminando-se 1 m de bordadura em cada extremidade.

O preparo do solo foi realizado com uma gradagem aradora e duas gradagens niveladoras. Foram feitas duas capinas manuais aos 20 e 40 dias após semeadura para o controle de plantas daninhas. Para o controle de pragas, foram realizadas duas pulverizações com Lannate ($0,6\text{ L.ha}^{-1}$), e para controle de doenças utilizou-se o fungicida de uma mistura comercial de triazol e estrobirulina contendo epoxiconazol e piraclostrobina ($0,5\text{ L.ha}^{-1}$). Tais aplicações foram por meio de pulverizador costal pressurizado. O plantio foi realizado em 16/01/2014, colocando de 2 a 3 sementes, manualmente, ao longo do sulco a cada 10 cm. Desbastaram-se no período de 10 a 15

Tabela 1. Dados médios de precipitação pluvial (mm) e temperatura ($^{\circ}C$) por decêndio de 11/01/2014 a 30/05/2014. Estação meteorológica de Campos dos Goytacazes-RJ.

	Janeiro		Fevereiro			Março			Abril		Maio	
Decêndio	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Chuvas (mm)	34,6	0,0	0,0	10,6	0,0	8,2	0,0	104,0	45,4	60,8	28,2	4,0
Temperatura ($^{\circ}C$)	26,4	27,0	27,5	26,5	27,0	26,2	27,1	24,7	25,3	25,1	22,8	23,6

dias após emergência das plântulas deixando 10 plantas por metro linear.

No cálculo da quantidade de fertilizante consideraram-se as características químicas do solo, a produtividade esperada e as recomendações de May et al. (2012). A adubação de fósforo e potássio foi realizada manualmente, aplicando-se no fundo do sulco de semeadura, e constou de 330 e 140 kg ha⁻¹ de superfosfato simples e cloreto de potássio, respectivamente. A adubação nitrogenada foi realizada em cobertura, sendo metade da dose aplicada aos 25 dias e a outra metade 45 dias após o plantio, esparçada superficialmente e ao lado, à distância de 15 a 20 cm das linhas de plantio, em solo úmido, e posteriormente incorporando com terra a ureia, fonte nitrogenada usada. Todos os tratamentos receberam, por igual, irrigação complementar por aspersão convencional.

A colheita e a obtenção dos dados foram realizadas na maturação fisiológica, quando aproximadamente 90% das panículas apresentavam grãos com coloração típica de maduros e em estado farináceo. Neste trabalho, foram avaliados: teor de sólidos solúveis (Brix), concentração de açúcares redutores (AR) e açúcares redutores totais (ART), volume do caldo (VC), açúcares totais recuperáveis (ATR) e rendimento estimado de etanol (REE).

Na colheita, as plantas de cada área útil foram cortadas manualmente e rentes ao solo, e pesadas em balança eletrônica para estimativa de produção de matéria natural. Desse material, uma amostra de 10 colmos despalhados de cada área útil foi selecionada aleatoriamente, pesada e imediatamente encaminhada para o Laboratório de Controle de Processos e Qualidade da Usina Canabrava, localizada em Travessão, a aproximadamente 20 quilômetros da área experimental, para extração e análises do caldo, segundo o mé-

todo de CONSECANA adaptado por Costa (2008), para o Estado de Rio de Janeiro.

As plantas foram desintegradas em desfibrador e homogeneizadas, e o conteúdo de caldo do colmo foi extraído de uma subamostra de 500 g de material fresco (colmos) homogeneizado, transferido a uma prensa hidráulica e submetido a pressão constante de 250 kgf cm⁻² (24,5 Mpa) durante um minuto. Após a prensagem, o caldo foi pesado e sua massa foi estimada através da relação do peso do caldo e do peso da massa fresca das dez plantas com o peso total da massa verde dos colmos das parcelas, e posteriormente convertido em Mg ha⁻¹. De uma amostra do caldo extraído foi determinado o Brix empregando-se um refratômetro digital, de leitura e correção automática de temperatura.

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância (Anova) utilizando-se o programa Genes, versão Windows, Cruz (2006). Em caso de significância para o fator cultivar, os valores foram submetidos ao teste Tukey, no nível de significância de 5% de probabilidade. Quando verificado efeito significativo de doses ou da interação entre nitrogênio e cultivares, foram realizadas análises de regressão polinomial a 5%, utilizando-se o maior coeficiente de determinação como um dos critérios para a escolha do modelo de melhor ajustamento aos resultados.

Resultados e Discussão

Os dados de precipitação pluviométrica durante o período de condução do experimento encontram-se na Tabela 1, que foi marcada por baixas precipitações e uma má distribuição de chuvas, principalmente nos meses iniciais do período do cultivo, sendo necessárias contínuas irrigações para manter o bom desenvolvimento da cultura.

O resumo dos resultados de análises de variância conjunta (quadrados médios) para as características avaliadas, apresentado na Tabela 2, mostra diferenças significativas ($p < 0,05$) na fonte de variação doses de nitrogênio (Fb), inferindo-se que esse fator influencia significativamente nas características industriais do caldo extraído dos colmos de sorgo sacarino. Para a fonte de variação cultivares (Fa), observaram-se diferenças altamente significativas ($p > 0,01$) para todos os caracteres avaliadas, exceto o teor de sólidos solúveis (Brix) e açúcares redutores (AR), indicando diferenças entre os genótipos avaliados durante este trabalho.

Para a interação cultivar e doses de nitrogênio, constataram-se diferenças significativas para as características volume de caldo extraído dos colmos e rendimento estimado de etanol, mostrando respostas diferenciadas das cultivares quando avaliadas em diferentes doses de nitrogênio.

Analisando os valores médios referentes às características avaliadas nesse trabalho e expressos na Tabela 3, constatou-se que a variável “sólidos solúveis totais” (Brix) do caldo, quanto à resposta das cul-

tivares às doses de nitrogênio utilizadas, não houve diferença estatística nos genótipos, contudo, os valores médios obtidos oscilaram de 19,50 a 21,55 graus.

Esses resultados são superiores aos encontrados por Parrella et al. (2010), que, trabalhando com 25 genótipos de sorgo sacarino visando produção de etanol, em diferentes ambientes eda climáticos, obtiveram teores de Brix em torno de 17,55°. Também se mostraram superiores aos 18,0° obtidos por Emygdio et al. (2014), nas cultivares BRS 506, BRS 509 e BRS 511 num ensaio realizado no município de Pelotas-RS, em diferentes épocas de semeadura, na safra 2012/2013.

O Brix é um dos principais parâmetros para estimar a concentração de açúcares, portanto, altos valores desse grau são convenientes para obter um caldo de alta qualidade de fermentação, visando, principalmente, altos rendimentos de etanol (Prasad et al., 2007; Emygdio, 2011). Além disso, os autores destacam a complexidade de se avaliar esse caráter, ao comparar valores obtidos em experimentos realizados em diferentes ambientes e diferentes épocas, isto, em razão da metodologia utilizada na amostragem do caldo e da análise industrial.

Tabela 2. Quadrados médios das análises de variância para teor de sólidos solúveis (Brix), açúcares redutores (AR%), açúcares redutores totais (ART), volume de caldo por hectare (VC), açúcares totais recuperáveis (ATR) e rendimento estimado de etanol por hectare considerando quatro cultivares de sorgo sacarino (Fa) e cinco doses de nitrogênio (Fb). Campos dos Goytacazes-RJ, 2014.

Fontes de Variação	GL	Brix (%)	AR	ART	VC	ATR	REE
Blocos	3	5,687	1,020	0,207	34767563,579	14,132	8160,813
Cultivares (Fa)	3	0,533 ^{ns}	0,123 ^{ns}	2,814**	256145274,946**	200,245**	2847614,046**
Doses de N (Fb)	4	4,781**	3,745**	0,920*	126629944,394**	64,877*	1841760,513**
(Fa) x (Fb)	12	0,363 ^{ns}	1,482 ^{ns}	0,246 ^{ns}	43291490,935**	17,186 ^{ns}	373793,838**
Resíduo	57	0,471	0,071	0,325	3435774,027	22,691	30522,514
Média		20,730	1,031	13,579	30699,538	114,131	3629,888
CV (%)		3,31	25,855	4,200	6,038	4,180	4,813

*, ** significativos, aos níveis de 5% e 1%, pelo teste de F, ^{ns} não significativo.

Tabela 3. Valores médios de teor de sólidos solúveis (Brix), açúcares redutores (AR%), açúcares redutores totais (ART), açúcares totais recuperáveis (ATR), volume de caldo por hectare (VC), rendimento estimado de etanol por hectare (REE) e produção de massa verde de colmos (MVC) considerando quatro cultivares de sorgo sacarino e cinco níveis de adubação nitrogenada, em ensaio conduzido no município de Campos dos Goytacazes-RJ, 2014.

Características	Cultivares	Níveis de Nitrogênio (Kg)				
		0	80	160	240	320
Brix (%)	BRS 506	20,18 a	21,25 a	21,15 a	20,90 a	20,38 a
	BRS 508	19,93 a	21,38 a	21,35 a	21,55 a	20,50 a
	BRS 509	19,68 a	20,50 a	20,75 a	20,95 a	21,05 a
	BRS 511	19,50 a	20,78 a	21,20 a	21,05 a	20,55 a
ART (%)	BRS 506	13,48 a	13,93 a	13,70 ab	13,95 ab	13,55 a
	BRS 508	12,75 a	13,53 a	13,20 b	13,35 b	13,50 a
	BRS 509	13,12 a	13,50 a	13,48 ab	13,33 b	13,00 a
	BRS 511	13,45 a	13,82 a	14,52 a	14,52 a	13,90 a
ATR (%)	BRS 506	113,35 a	117,00 a	115,00 ab	117,20 ab	114,02 a
	BRS 508	107,25 a	113,85 a	110,80 b	112,43 b	113,35 a
	BRS 509	110,23 a	113,23 a	113,30 ab	111,98 b	109,30 a
	BRS 511	113,05 a	116,32 a	122,07 a	122,20 a	116,70 a
VC L ha ⁻¹	BRS 506	25.787 b	34.882 a	38.456 a	36.346 a	35.282 a
	BRS 508	20.215 c	26.291 b	28.956 c	29.950 c	25.854 c
	BRS 509	25.979 b	26.086 b	26.387 c	34.933 ab	33.761 a
	BRS 511	32.224 a	35.619 a	34.658 b	32.804 bc	29.513 b
REE L ha ⁻¹	BRS 506	3.114 b	4.158 a	4.303 a	4.185 a	4.196 a
	BRS 508	2.441 c	3.308 b	3.477 b	3.719 b	3.113 c
	BRS 509	2.907 b	3.143 b	3.181 b	3.870 ab	3.964 a
	BRS 511	3.765 a	3.992 a	4.085 a	4.043 ab	3.631 b
MVC (Mg ha ⁻¹)	BRS 506	47,90 a	61,90 a	65,20 a	62,15 a	64,10 a
	BRS 508	36,63 b	50,60 b	54,58 c	57,65 b	47,83 c
	BRS 509	45,93 a	48,30 b	48,88 d	60,18 ab	63,15 a
	BRS 511	48,52 a	59,82 a	58,22 b	57,60 b	54,15 b

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não diferem entre si pelo teste de Tukey (p < 0,05).

Em relação ao efeito das doses de N, observou-se que as cultivares apresentaram ajuste quadrático, em que o ponto máximo, estimado pela equação de regressão, com a dose de 144 kg ha⁻¹ de N, registrando um Brix de 20,92° (Figura 1).

Kumar et al. (2008) e Miri & Rana (2014), estudando cultivares, doses de nitrogênio e população de plantas, relatam ter encontrado resultados estatisticamente

significativos por causa da aplicação de doses de nitrogênio em termos de produção de biomassa, caldo e leitura do Brix. Prasad et al. (2007) sugerem valores de 15,5 a 16,5 Brix no momento da colheita, enquanto Almodares & Hadi (2009) e Ratnavathi et al. (2010) recomendam médias superiores para obter um caldo de alta qualidade de fermentação.

Para os atributos agroindustriais, açúcares redutores totais (ART) e açúcares totais recuperáveis (ATR), observaram-se diferenças estatisticamente significativas, tanto na fonte de variação cultivares ($p < 0,01$) como nas doses de nitrogênio ($p < 0,05$), não existindo diferença significativa na interação cultivares e doses de nitrogênio (Tabela 2).

Por meio do desdobramento da interação cultivares dentro de cada dose de nitrogênio, constatou-se diferença significativa nesta variável apenas nas doses de 160 e 240 kg ha⁻¹ de N (Tabela 3). Para ambos os atributos, a cultivar BRS 511 destacou-se entre os genótipos avaliados, registrando valores médios iguais a 14,04 e 118,07 de ART e ATR, respectivamente (Figura 2).

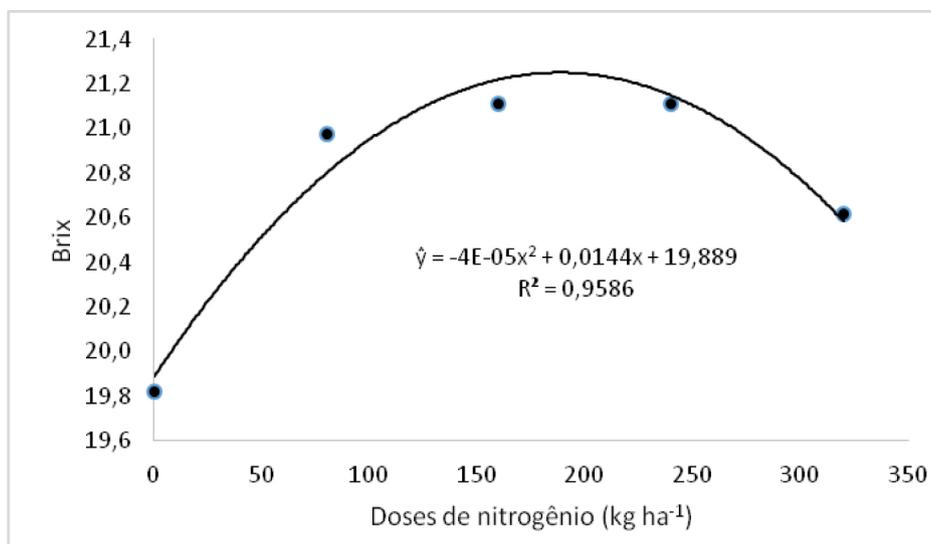


Figura 1. Valores médios de teor de sólidos solúveis (Brix) obtidos de quatro cultivares de sorgo sacarino considerando cinco doses de nitrogênio no município de Campos dos Goytacazes-RJ, em 2014.

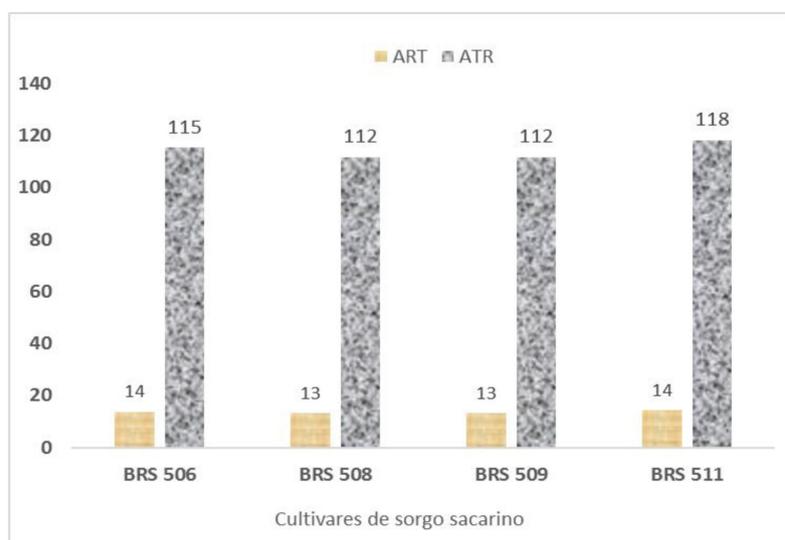


Figura 2. Teor de açúcares redutores totais - ART e açúcares totais recuperáveis - ATR sob cinco diferentes níveis de adubação nitrogenada em cobertura no município de Campos dos Goytacazes-RJ, 2014.

Essa variação entre genótipos pode ser atribuída à variação do potencial genético das cultivares avaliadas. Esses resultados corroboram com os obtidos por Redy et al. (2008) e Miri & Rana (2014), que proporcionaram valores claramente influenciados pela aplicação de diferentes doses de nitrogênio.

Tanto a concentração de açúcares fermentáveis (ART) como a quantidade estimada de açúcares recu-

peráveis (ATR) mostraram efeito linear de 2º grau no que se refere à resposta dos genótipos às diferentes doses utilizadas, cujas equações de regressão estimaram seus pontos máximos nas doses de 160,0 e 244,5 kg ha⁻¹, respectivamente (Figura 3).

Trabalhos de pesquisa desenvolvidos pela Embrapa Milho e Sorgo descrevem que o caldo dos colmos do sorgo sacarino deve prover níveis mínimos de

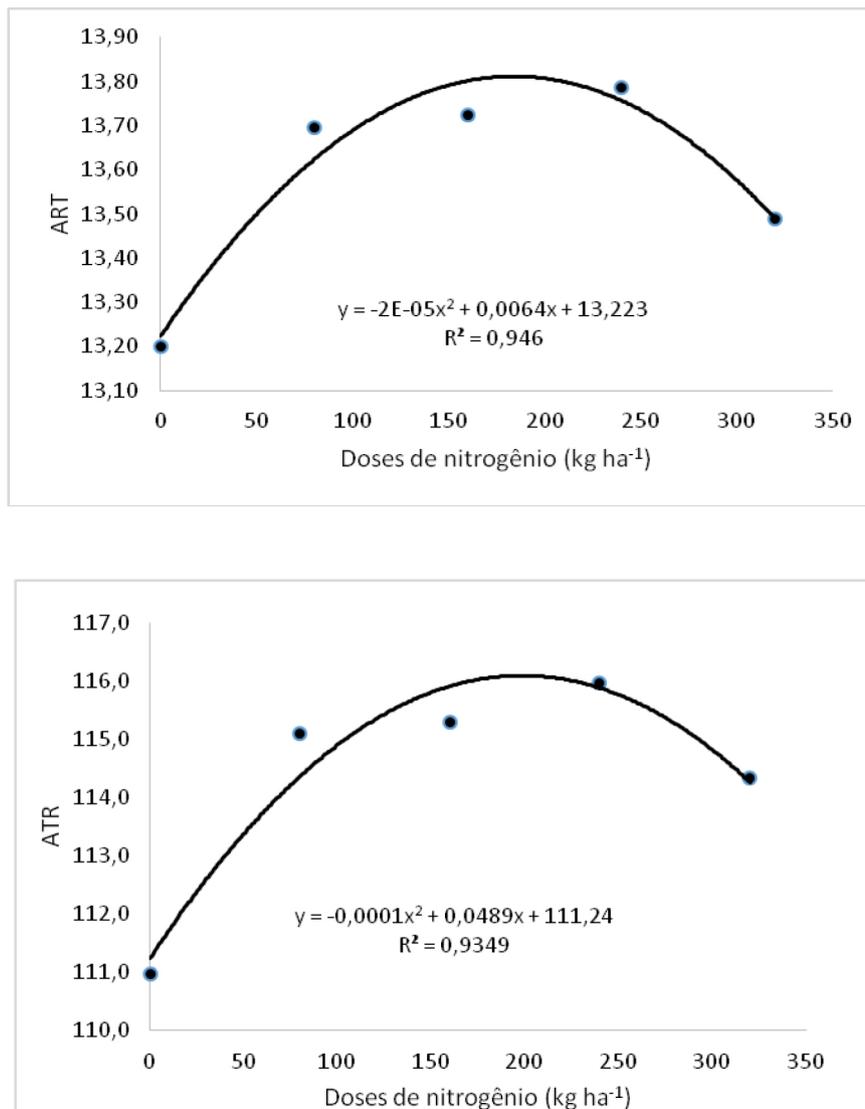


Figura 3. Médias da concentração de açúcares redutores totais (ART) e açúcares recuperáveis totais (ATR) obtidas de quatro cultivares de sorgo sacarino, considerando cinco doses de nitrogênio. Campos dos Goytacazes-RJ, 2014.

produção de açúcar e teor de açúcar total (ART) para viabilizar uma produção econômica e sustentável de etanol (Schaffert & Parrella, 2012). Esses autores recomendam um ART mínimo de 12,5%, para que a levedura possa converter completamente este nível de açúcar em etanol dentro de 6 a 10 horas, para obter um melhor aproveitamento da eficiência de utilização dos tanques de fermentação.

Desse modo, no presente trabalho verifica-se que as concentrações de açúcares redutores totais (ART) encontradas no colmo das cultivares do sorgo sacarino registraram valor médio de 13,58%, acima dos valores obtidos por Santos et al. (2010) e Ribeiro Filho et al. (2008), que relataram valores próximos aos 10%. Contudo, muito inferiores aos citados para a cana-de-açúcar, que possui, em média, valores de 16 a 19% (Von Pinho & Vasconcelos, 2002).

Para a variável volume de caldo (VC), foi constatado que as cultivares de sorgo sacarino apresentaram respostas significativamente diferentes em função das doses de nitrogênio utilizadas. Assim, verificou-se que os maiores valores médios de volume de caldo foram obtidos na dose de 240 kg ha⁻¹ de N. Onde não houve adubação nitrogenada, houve os menores valores médios de caldo, sendo a cultivar BRS 508 com a menor média registrada. Ainda se constatou que a cultivar BRS 506 registrou o maior valor médio, de 38,456 litros por hectare na dose de 160 kg de N ha⁻¹ (Tabela 3).

A análise estatística também revelou diferenças entre os genótipos estudados. A cultivar BRS 506 registrou os maiores valores médios de produção de caldo, sendo apenas superada pela BRS 511, no tratamento onde não foi aplicada adubação nitrogenada. Enquanto a BRS 508 proporcionou os menores valores médios dentro das cultivares avaliadas (Tabela 3).

A análise de regressão revelou que as cultivares BRS 506, BRS 508 e BRS 511 apresentaram um efeito linear de 2º grau ($P < 0,05$), mostrando que aumentos crescentes de nitrogênio proporcionaram uma elevação no volume de caldo até um certo patamar, a partir do qual crescimentos sucessivos causaram diminuição desse atributo (Figura 4).

Os efeitos por causa do nitrogênio foram mais significativos na cultivar BRS 506, que alcançou maior volume de caldo nos colmos de sorgo sacarino na dose estimada de 204 kg N ha⁻¹, enquanto as cultivares BRS 508 e BRS 511 registraram os maiores volumes de caldo nas doses estimadas de 198 e 128 kg ha⁻¹, respectivamente. Doses de nitrogênio superiores a estas proporcionaram valores menores de volume de caldo. Resposta linear de 1º grau foi observada para a cultivar BRS 509, na qual incrementos sucessivos de 80 kg ha⁻¹ de N proporcionaram ganhos iguais a 2.441 litros ha⁻¹, sugerindo, com isto, novas pesquisas com ampliação do intervalo de doses de nitrogênio.

Percebe-se que, apesar de a cultivar BRS 506 obter o maior volume de caldo estimado em 38.428 L ha⁻¹, precisou de aproximadamente 37% a mais de nitrogênio quando comparada com a BRS 511, cuja produção de volume de caldo ficou em 35.168 L ha⁻¹.

Os volumes de caldo extraído neste trabalho são superiores aos relatados por Rutto et al. (2013), que, avaliando cinco genótipos em três anos de colheita, verificaram rendimento de etanol variando de 7.600 a 23.400 L ha⁻¹ nas cultivares Sugar Drip e MS1E, respectivamente. Esses autores relatam ainda que as diferenças e os baixos rendimentos obtidos podem ser por causa da eficácia da extração.

Em relação ao rendimento estimado de etanol (REE), constataram-se diferenças significativas das cultivares avaliadas para todas as doses testadas. A melhor resposta das cultivares à adubação nitrogena-

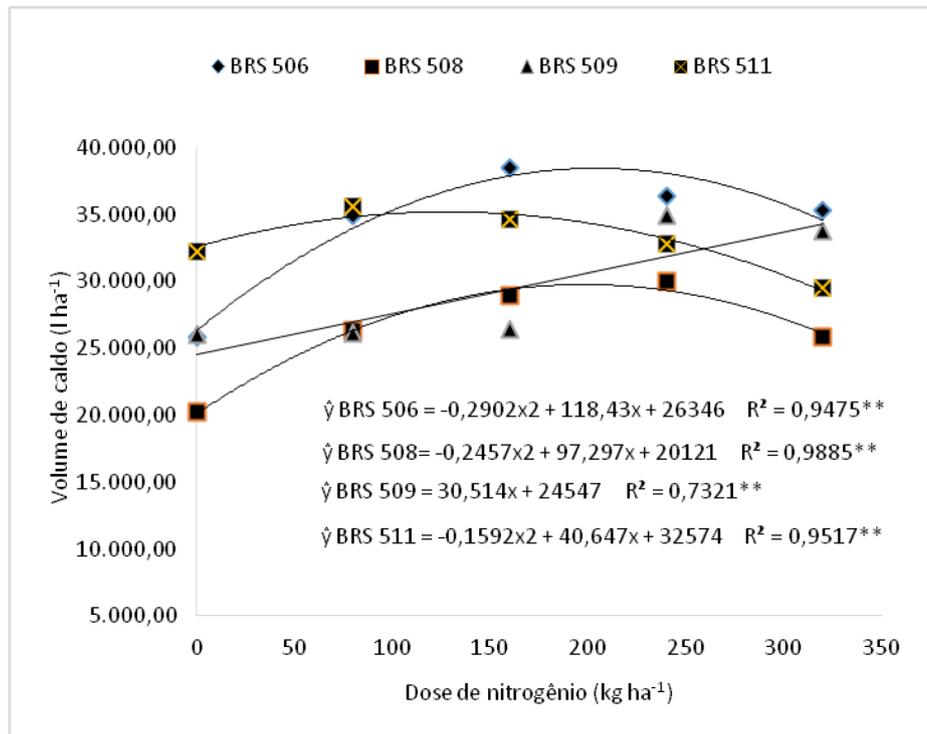


Figura 4. Curvas de regressão para volume do caldo obtido de quatro cultivares de sorgo sacarino, considerando cinco doses de nitrogênio, no município de Campos dos Goytacazes-RJ, 2014. * e **: significativo a 5 e 1% pelo teste F.

da foi obtida com a dose de 240 kg, com um valor médio de 3.955 L ha⁻¹ (Tabela 3).

Os melhores resultados desse atributo foram alcançados pela cultivar BRS 506, exceto onde não houve aplicação de nitrogênio, em que a BRS 511 obteve maior rendimento. Contudo, a cultivar BRS 506 obteve a melhor média de rendimento teórico de etanol para todas as doses testadas, alcançando 3.991 L ha⁻¹, seguida muito perto da cultivar BRS 511, com 3.903 litros.

Os resultados obtidos também evidenciam uma tendência de aumento na produção de etanol em função das doses crescentes de nitrogênio, conforme ilustrado na Figura 5. Assim, as cultivares BRS 506, 511 e 508 mostraram respostas linear de 2º grau, em que o máximo produtivo foi alcançado com as doses esti-

mas de 212, 151 e 194 kg ha⁻¹ de nitrogênio, respectivamente. Enquanto a cultivar BRS 509 teve resposta linear de 1º grau, de modo que o rendimento de etanol aumentou com o incremento da dose de nitrogênio. Desse modo, aumento das doses de nitrogênio a cada 80 kg ha⁻¹ produziu acréscimos de 284 litros de etanol do caldo extraído dos colmos de sorgo sacarino.

Neste trabalho, a produção de álcool por hectare, em média, variou entre 2.441 e 4.303 L ha⁻¹, com rendimento médio acima de 3.600 litros ha⁻¹, com valores máximos obtidos na dose de 240 kg de N e com uma produção estimada de 3.955 litros de etanol por hectare. Contudo, os valores máximos foram obtidos pela cultivar BRS 506, seguida da BRS 511, ambas na dose de 160 kg de N ha⁻¹ (Tabela 3), estando dentro das médias observadas pela May et al. (2012).

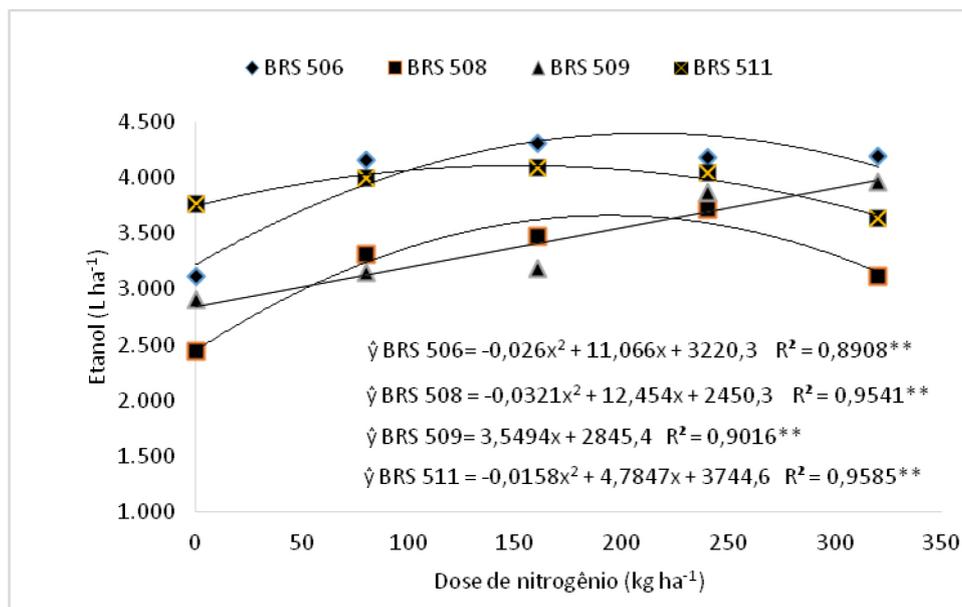


Figura 5. Médias de rendimento estimado de etanol obtidas de quatro cultivares de sorgo sacarino, considerando cinco doses de nitrogênio, no município de Campos dos Goytacazes-RJ, 2014. * e **: significativo a 5 e 1% pelo teste F.

Ramos (2014) observou relações significativas e positivas entre valores de nitrogênio acumulado no colmo e o rendimento de etanol, entre outras variáveis, e que a presença e a quantidade do nutriente nos colmos das plantas de sorgo sacarino podem interferir nos valores desta variável.

Os resultados obtidos neste experimento mostram que a adubação nitrogenada influencia a produtividade e o rendimento de caldo do sorgo. As adubações de cobertura entre 151 e 212 kg de N ha⁻¹ apresentaram melhores resultados, destacando-se a BRS 506 como a mais eficiente na produção de etanol, a BRS 511 com maiores ART e ATR e ainda a BRS 508 no valor de Brix. Baseando-se nos resultados, pode-se dizer que a dosagem otimizada de adubação nitrogenada dependerá dos níveis de preços do fertilizante e do sorgo. Entre as cultivares analisadas,

aponta-se a BRS 506 com maior potencial de conseguir melhor retorno econômico.

Conclusão

O nitrogênio influencia características indicadoras de rendimento industrial do sorgo sacarino. O melhor rendimento de etanol foi obtido pela cultivar BRS 506, seguida da BRS 511, nas condições deste experimento. As melhores doses para rendimento de etanol ficaram entre 151 e 212 kg ha⁻¹ de N.

Agradecimentos

À Embrapa Milho e Sorgo, por fornecer as sementes das quatro cultivares de sorgo sacarino avaliadas nesse estudo. Ao Dr. Marcelo Pendão, da Usina

Cana Brava, de Campos dos Goytacazes, pela realização das análises industriais. À Capes, pela bolsa de estudo do primeiro autor.

Referências

- ALMODARES, A.; HADI, M. R. Production of bioethanol from sweet sorghum: a review. **African Journal of Agricultural Research**, Washington, v. 4, n. 9, p. 772-780, 2009.
- CIVARDI, E. A.; SILVEIRA NETO, A. N.; RAGAGNIN, V. A.; GODOY, E. G.; BROD, E. Ureia de liberação lenta aplicada superficialmente e ureia comum incorporada ao solo no rendimento do milho. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 41, n. 1, p. 52-59, 2011. DOI: [10.5216/pat.v41i1.8146](https://doi.org/10.5216/pat.v41i1.8146).
- COSTA, J. A. B.; PONCIANO, N. J.; SOUZA, P. M. de. Avaliação da sistemática de cálculos para efeito de pagamento de cana pelos açúcares totais recuperáveis (ATR) nos estados do Rio de Janeiro, Espírito Santo e São Paulo. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA, ADMINISTRAÇÃO E SOCIOLOGIA RURAL-SOBER, 46., 2008, Rio Branco. **Anais...** Rio Branco: SOBER, 2008. 1 CD-ROM.
- CRUZ, C. D. **Programa genes**: biometria: aplicativo computacional em genética e estatística. Viçosa, MG: UFV, 2006. 382 p.
- DURÃES, F. O. M. Sorgo sacarino: tecnologia agrônoma e industrial para alimentos e energia. **Agroenergia em Revista**, Brasília, DF, n. 3, p. 14-52, 2011.
- EMYGDIO, B. M.; ROSA, A. P. da; FACCHINELLO, P. H.; STOHRICK, L.; BARROS, L. Desempenho de cultivares de sorgo sacarino para produção de etanol em diferentes épocas de semeadura, no município de Pelotas, RS. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 30.; SIMPÓSIO SOBRE LEPTÓPTEROS COMUNS A MILHO, SOJA E ALGODÃO, 1., 2014, Salvador. **Eficiência nas cadeias produtivas e o abastecimento global**: resumos expandidos. Sete Lagoas: Associação Brasileira de Milho e Sorgo, 2014. 1 CD-ROM.
- EMYGDIO, B. M. Desempenho da cultivar de sorgo sacarino BR 506 visando à produção de etanol em dois ambientes contrastantes. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, Porto Alegre, v. 17, n. 1, p. 45-51, 2011.
- HAN, K. J.; PITMAN, W. D.; ALISON, M. W.; HARRELL, D. L.; VIATOR, H. P.; McCORMICK, M. E.; GRAVOIS, K. A.; KIM, M.; DAY, D. F. Agronomic considerations for sweet sorghum biofuel production in the South-Central USA. **Bioenergy Research**, New York, v. 5, n. 3, p. 748-758, 2012. DOI: [10.1007/s12155-012-9185-3](https://doi.org/10.1007/s12155-012-9185-3).
- KUMAR, S. R.; SHROTRIA, P. K.; DESHMUKH, J. P. Characterizing nutrient management effect on yield of sweet sorghum genotypes. **World Journal of Agricultural Sciences**, Pradesh, v. 4, n. 6, p. 787-789, 2008.
- MAY, A.; DURÃES, F. O. M.; PEREIRA FILHO, I. A.; SCHAFFERT, R. E.; PARRELLA, R. A. da C. (Ed.). **Sistema Embrapa de produção agroindustrial de sorgo sacarino para bioetanol**: Sistema BRS1G-Tecnologia Qualidade Embrapa. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2012. 118 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Documentos, 139).
- MIRI, K.; RANA D. S. Productivity, nutrient uptake and profitability of sweet sorghum-mustard cropping system under different levels of nitrogen. **American Journal of Agricultural Science and Technology**, v. 2, n. 2, p. 62-63, 2014. DOI: [10.7726/ajast.2014.1007](https://doi.org/10.7726/ajast.2014.1007).
- PARRELLA, R. A. da C.; MENEGUCI, J. L. P.; RIBEIRO, A.; SILVA, A. R. da; PARRELLA, N. L. D.; RODRIGUES, J. A. S.; TARDIN, F. D.; SCHAFFERT, R. E. Desempenho de cultivares de sorgo sacarino em diferentes ambientes visando a produção de etanol. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 28.; SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE A LAGARTA DO CARTUCHO, 4., 2010, Goiânia. **Potencialidades, desafios e sustentabilidade**: resumos expandidos... Goiânia: ABMS, 2010. 1 CD-ROM.

- PRASAD, S.; SINGH, A.; JAIN, N.; JOSHI, H. C. Ethanol production from sweet sorghum syrup for utilization as automotive fuel in India. **Energy & Fuels**, Washington, v. 21, n. 4, p. 2415-2420, 2007. DOI: [10.1021/ef060328z](https://doi.org/10.1021/ef060328z).
- RAMOS, S. B. **Dose, parcelamento e modo de aplicação de nitrogênio em atributos nutricionais, agrônômicos e tecnológicos de cultivares de sorgo sacarino**. 2014. 153 f. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2014.
- RATNAVATHI, C. V.; SURESH, K.; VIJAY KUMAR, B. S.; PALLAVI, M.; KOMALA, V. V.; SEETHARAMA, N. Study on genotypic variation for ethanol production from sweet sorghum juice. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 34, n. 7, p. 947-952, 2010.
- REDDY, P. S.; REDDY, B. V. S.; KUMAR, A. A.; SRINIVASA, R. P. Standardization of nitrogen fertilizer rate for sugar yield optimization in sweet sorghum. **Journal of SAT Agricultural Research**, v. 6, p. 1-4, 2008.
- RIBEIRO FILHO, N. M.; ALVES, R. M.; FLORÊNCIO, I. M.; FLORENTINO, E. R.; DANTAS, J. P. Viabilidade de utilização do caldo do sorgo sacarino para a produção de álcool carburante (etanol). **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 2, p. 30-39, 2008.
- RUTTO, L. K.; XU, Y.; BRANDT, M.; REN, S.; KERING, M. K. Juice, ethanol, and grain yield potencial of five sweet sorghum (*Sorghum bicolor* [L.] Moench) cultivars. **Journal of Sustainable Bioenergy Systems**, v. 3, n. 2, p. 113-118, 2013. DOI: [10.4236/jsbs.2013.32016](https://doi.org/10.4236/jsbs.2013.32016).
- SANTOS, R. C.; RIBEIRO FILHO, N. M.; SOUZA, W. J. B.; ALMEIDA, K. V.; FLORENTINO, E. R. Estudo de fermentação alcoólica do caldo de sorgo sacarino. In: CONGRESSO QUÍMICO DO BRASIL, 1., 2010, João Pessoa. **Anais**. João Pessoa: [s.n.], 2010.
- SCHAFFERT, R. E.; PARRELLA, R. A. da C. Planejamento industrial. In: MAY, A.; DURÃES, F. O. M.; PEREIRA FILHO, I. A.; SCHAFFERT, R. E.; PARRELLA, R. A. da C. (Ed.). **Sistema Embrapa de produção agroindustrial de sorgo sacarino para bioetanol**: Sistema BRS1G-Tecnologia Qualidade Embrapa. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2012. p. 85-92. (Embrapa Milho e Sorgo. Documentos, 139).
- SILVA, P. C. S.; LOVATO, C. Resposta da aplicação de nitrogênio em sorgo em sistema de plantio direto. **Revista Cultivando o Saber**, Cascavel, v. 3, n. 3, p. 170-189, 2010.
- VON PINHO, R. Z.; VASCONCELOS, R. C. de. **Cultura do sorgo**. Lavras: UFLA, 2002. 75 p. (Textos Acadêmicos).