

Capítulo 10

Cultivares de sorgo para produção de bioenergia

Rafael Augusto da Costa Parrella

Maria Lúcia Ferreira Simeone

Nádia Nardely Lacerda Durães Parrella

Robert Eugene Schaffert

Introdução

O rápido aumento da população global e o desenvolvimento econômico concomitante levam ao aumento da demanda por energia e alimento. O uso contínuo de combustíveis fósseis para atender a demanda por energia resulta em altos níveis de poluição atmosférica, rápido esgotamento das reservas de combustível fóssil e emissão de gases de efeito estufa (GEE), que contribuem para a mudança climática global. Fontes renováveis de energia, incluindo solar, eólica e bioenergia, podem ajudar a mitigar os efeitos negativos associados ao uso de combustíveis fósseis e representam uma parcela crescente do portfólio de energia (Sandesh; Ujwal, 2021).

Neste contexto, os biocombustíveis são de especial interesse, porque são a única fonte de combustível líquido, que é renovável e compatível com a frota de veículos existente no Brasil na atualidade. Estudos mostram que o uso de bioetanol misturado à gasolina em automóveis tem o potencial de reduzir significativamente o uso de petróleo e diminuir as emissões de GEE (Balat; Balat, 2009; Soares et al., 2009). Além disso, como os biocombustíveis se originam de biomassa vegetal, a produção deles pode contribuir para o desenvolvimento econômico rural.

Os tipos de sorgo para síntese de bioenergia produzem açúcares fermentescíveis nos colmos, possuem alta produtividade de fibra e ainda produzem grãos (amido) nas panículas. Sendo assim, o sorgo é considerado uma cultura de grande potencial para a produção de biocombustíveis (Rooney et al., 2007), e de grande interesse para o setor sucroenergético. Os

grãos ricos em amido, bem como os açúcares extraídos do colmo, podem ser utilizados para produção de etanol. O bagaço, resultante da extração do caldo, pode ser usado para gerar calor a partir da queima, como matéria-prima lignocelulósica para a produção de biocombustíveis de segunda geração, ou como fonte de biogás em digestores anaeróbicos (Almeida et al., 2019a; Molaverdi et al., 2013).

Principais Características no Desenvolvimento das Cultivares de Sorgo Biomassa e Sacarino

O sorgo para bioenergia envolve os tipos sacarino e biomassa, que apresentam porte alto (3-5 m) associado a alta produtividade de biomassa, superior a 100 t/ha de matéria verde e 30 t/ha de matéria seca.

Os genes de nanismo (*dw1*, *dw2*, *dw3* e *dw4*) controlam o porte em sorgo, e os alelos dominantes em todos os locus conferem o maior porte, superior a 3 m (Quinby, 1974). Os genes de maturidade (*Ma1*, *Ma2*, *Ma3*, *Ma4*, *Ma5* e *Ma6*) controlam o ciclo e a sensibilidade ao fotoperíodo (Rooney; Aydin, 1999). Assim, a combinação desses genes pode resultar em cultivares sensíveis (ciclo 150 a 180 dias) e insensíveis (ciclo 110 a 130 dias) ao fotoperíodo, ambas de alto porte e alta produtividade de biomassa (Figura 1).



Figura 1. Híbridos de sorgo biomassa A e sacarino B sensíveis ao fotoperíodo, desenvolvidos pelo programa de melhoramento da Embrapa, safra 2019/2020.

O sorgo sensível ao fotoperíodo floresce apenas quando os dias possuem menos de 12 horas e 20 minutos de luz (Rooney; Aydin, 1999), que corresponde ao período entre 21 de março e 22 de setembro, na maior parte do Brasil. Assim, quando o sorgo sensível é semeado nos meses de outubro a dezembro no Brasil, quando o fotoperíodo é maior que 12 horas e 20 minutos, a indução do desenvolvimento da gema floral só ocorrerá a partir de 21 de março do ano seguinte. Com isso, o ciclo vegetativo e o porte serão ampliados e, concomitantemente, apresentarão maior produção de biomassa por hectare/ciclo em comparação a cultivares fotoinsensíveis, que florescem em qualquer época do ano e apresentam ciclo curto de 110 a 130 dias (Parrella et al., 2018).

A grande estratégia na síntese destes híbridos fotossensíveis de sorgo é aumentar o período vegetativo e conseqüentemente o ciclo, que reflete em maior crescimento e produção de biomassa fresca e seca. Estas características são fortemente associadas (Murray et al., 2008a, 2008b, 2009), apresentando correlação superior a 80%, mostrando que os genótipos de maior produtividade de matéria verde também apresentam maior produção de massa seca. Castro et al. (2015), em avaliações de híbridos de sorgo biomassa em Lavras-MG, observaram uma variação na produção de 24 a 47 t ha⁻¹ de matéria seca, confirmando o grande potencial produtivo destes tipos de híbridos. Na avaliação de híbridos de sorgo biomassa, Almeida et al. (2019b) alcançaram valores de produtividade de 20 a 35 t.ha⁻¹ de massa seca, confirmando o grande potencial produtivo destes híbridos.

O tipo de colmo é outra característica importante para o sorgo visando a produção de bioenergia, pois afeta o teor de umidade da biomassa e conseqüentemente o teor de matéria seca no momento da colheita (Figura 2). O sorgo possui o gene *Dry*, com os alelos dominantes (*DD* ou *Dd*) controlando o colmo seco (pithy - Figura 2b) e os alelos recessivos (*dd*) controlando a presença de caldo (juice - Figura 2a) (Zhang et al., 2018). O sorgo biomassa se caracteriza pelo genótipo (*DD* ou *Dd*), exibindo baixos teores de umidade nos colmos. Durante a maturidade fisiológica, pode apresentar valores de umidade chegando a 60% e com o teor de fibra superior a 25%. Já o sorgo sacarino, diferentemente do biomassa, apresenta o genótipo (*dd*), sendo rico em caldo nos colmos. Apresenta altos teores de umidade na biomassa no momento da colheita, semelhante à cana-de-açúcar, chegando a 75% de umidade e com o teor fibra próximo a 14%. Assim, o sorgo sacarino é destinado à produção de etanol de primeira geração, e o sorgo biomassa,

à cogeração de energia, etanol de segunda geração e produção de biogás (Parrella et al., 2018).



Fotos: Rafael Augusto da Costa Parrella

Figura 2. Tipos de colmos em sorgo para bioenergia. A Colmo com caldo, B colmo seco e C colmo seco com o gene de nervura marrom (brown midrib - *bmr6*).

Os genótipos de sorgo sacarino apresentam caldo no colmo rico em açúcares fermentescíveis, constituído em sua maior parte por sacarose (64%), seguidos por glicose (22%) e frutose (14%) (Kim; Day, 2011). Sabe-se que os teores de açúcares no caldo variam de acordo com a época de colheita e com os genótipos avaliados. Porém, em todas as cultivares observa-se um rápido acúmulo de açúcar no colmo após a emissão da panícula e do florescimento, com pico de açúcar no colmo coincidindo com a maturação fisiológica do grão (Martins et al., 2017; Souza et al., 2016).

Na avaliação de quatro variedades de sorgo sacarino (BRS 506, BRS 508, BRS 509 e BRS 511), observou-se que a variedade BRS 511 apresentou maior produção de açúcar, com níveis superiores a 140 g/L durante a maior parte do experimento e atingindo um máximo de 191 g/L (Fernandes et al., 2014). Todas as variedades apresentaram comportamentos semelhantes em relação ao teor de amido no caldo, que variou de 3 a 5 g/L de acordo com a época de colheita. A utilização de enzimas amiláceas pode aumentar o rendimento açúcares fermentescíveis. O caldo das cultivares de sorgo sacarino foi fermentado com sucesso em oito horas, e foram obtidas produtividades de etanol de 8,5 a 9,0 g/L e rendimento de 87-90,5% de etanol teórico, semelhante ao observado para o caldo de cana-de-açúcar (Fernandes et al., 2014).

Visando explorar o potencial fermentativo do caldo de sorgo sacarino BRS 511, Pacheco et al. (2014) avaliaram o comportamento de três leveduras comerciais (CAT-1, PE-2 e SA-1) em quatro ciclos fermentativos. Utilizando a levedura CAT-1, foram conduzidas também as fermentações

dos caldos das variedades BRS 506, BRS 507 e BRS 508. Foram retiradas amostras até o completo consumo dos açúcares, que foram quantificadas por cromatografia líquida. Os ciclos não prejudicaram a viabilidade de nenhuma cepa. Os resultados mostraram que não houve diferença no desempenho das leveduras ao longo dos ciclos. As fermentações apresentaram rendimento de aproximadamente 90% e viabilidade celular variando de 82% a 97% para todos os experimentos. Os resultados indicam que as cepas industriais estão adaptadas, e os caldos estão aptos ao processo industrial, nas condições avaliadas (Pacheco et al., 2014). Estes resultados confirmam a alta eficiência do caldo do sorgo para produção de etanol, semelhante à cana e adaptado aos processos industriais das usinas no Brasil e no mundo.

Uma característica de importância no sorgo sacarino é o teor de sólidos solúveis totais no caldo (SST), medido em graus brix ($^{\circ}$ Brix), que está diretamente correlacionado com o teor de açúcares totais no caldo (Murray et al., 2008b; Ritter et al., 2008; Lombardi et al., 2015). Os açúcares totais são utilizados como alimentos das leveduras na produção de etanol, sendo desejável em maior grau possível.

O índice tonelada de brix por hectare (TBH), que também está diretamente ligado ao potencial de síntese de etanol dos genótipos, é obtido pelo produto da produção de massa verde (PMV) ou toneladas de colmos por hectares (TC) versus o teor de sólidos solúveis totais ($^{\circ}$ Brix) em unidade. Este índice tem se mostrado bastante útil na seleção de genótipos superiores de sorgo sacarino, por apresentar correlação alta e significativa com o PMV, TC e SST, que são os principais caracteres de sorgo sacarino e estão diretamente correlacionados com a produção de etanol (Lombardi et al., 2015).

Outra característica, importante para o sorgo sacarino é o período de utilização industrial (PUI). O PUI compreende o período em que a cultivar está apta para colheita no campo, mantendo os padrões mínimos de produtividade e qualidade da matéria-prima, que refletem em rendimento de etanol economicamente viável (Schaffert; Parrella, 2012). O PUI é necessário para o planejamento de colheita e processamento da matéria-prima pelas usinas. E deve ser o mais extenso possível, e no mínimo superior a 30 dias, uma vez que atrasos na colheita são comuns em razão de fatores operacionais, como manutenção de maquinários, ou fatores climáticos, como chuvas. Desta forma, cultivares com PUI inferior a 10 dias, por exemplo, apresentam grande risco para o setor sucroalcooleiro, dado que o curto período de tempo, associado aos frequentes atrasos na colheita por parte da

usina, podem resultar em produtividades de etanol abaixo da viabilidade econômica.

A produtividade de etanol das cultivares de sorgo sacarino está associada ao rendimento de colmos por hectares, umidade da biomassa, percentagens de extração de caldo, as quais irão refletir em litros de etanol por tonelada de colmos (Parrella et al., 2018). Neste contexto, a produtividade de colmos das cultivares é uma característica fortemente associada à produtividade de etanol por hectare (Murray et al., 2008a; Ritter et al., 2008; Lombardi et al., 2015), uma vez que o caldo rico em açúcares fermentescíveis é extraído em sua totalidade dos colmos. Assim, quanto maior o rendimento de colmos, maior será a produtividade de caldo por hectare e por consequência maior volume de etanol produzido.

O sorgo sacarino também produz grãos em suas panículas. Porém, neste caso é desejável que a produtividade de grãos seja pequena, em função da competição por fotoassimilados para produção de açúcares solúveis nos colmos com a produção de amido nos grãos. Esta competição ocorre, uma vez que o acúmulo de açúcares nos colmos se inicia após o florescimento, coincidindo com a fase de enchimento de grãos. Além disso, como os cultivares de sorgo sacarino são de porte alto (> 3,0 m), o excesso de grãos nas panículas, no ápice das plantas, tende a favorecer o acamamento. O acamamento no sorgo é indesejável por reduzir o teor de açúcares, aumentar as perdas na colheita, e ainda ampliar o teor de impurezas na colheita das plantas acamadas.

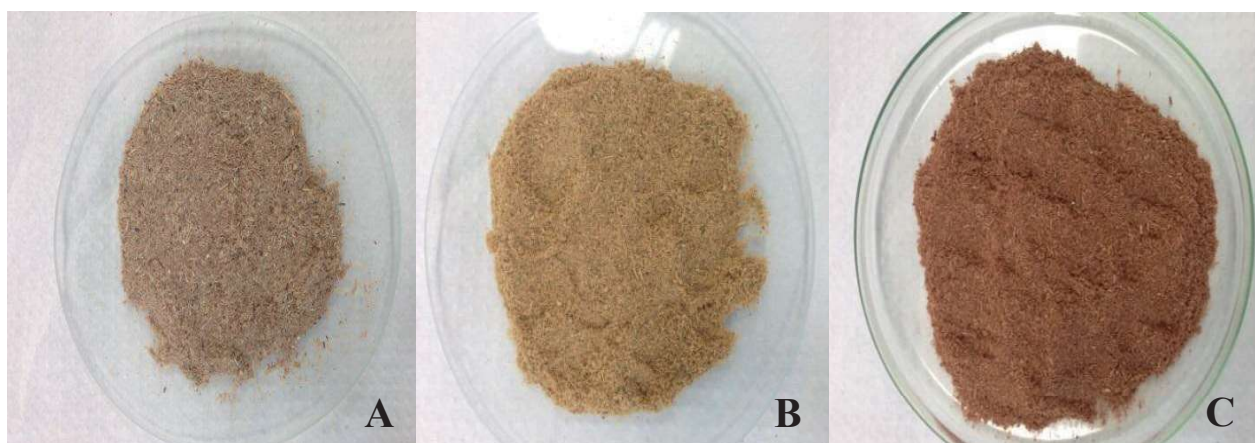
Contudo, a produção de açúcar no caldo em sorgo sacarino não é simples, sendo influenciada pelo genótipo, pelos ambientes e pela interação genótipos x ambientes (Murray et al., 2009). Adicionalmente, o controle genético é realizado por genes de ação aditiva e dominante (Murray et al., 2008a, 2008b). Alguns QTLs relacionados à produção de açúcar em sorgo têm sido identificados (Murray et al., 2008b, 2009; Ritter et al., 2008). E alguns autores já comprovaram a presença de heterose para produção de biomassa, produção de açúcar e concentração de açúcar no caldo (Pfeiffer et al., 2010; Durães et al., 2021). Isto mostra que o desenvolvimento de híbridos de sorgo sacarino é uma estratégia viável para os programas de melhoramento genético. Contudo, vale destacar que ambas as linhagens parentais do híbrido, linhagem A/B e linhagem R, devem apresentar alta concentração de açúcar no caldo para que o híbrido apresente alta produção de açúcares por hectare (Ribeiro et al., 2020).

O programa de melhoramento de sorgo da Embrapa estabeleceu as metas mínimas de produtividade e qualidade do sorgo sacarino para obter rentabilidade com a cultura. Sendo uma produtividade mínima de biomassa de 50 t.ha⁻¹, extração mínima de açúcar total de 80 kg t⁻¹ de biomassa (considerando a eficiência de extração de 90-95%), conteúdo mínimo de açúcar total no caldo de 12,5%, produção mínima de álcool de 60L t⁻¹ de biomassa e período de utilização industrial (PUI) de no mínimo 30 dias (Schaffert; Parrella, 2012). Neste sentido, as cultivares de sorgo sacarino de ciclo curto (110 a 130 dias) apresentam potencial produtivo superior a 3.000 L/ha e as de ciclo longo (150 a 170 dias) apresentam potencial produtivo superior a 4.000 L/ha. O sorgo sacarino mostra ser uma oportunidade a mais para o setor, visando produção adicional de matéria-prima para as usinas de cana-de-açúcar.

A composição química da biomassa do sorgo é bastante favorável para produção de etanol celulósico e de grande interesse para o setor sucroenergético, por apresentar altos valores de celulose (30-35%) e hemicelulose (25-30%), associados a baixos valores de lignina (4-7%) (Simeone et al., 2018a). Essa variação no teor de lignina permite utilizar a biomassa com maiores teores de lignina para cogeração de energia através da queima em caldeiras das indústrias e usinas de etanol, apresentando alto poder calorífico, aproximadamente 4.000 Kcal.kg⁻¹ de MS em base seca ou 1.800 Kcal.kg⁻¹ com 50% de umidade (Simeone et al., 2018b). E ainda genótipos com baixo valor de lignina podem ser utilizados para produção de etanol de segunda geração, biogás e até mesmo na alimentação animal (Almeida et al., 2019a; Parrella et al., 2018; Molaverdi et al., 2013).

O programa de melhoramento da Embrapa desenvolve híbridos de sorgo biomassa sensíveis ao fotoperíodo com nervura marrom (brown midrib – *bmr6*) para atender a demanda por biomassa de qualidade para produção de etanol de segunda geração, biogás e alimentação animal (Figura 2c), ou seja, com menores teores de lignina. Desta forma, foi introduzido o alelo mutante *bmr6*, através de um programa de retrocruzamento assistido por marcadores moleculares, em um conjunto de linhagens R, A e B, parentais dos melhores híbridos de sorgo biomassa convencionais do programa (Silva et al., 2020). Os híbridos de sorgo biomassa com nervura marrom gerados apresentaram alta produção de massa seca, em torno de 30 t.ha⁻¹, mas com alta eficiência na conversão em etanol celulósico, biogás e digestibilidade da fibra (Parrella et al., 2018).

Simeone et al. (2018a) analisaram a composição química de três genótipos de sorgo biomassa, sendo dois genótipos de sorgo biomassa com nervura marrom (*bmr6*) (201552B001 e 201552B005) e um híbrido biomassa convencional (BRS 716), com nervura branca (Figura 3), com vista ao potencial uso dessa biomassa para produção de etanol celulósico. Os genótipos foram analisados quanto aos teores de fibra detergente neutro (FDN), fibra detergente ácido (FDA), celulose, hemicelulose, lignina (LDA), cinzas, açúcares: xilose e arabinose, razão siringil/guaiacil (S/G). Os resultados mostraram que os dois genótipos de sorgo biomassa com nervura marrom apresentaram valores significativamente inferiores de lignina (4%) e superiores de hemicelulose em comparação ao genótipo normal BRS 716 (7%). Um dos genótipos com nervura marrom (201552B001) apresentou maior razão S/G, característica mais propícia para fontes de biomassa com potencial para uso na obtenção de etanol de segunda geração (Simeone et al., 2018a). Estes resultados confirmam o potencial do sorgo biomassa e sua versatilidade na síntese de bioenergia.



Fotos: Maria Lúcia Ferreira Simeone

Figura 3. Sorgo biomassa tradicional – BRS 716 (A), e sorgo biomassa com o gene de nervura marrom (*bmr6bmr6*), genótipo 201552B001 (B) e 201552B005 (C), mostrando variabilidade genética na coloração.

Almeida et al. (2019b), avaliando o rendimento de etanol celulósico por hectare, compararam cinco híbridos de sorgo biomassa. Dentre os genótipos avaliados, dois híbridos de sorgo biomassa com nervura marrom (*bm6*) foram testados comparativamente a três híbridos de sorgo biomassa normais de nervura branca. Entre os caracteres agrônômicos, constatou-se diferença na produtividade, sendo o híbrido convencional BRS716 o mais produtivo, com produção de massa verde (PMV) de 98,41 t.ha¹ e produção de massa seca (PMS) de 33 t.ha⁻¹. O híbrido de sorgo biomassa de nervura

marrom (2015B002) também apresentou valores considerados altos, com um PMV de 81,03 t.ha⁻¹ (Almeida et al., 2019b). Vale salientar que estes híbridos apresentam alta produtividade de massa fresca e seca com baixos teores lignina na sua composição, o que aumenta a produtividade e eficiência na produção de etanol celulósico.

Em relação à composição lignocelulósica da biomassa *in natura*, os híbridos de nervura marrom *bmr6* se destacaram, apresentando teores de lignina significativamente menores (4,63%) em relação aos híbridos convencionais (7,15%). Verificou-se que os pré-tratamentos na produção do etanol celulósico foram eficientes na remoção de lignina, constatando teores próximo de zero para os genótipos 2015B002 (Figura 4) e 2015B003, que apresentam o gene de nervura marrom (Almeida et al., 2019b).



Figura 4. Aspecto da biomassa de sorgo 201556B002 *in natura* A, após pré-tratamento ácido B e ácido/básico C, durante o processo de produção do etanol celulósico.

A lignina é um composto polifenólico que interfere de maneira negativa no processo de sacarificação, uma vez que dificulta a ação das enzimas ao complexo celulósico. A produção de bioetanol de segunda geração para os híbridos avaliados por Almeida et al. (2019a) variou entre 6.612 e 11.838 litros por hectare, para um ciclo de 180 dias. Os genótipos de nervura marrom apresentaram melhor rendimento de hidrólise, para os dois tipos de sacarificação utilizados, quando comparados aos genótipos normais de nervura branca (Almeida et al., 2019a).

Um dos entraves encontrados para a utilização do sorgo biomassa é o alto custo para transportar a matéria-prima do campo até a indústria/usina. Uma das formas de ampliar o uso do sorgo biomassa para geração de energia é utilizá-lo via os processos de densificação da biomassa para a produção

de *pellets* e briquetes. Esses processos compactam a biomassa, aumentando assim sua densidade, resultando em produtos de tamanho e forma uniforme, facilitando o uso e transporte.

Os *pellets* obtidos a partir de sorgo biomassa BRS 716 (Figura 5) apresentaram as características mínimas exigidas pela norma DIN EN 14961-6 e adequaram-se a todas as especificações da norma europeia de comercialização para *pellets* de produtos não madeireiros (Simeone et al., 2018b). Esses resultados demonstram o grande potencial do sorgo biomassa como uma cultura a ser integrada à cadeia de fornecimento de biomassa para geração de energia (Simeone et al., 2018b; Ferreira et al., 2019).



Foto: Maria Lúcia Ferreira Simeone

Figura 5. *Pellets* de sorgo biomassa BRS 716.

O cultivo do sorgo para a produção de biogás também é uma opção para a obtenção de bioenergia e tem sido utilizado principalmente na Europa central (Wannasek et al., 2017). No Brasil, três diferentes cultivares de sorgo, sendo dois genótipos com nervura marrom (*bmr* – brown-midrib) e um genótipo de nervura branca convencional, foram analisados quanto ao potencial de produção de biogás e metanogênico. Todas as amostras analisadas obtiveram concentração de metano superior a 50%, atingindo a produção de metano de $242 \text{ L}_N \text{ CH}_4 \cdot \text{kgsv}^{-1}$ e de biogás $398,7 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ de biomassa (Tabela 1). Esses valores são bastante expressivos, mostrando-se uma cultura promissora para esta tecnologia, principalmente associados aos altos índices de produtividade de biomassa.

O potencial do sorgo biomassa para a produção de biogás poderá

ser otimizado em função da seleção de materiais e da época de colheita adequada, com vistas a maximizar a produção de biogás.

Tabela 1. Potencial de produção de biogás e metano a partir de diferentes genótipos de sorgo.

Amostra	ST (g/kg)	SV (g/kg)	SF (g/kg)	Produção de biogás (LNbiogás. kg.sv ⁻¹)	Produção de metano (LNCH ₄ . kg.sv ⁻¹)	m ³ de biogás.ton ⁻¹
bmr03	913,9	942,4	57,6	449	237	386,7
bmr18	915,9	936,6	63,4	431	223	369,7
BRS 716	924,4	958,5	41,5	450	242	398,7

ST: sólidos totais, SV: sólidos voláteis e SF: sólidos fixos.

Dessa forma, considerando os altos níveis de produtividade e qualidade da biomassa, bem como aspectos fitotécnicos da cultura como ciclo curto (4-6 meses), semeadura, manejo e colheita mecanizados, os sorgos sacarino e biomassa apresentam-se como culturas promissoras no fornecimento de matéria-prima de qualidade para geração de energia renovável no Brasil e no mundo.

Referências

ALMEIDA, L. G. F.; PARRELLA R, A.; SIMEONE, M. L. F.; RIBEIRO, P. C. O.; BARBOSA, G. M. P.; BRITO, P. L.; COSTA, A. S. V.; SANTOS, A. S. Characterization of cell wall polysaccharides and cellulosic ethanol potential in genotypes of sorghum biomass. **International Journal of Development Research**, v. 9, p. 26810-26820, 2019a.

ALMEIDA, L. G. F.; PARRELLA, R. A.; SIMEONE, M. L. F.; RIBEIRO, P. C. O.; SANTOS, A. S.; COSTA, A. S. V.; GUIMARÃES, A. G.; SCHAFFERT, R. E. Composition and growth of sorghum biomass genotypes for ethanol production. **Biomass & Bioenergy**, v. 122, p. 343-348, 2019b.

BALAT, M.; BALAT, H. Recent trends in global production and utilization of bio-ethanol fuel. **Applied Energy**, v. 86, n. 11, p. 2273-2282, 2009.

CASTRO, F. M. R.; BRUZI, A. T.; NUNES, J. A. R.; PARRELLA, R. A. C.; LOMBARDI, G. M. R.; ALBUQUERQUE, C. J. A.; LOPES, M. Agronomic and energetic potential of biomass sorghum genotypes. **American Journal of Plant Sciences**, v. 6, p. 1862-1873, 2015.

DURÃES, N. N. L.; NUNES, J. A. R.; BRUZI, A. T.; LOMBARDI, G. M. R.; FAGUNDES, T. G.; PARRELLA, N. N. L. D.; SCHAFFERT, R. E.; PARRELLA, R. A. da C. Heterosis for ethanol yield and yield components in sweet sorghum. **Sugar Tech**, v. 23, n. 2, p. 360-368, 2021.

FERNANDES, G.; BRAGA, T. G.; FISCHER, J.; PARRELLA, R. A. C.; RESENDE, M. M. de; CARDOSO, V. L. Evaluation of potential ethanol production and nutrients for four varieties of sweet sorghum during maturation. **Renewable Energy**, v. 71, p. 518-524, 2014.

FERREIRA, I. R.; SANTOS, R.; CASTRO, R.; CARNEIRO, A. C. O.; CASTRO, A. F.; SANTOS, C. P. S.; COSTA, S. E. L.; MAIRINCK, K. Sorghum (*Sorghum bicolor*) pellet production and characterization. **Floresta e Ambiente**, v. 26, n. 3, e20171001, 2019.

KIM, M.; DAY, D. F. Composition of sugar cane, energy cane, and sweet sorghum suitable for ethanol production at Louisiana sugar mills. **Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology**, v. 38, n. 7, p. 803-807, 2011.

MARTINS, A. M.; PARRELLA, R. A. C.; LOPES, A. C.; SCHAFFERT, R. E.; PARRELLA, N. N. L. D.; NEVES, W. S.; SILVA, A. P. C. M. Período de utilização industrial de cultivares de sorgo sacarino visando a produção de etanol. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.16, n. 2, p. 217-231, 2017.

LOMBARDI, G. M. R.; NUNES, J. A. R.; PARRELLA, R. A. C.; TEIXEIRA, D. H. L.; BRUZI, A. T.; DURÃES, N. N. L.; FAGUNDES, T. G. Path analysis of agro-industrial traits in sweet sorghum. **Genetics and Molecular Research**, v. 14, n. 4, p. 16392-16402, 2015.

MOLAVERDI, M.; KARIMI, K.; KHANAHMADI, M.; GOSHADROU, A. Enhanced sweet sorghum stalk to ethanol by fungus *Mucor indicus* using solid state fermentation followed by simultaneous saccharification and fermentation. **Industrial Crops Production**, v. 49, p. 580-585, 2013.

MURRAY, S. C.; ROONEY, W. L.; HAMBLIN, M. T.; MITCHELL, S. E.; KRESOVICH, S. Sweet sorghum genetic diversity and association mapping for brix and height. **The Plant Genome**, v. 2, n. 1, p. 48-62, 2009.

MURRAY, S. C.; ROONEY, W. L.; MITCHELL, S. E.; SHARMA, A.; KLEIN, P. E.; MULLET, J. E.; KRESOVICH, S. Genetic improvement of sorghum as a biofuel feedstock: II. QTL for stem and leaf structural carbohydrates. **Crop Science**, v. 48, n. 6, p. 2180-2193, 2008a.

MURRAY, S. C.; SHARM, A.; ROONEY, W. L.; KLEIN, P. E.; MULLET, J. E.; MITCHELL, S. E.; KRESOVICH, S. Genetic improvement of sorghum as a biofuel feedstock: I. QTL for stem sugar and grain nonstructural carbohydrates. **Crop Science**, v. 48, n. 6, p. 2165-2179, 2008b.

PACHECO, T. F.; MENDES, T. D.; GONÇALVES, S. B.; PARRELLA, R. A. da C.; MACHADO, C. M. M. Avaliação da fermentação de caldo de sorgo sacarino empregando leveduras comerciais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA - COBEQ, 20.; ENCONTRO BRASILEIRO SOBRE O ENSINO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 15., 2014, Florianópolis - SC. [**Anais...**]. Florianópolis: UFSC, 2014.

PARRELLA, R. A. da C.; SCHAFFERT, R. E.; MENEZES, C. B. de; RODRIGUES, J. A. S.; MAGALHÃES, J. V.; DAMASCENO, C. M. B.; SILVA, D. D. da; MENDES, S. M. Improving sorghum cultivation in South America. In: ROONEY, W. (ed.). **Achieving sustainable cultivation of sorghum: sorghum utilization around the world**. Cambridge: Burleigh Dodds Science Publishing, 2018. v. 2, p. 159-192.

PFEIFFER, T. W.; BITZER, M. J.; TOY, J. J.; PEDERSEN, J. F. Heterosis in Sweet sorghum and selection of a new sweet sorghum hybrid for use in syrup production in Appalachia. **Crop Science**, v. 50, n. 5, p. 1788-1794, 2010.

QUINBY, J. R. **Sorghum improvement and the genetics of growth**. Texas: College Station, 1974. 108 p.

RIBEIRO, P. C. O.; MARÇAL, T. S.; OLIVEIRA, I. C. M.; SCHAFFERT, R. E.; CARNEIRO, P. C. S.; OLIVEIRA, A. B.; PARRELLA, R. A. C. Insight into genetic potential of male sterile sweet sorghum A-lines for agroindustrial traits using tester R-lines. **Industrial Crops and Products**, v. 153, p. 112577-112585, 2020.

RITTER, K. B.; JORDAN, D. R.; CHAPMAN, S. C.; GODWIN, I. D.; MACE, E. S.; LYNNE, C. Identification of QTL for sugar-related traits in a sweet 3 grain sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) recombinant inbred population. **Molecular Breeding**, v. 22, p. 367-384, 2008.

ROONEY, W. L.; AYDIN, S. Genetic control of a photoperiod-sensitive response in *Sorghum bicolor* (L.) Moench. **Crop Science**, v. 39, n. 2, p. 397-400, 1999.

ROONEY, W. L.; BLUMENTHAL, J.; BEAN, B.; MULLET, D. J. E. Designing sorghum as a dedicated bioenergy feedstock. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 1, n. 2, p. 147-157, 2007.

SANDESH, K.; UJWAL, P. Trends and perspectives of liquid biofuel: process and industrial viability. **Energy Conversion and Management**, v. 10, 100075, 2021.

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 BRS1GTecnologia Qualidade Embrapa**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2012. 118 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Documentos, 139).

SILVA, M. J. da; DAMASCENO, C. M. B.; GUIMARÃES, C. T.; PINTO, M. de O.; BARROS, B. de A.; CARNEIRO, J. E. de S.; SCHAFFERT, R. E.; PARRELLA, R. A. da C. Introgression of the bmr6 allele in biomass sorghum lines for bioenergy production. **Euphytica**, v. 216, article 95, 2020.

SIMEONE, M. L. F.; OLIVEIRA, P. A. de; CANUTO, K. M.; PARRELLA, R. A. da C.; DAMASCENO, C. M. B.; SCHAFFERT, R. E. Caracterização de genótipos de sorgo biomassa para bioenergia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 22.; ENCONTRO BRASILEIRO SOBRE O ENSINO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 17., 2018, São Paulo. **Anais**. São Paulo: Associação Brasileira de Engenharia Química, 2018a.

SIMEONE, M. L. F.; PARRELLA, R. A. C.; MAY, A.; SCHAFFERT, R. E. Produção e caracterização de pellets de sorgo biomassa. **Brazilian Applied Science Review**, v. 2, n. 2, p. 1682-1695, 2018b.

SOARES, L. H. de B.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. **Mitigação das emissões de gases efeito estufa pelo uso de etanol da cana-de-açúcar produzido no Brasil**. Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 2009. 14 p. (Embrapa Agrobiologia. Circular Técnica, 27).

SOUZA, R. S.; PARRELLA, R. A. C.; SOUZA, V. F.; PARRELLA, N. N. L. D. Maturation curves of sweet sorghum genotypes. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 40, p. 46-56, 2016.

ZHANG, L.-M.; LENG, C. Y.; LUO, H.; WU, X. Y.; LIU, Z. Q.; ZHANG, Y.; ZHANG, H.; XIA, Y.; SHANG, L.; KIU, C.; HAO, D.; ZHOU, Y.; CHU, C.; CAI, H.; JING, H. Sweet sorghum originated through selection of Dry, a plant-specific NAC transcription factor gene. **Plant Cell**, v. 30, p. 2286-2307, 2018.

WANNASEK, L.; ORTNER, M.; AMON, B.; AMON, T. Sorghum, a sustainable feedstock for biogas production? Impact of climate, variety and harvesting time on maturity and biomass yield research paper. **Biomass and Bioenergy**, v. 106, p. 137-145, 2017.