

Maria Antonia Machado Barbosa<sup>1</sup>, Angélica Fátima de Barros<sup>1</sup>, Emily dos Santos Pereira<sup>1</sup>, Rafael Augusto da Costa Parrella<sup>2</sup> e Leonardo Duarte Pimentel<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Engas. Agrônomas, Doutorandas do Programa de Pós-graduação em Fitotecnia da Universidade Federal de Viçosa – UFV; <sup>2</sup>Engo. Agrônomo, DSc em Genética e Melhoramento de Plantas, Pesquisador da Embrapa Milho e Sorgo e <sup>3</sup>Engo. Agrônomo, DSc em Fitotecnia, Prof. Adjunto do Departamento de Agronomia da Universidade Federal de Viçosa – UFV

## 1 - Introdução

O sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] é uma gramínea nativa do continente africano, que vem sendo amplamente difundida para outras partes do mundo. Sua domesticação é datada desde a pré-história (cerca de 3000 a.C.) juntamente com outros cereais, sendo hoje considerado o quinto cereal mais cultivado no mundo, ficando atrás apenas do trigo, arroz, milho e cevada (RIBAS, 2008). No Brasil, sua introdução ocorreu com a finalidade de ser utilizado como sucessão de cultivos de verão, principalmente em substituição ao milho. Porém, nos últimos anos, tem recebido maior atenção, devido a adoção de práticas agrícolas mais modernas e através de programas de melhoramento, visando atingir maiores produtividades (BORÉM *et al.*, 2014).

O mecanismo fotossintético do tipo C4 *per se*, contribui para que o sorgo apresente uma alta capacidade de conversão de energia em biomassa. Associado à isso, o sorgo possui ainda, características particulares que conferem a essa planta, grandes vantagens sobre condições ambientais estressantes, como déficit hídrico, estresse térmico e alta irradiância. Todas essas características, possibilitam o cultivo do sorgo em áreas ou épocas marginais, ou seja, o sorgo pode ser cultivado sob condições de estresse ambiental e com baixa aplicação de tecnologia em locais e períodos que não são ideais para outras culturas (MAY *et al.*, 2013).

O sorgo tem sido utilizado na alimentação humana em diversos países do mundo, sendo cultivado de forma secundária, como fonte de grãos e forragem para a alimentação animal, principalmente durante a entressafra de outras culturas importantes, como a soja e o milho, por exemplo. Entretanto, sua alta versatilidade, tem levado à uma exploração além de usos tradicionais, com um potencial imediato para produção de bioenergia. Entre os diferentes morfotipos de sorgo, três tem

recebido especial atenção no setor bioenergético: biomassa, sacarino e granífero. O uso destes, tem sido possível graças à eficiente capacidade de conversão de seus componentes de biomassa em açúcares fermentáveis, e ainda, como fonte lignocelulósica para geração de eletricidade (ROONEY, 2014; MATHUR *et al.*, 2017). A produção de bioenergia a partir de sua biomassa pode ser feita seguindo quatro plataformas básicas: combustão direta para produção de energia térmica (vapor) e elétrica (cogeração); hidrólise química ou enzimática da fibra (celulose e hemicelulose) para produção de combustíveis líquidos; gaseificação para produção de gás de síntese ou geração de biogás; e por pirólise para produção de bio-óleo ou carvão/coque (CASTRO, 2014).

Uma vez que o uso de combustíveis fósseis tem sido amplamente associado à eventos de mudanças climáticas, devido à emissão de gases de efeito estufa (GEEs), seu uso tem se tornado cada vez mais restrito dentro do contexto de preservação ambiental, aumentando a demanda por fontes de energia alternativas que sejam renováveis e ecologicamente corretas. Nesse cenário, a descoberta da potencialidade do sorgo como uma cultura energética, tem sido fundamental, representando uma fonte de matéria-prima de baixo custo, maior rusticidade e baixo impacto ambiental. Assim, são necessárias informações mais específicas sobre a composição de sua biomassa, bem como as possíveis formas de uso que levam a produção de bioenergia. Nesse capítulo, abordaremos de forma geral e objetiva, as potencialidades do sorgo biomassa, sacarino e granífero, como matéria-prima para obtenção de bioenergia, principalmente na produção de biocombustível e termoenergia.

## **2 – Sorgo Biomassa**

### **2.1 – Características gerais**

O sorgo biomassa, também conhecido como sorgo energia, tem recebido destaque nos últimos anos como matéria-prima para cogeração de energia, devido à sua alta arquitetura (podendo atingir até 6 m de altura) e características peculiares para um grande acúmulo de biomassa. É considerada uma planta alternativa ao fornecimento de matéria-prima para queima direta na geração de vapor, com possibilidade de ser utilizada na entressafra da cana-de-açúcar, (quando há uma escassez de bagaço), e ainda, em substituição ao uso da lenha de eucalipto nos processos de queima para a geração de termoenergia (CASTRO, 2014). Além disso, possui alta capacidade de gerar energia por combustão da biomassa seca (cerca de 4000 Kcal kg<sup>-1</sup> em base seca), a baixo custo, torna-o uma espécie anual competitiva em comparação com outras espécies já estabelecidas (PIMENTEL *et al.*, 2017).

Este sorgo é uma planta sensível ao fotoperíodo, ou seja, o seu florescimento é induzido quando os dias se tornam menor que 12 horas e vinte

minutos (ROONEY; AYDIN, 1999). Esse tipo de característica é importante, pois permite que a planta desenvolva seu máximo potencial de acúmulo de biomassa quando cultivada na época de dias longos (Primavera/Verão) (ROONEY, 2014; MEKI *et al.*, 2017). Do ponto de vista econômico, maiores ganhos de biomassa sempre serão desejáveis no cultivo desse sorgo, logo, o manejo deve ser feito de tal forma que, as plantas continuem a crescer vegetativamente por períodos mais longos antes da colheita. Vale destacar ainda que, a sensibilidade do sorgo biomassa ao fotoperíodo, depende não somente da época de cultivo, mas também do tipo de material genético e do local de plantio (MEKI *et al.*, 2017).

O teor de umidade da biomassa ou teor de matéria seca no momento da colheita é outra característica importante para este tipo de sorgo. O sorgo biomassa possui o gene Dry (ZHANG *et al.*, 2018), com os alelos dominantes ( $D_{-}$ ), que controlam o colmo seco (Pithy), apresentando baixos teores de umidade na biomassa na maturidade fisiológica, chegando a 50% com o teor fibra superior a 25%, sendo de grande interesse para o setor sucroenergético. Morfologicamente, é uma planta que apresenta colmos grandes e fibrosos, intensa área foliar e panículas com boa produção de grãos (Figura 1). Com um ciclo de vida relativamente pequeno (150 a 180 dias), requer atenção especial na fase de estabelecimento. Porém, quando comparado à outras culturas energéticas, possui vantagens quanto à utilização na quantidade de insumos, fertilizantes e irrigação, além de boa adaptabilidade a diferentes condições climáticas (CAPECCHI *et al.*, 2017). Apesar do sorgo biomassa ser caracterizada como uma planta responsiva ao suprimento de água (ROCATELI *et al.*, 2012), sua rusticidade às condições de déficit hídrico, permite o seu cultivo em regiões onde o cultivo da cana-de-açúcar é limitado, garantindo o suprimento de biomassa para produção de energia (PRAKASHAM *et al.*, 2015).



Figura 1 - Arquitetura do sorgo biomassa: porte elevado, colmos grandes e fibrosos e baixa produção de grãos. Foto: Leonardo D. Pimentel.

A cultura é propagada por sementes e tem sido recomendadas populações de 100.000 a 120.000 plantas  $\text{ha}^{-1}$ , dependendo das condições edafoclimáticas e considerando que há elevado perfilhamento. O espaçamento adotado usualmente é de 0,70 m entre fileiras para facilitar o tráfego dos implementos. Para que o sorgo biomassa expresse seu potencial produtivo, além de um bom preparo do solo e adubação de plantio, é necessário o controle de plantas daninhas, principalmente nos estádios iniciais. A adubação de cobertura deve ser feita quando as plantas apresentarem de 4 a 6 folhas ou 30 a 40 cm de altura. A colheita pode ser feita tanto no sentido da linha como no sentido transversal, porque o sistema de corte da plataforma é aberto, permitindo a entrada de plantas sem derrubá-las lateralmente, e com cilindros de corte horizontais.

Quando adotado todos os parâmetros ideais de produção, e dependendo da cultivar utilizada, o rendimento do sorgo biomassa pode atingir mais de 100 t  $\text{ha}^{-1}$  de massa fresca e 40 t  $\text{ha}^{-1}$  de massa seca em apenas seis meses (BATISTA *et al.*, 2017). No Brasil, a época mais propícia para o seu cultivo, é durante os meses de outubro a dezembro, quando o fotoperíodo é maior que 12 horas e 20 minutos, ao qual amplia seu ciclo vegetativo em detrimento ao reprodutivo, garantindo um maior acúmulo de biomassa (MAY *et al.*, 2013). Adicionalmente, locais com predominância de temperaturas médias em torno de 33 a 34°C são as mais recomendadas (BORÉM *et al.*, 2014).

## 2.2 – Composição

O sorgo biomassa possui propriedades lignocelulósicas ideais que lhe confere alta capacidade para a queima (geração de eletricidade), devido sua composição ser em maior parte de carboidratos estruturais, embora apresente uma pequena quantidade de carboidratos não-estruturais (ROONEY, 2014). As características químicas de sua biomassa, como poder calorífico, teor de cinzas e carbono, entre outros, se assemelham à de outras gramíneas que também são utilizadas para produção de energia (MAY *et al.*, 2013).

Os carboidratos estruturais, como celulose, hemicelulose e lignina, possuem função estrutural na célula vegetal, e dependendo da sua proporção, podem conferir alto poder de combustão ao material vegetal. Assim, o potencial energético da biomassa é medido através do seu poder calorífico, que por sua vez, diz respeito a quantidade de energia que é liberada pelo material em processo de combustão. O sorgo biomassa possui um poder calorífico de cerca de 4000 Kcal  $\text{kg}^{-1}$ , ou seja, apresenta-se como um bom insumo energético. Essa característica está associada a maior proporção de celulose, hemicelulose e lignina, em comparação com açúcares solúveis e cinzas.

Esses carboidratos estruturais, estão presentes em quantidades equivalentes tanto nas folhas quanto no colmo, e em contrapartida, a produção

de açúcares solúveis e cinzas ocorre de maneira diferenciada entre caules e folhas (TANG *et al.*, 2018). Mas de maneira geral, cultivares de sorgo biomassa têm demonstrado valores percentuais de lignina na ordem de 5 a 10%, porcentagem de hemicelulose de 15 a 25% e porcentagem de celulose de 35 a 45% (MAY *et al.*, 2013). Em adição, as proporções de carboidratos estruturais nas diferentes partes da planta, podem variar entre as diferentes cultivares. Na Tabela 1 pode-se observar as diferentes proporções na composição de duas cultivares de sorgo biomassa (cultivares BD 7607 e BRS 716). De maneira geral, as folhas e os colmos são os que apresentam a maior proporção de carboidratos estruturais. Para as duas cultivares em questão, foi encontrado alto teor de lignina nos colmos, sendo portanto, indicado para a geração de biocombustíveis sólidos, ou seja, queima direta para a geração de vapor/energia (PIMENTEL *et al.*, 2017).

Tabela 1 - Médias do teor de hemicelulose, celulose, lignina e cinzas das diferentes partes da planta de duas cultivares de sorgo biomassa

Cultivar	Parte	----- (%)-----				
		Hemicelulose	Celulose	Lignina	Cinzas	Extrativos
BD 7607	Panícula	28,59 b	8,38 b	6,22 b	1,98 b	54,83
	Folha	34,45 a	23,36 a	5,60 b	5,51 a	31,08
	Colmo	28,68 b	29,14 a	8,48 a	3,88 a	29,82
	Média	30,57	20,44	6,7	3,79	-
BRS 716	Panícula	46,16 a	18,54 b	7,60 ab	6,71 a	20,99
	Folha	35,08 b	27,09 a	5,43 b	7,10 a	25,3
	Colmo	28,86 b	29,14 a	10,21 a	5,67 a	26,12
	Média	35,65	22,10	7,91	6,50	-

Fonte: Pimentel *et al.* (2017)

O colmo é a parte que apresenta maior teor de umidade, fato este, que está associado a maior quantidade de carboidratos não-estruturais, em comparação com outras partes da planta, como folha, por exemplo (PIMENTEL *et al.*, 2017). Entretanto, essa umidade pode variar conforme o genótipo e a época de colheita. Maior teor de umidade encontrado na biomassa, indica que este material precisa de prévia secagem antes do processo de combustão, para que haja liberação de energia suficiente ao processo de queima. Desta forma, a umidade é um fator limitante na escolha do combustível (biomassa), não sendo permitido valores acima de 50%, pois acima deste ponto é liberada energia insuficiente para a combustão e consequentemente para a produção de calor (VIEIRA, 2012).

Há uma alta correlação entre altos teores de lignina e baixo teor de umidade, que resulta em um material com alto poder calorífico. A lignina possui uma estrutura bem mais complexa em comparação com a celulose e a hemicelulose, além disso, sua estrutura pode influenciar a degradação térmica da biomassa, elevando o seu

poder calorífico superior. Desta forma, a maior quantidade de lignina presente nos colmos do sorgo biomassa, em comparação com folha e panícula, confirma que o colmo, tem maior potencial para à geração de bioeletricidade e calor através da queima direta (PIMENTEL *et al.*, 2017). Além de estar relacionado ao poder calorífico, o elevado teor de lignina no sorgo biomassa é desejado para conferir maior resistência ao acamamento. Este acamamento é um dos principais problemas da cultura no campo. Devido ao porte elevado e ao peso das panículas, a planta fica muito susceptível ao tombamento ocasionado por ventos.

Apesar do sorgo biomassa ter um alto potencial de produção de biomassa, sua diferença na composição estrutural e química, especificamente celulose e hemicelulose (NEUMANN *et al.*, 2002), pode induzir sua indicação para diferentes fins. Assim os programas de melhoramento de sorgo biomassa tem duas vertentes: i) seleção de matérias com elevada produção de biomassa e teor de lignina, dado ao seu bom desempenho nos processos de combustão (MAY *et al.*, 2013); e ii) produção de biomassa com menor teor de lignina, para atender a indústria de agrocombustíveis. Apesar de objetivos distintos, ambos os programas no momento de selecionar híbridos, buscam materiais sensíveis ao fotoperíodo e alta produtividade de matéria seca, por meio de características: florescimento, porte, ciclo, resistência a acamamento e características lignocelulósicas (RODRIGUES, 2010).

### 2.3 – Produção de bioenergia

O sorgo biomassa é considerado como boa opção de matéria-prima para produção de bioenergia, devido a sua versatilidade como fonte de amido, açucares fermentescíveis e lignocelulose. Sua biomassa lignocelulósica possibilita ser utilizado em processos de combustão (lignina) como matéria calorífica para abastecer as caldeiras das usinas termoeletricas e conseqüentemente, produzir eletricidade, assim como, na produção de etanol celulósico (etanol de segunda geração) a partir da celulose e hemicelulose (Figura 2).

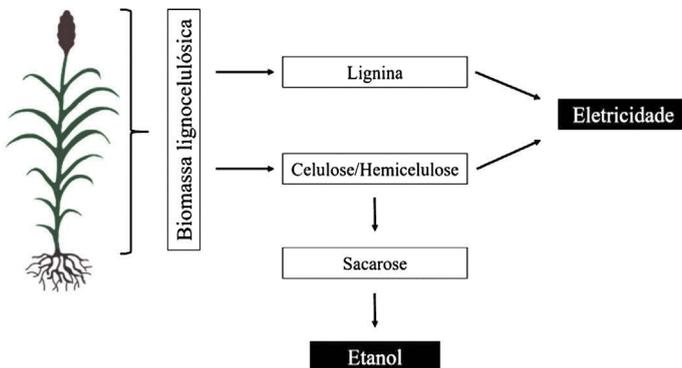


Figura 2 - Ilustração sobre a composição da biomassa lignocelulósica do sorgo biomassa e suas formas de uso

Um bom parâmetro para avaliar a potencialidade energética de combustíveis de biomassa é através do poder calorífico, ao qual corresponde a quantidade de energia liberada na combustão completa de uma unidade de massa do material combustível (PROTÁSIO *et al.*, 2011). O poder calorífico é chamado de superior (PCS) quando a quantidade de calor liberada na combustão de uma unidade de massa de combustível considera a água de formação e água da umidade do combustível no estado líquido. Já poder calorífico inferior (PCI) corresponde a quantidade de calor liberada sem considerar a evaporação de água de formação do combustível mais a quantidade de água da umidade do combustível. Um estudo realizado por Batista *et al.* (2018), demonstrou que o potencial energético do sorgo biomassa, depende da cultivar utilizada, cujo o PCS pode variar de 4220 a 4590 kcal kg<sup>-1</sup>. Segundo esses mesmos autores, as cultivares em estudo apresentaram em média, 18 GJ de energia por tonelada de matéria seca (GJ t<sup>-1</sup>) da biomassa seca total. Esses resultados são próximos aos encontrados para o bagaço de cana-de-açúcar, que apresenta valores médios de 18,16 GJ t<sup>-1</sup> (LIZCANO, 2015).

Além da cana-de-açúcar, estudos tem demonstrado que o sorgo biomassa apresenta um poder calorífico com valores próximos às outras culturas energéticas, conforme demonstrado na Tabela 2 (MARAFFON *et al.*, 2018). Logo, esta fonte de energia pode atender às demandas pontuais do mercado, principalmente em período de entressafra.

Tabela 2 - Poder Calorífico Superior (PCS), Poder Calorífico Inferior (PCI) e teor de cinzas de materiais utilizados como fonte de energia térmica

Material	PCS (Kcal Kg <sup>-1</sup> )	PCI (Kcal Kg <sup>-1</sup> )	Cinzas (%)
Sorgo Biomassa	4129	3807	8,13
Capim-elefante	4315	3996	4,72
Cana energia	4378	4048	3,98
Palha de cana	4460	4123	3,20
Eucalipto (5 anos)	4601	4288	0,47
Eucalipto (3 anos)	4586	4263	0,59

Fonte: Marafon *et al.* (2018)

Além do poder calorífico do sorgo biomassa, o conteúdo celulósico presente principalmente no colmo, lhe confere um papel significativo na produção de etanol celulósico (etanol de segunda geração). A produção de biocombustíveis de segunda geração a partir do sorgo biomassa leva em consideração o teor e a composição da lignina, índice de cristalinidade e porosidade da celulose. A conversão da biomassa lignocelulósica em etanol é realizada por meio de processo que envolve um pré-tratamento seguido de tratamento enzimático para liberar os açúcares estruturais a serem utilizados na fermentação. A eficiência deste processo de conversão é dependente de inúmeros fatores intrínsecos à biomassa que a deixa mais ou menos recalcitrante às enzimas e aos microrganismos fermentadores (MAY *et al.*, 2013).

Vale salientar, que a lignina é um composto da parede celular que interfere negativamente tanto com o processo de obtenção do etanol de segunda geração, quanto com a digestibilidade da forragem por ruminantes. Assim, a redução nos teores de lignina nesses genótipos de sorgo permitiria uma maior eficiência na produção de etanol a partir da biomassa, aumentando-se o número de litros de álcool por peso de massa seca a um menor custo (JORDAN *et al.*, 2012). Além disso, a menor quantidade de lignina facilita a digestibilidade da forragem, levando a um maior ganho nutricional para os animais que se alimentam dela, e conseqüentemente maior ganho de peso.

O gene *Bmr* codifica para a enzima cinamil álcool desidrogenase (CAD), que atua na via de síntese da lignina em sorgo (SABALLOS *et al.*, 2009; SATTler *et al.*, 2009). Os mutantes *bmr*, são denominados de *brown midrib*, por causa da formação de tecido vascular marrom-vermelhado nas folhas e nos colmos, que está ligado a modificações da lignificação dos tecidos, podendo chegar a uma redução de 50% da lignina em comparação com linhagens com o respectivo gene *Bmr*. Assim, a redução do conteúdo de lignina tem apresentado um impacto positivo na eficiência de conversão da biomassa de sorgo *bmr* em açúcares simples, o que tornaria o processo de produção de etanol de segunda geração mais eficiente e economicamente mais competitivo.

Adicionalmente, a introdução do gene *bmr6* em linhagens de sorgo forrageiro permitirá a produção de uma silagem de maior digestibilidade para o gado, aumentando a produção de carne e de leite.

Almeida *et al.* (2019) avaliaram a composição de híbridos de sorgo biomassa convencional e com nervura marrom, bem como rendimento de etanol de segunda geração destes genótipos. Verificaram menor teor de lignina na biomassa dos genótipos com nervura marrom (aprox.5%) comparado com os convencionais (aprox.7%) e maior eficiência no rendimento de etanol celulósico, produzindo 0,51L de etanol por kg de matéria seca nos genótipos de nervura marrom contra 0,35L de etanol por kg de matéria seca nos genótipos convencionais (ALMEIDA, 2019).

Considerando os sistemas agroindustriais para produção de energia, o sorgo biomassa teria como vantagens: a) elevada produtividade de biomassa por unidade de área; b) possibilidade de uso da rebrota; c) propagação semínifera.

Como desvantagens, o principal fator limitante seria a sazonalidade de produção quando se cultiva o sorgo como cultura anual (cerca de 150 dias/ciclo). Assim, mesmo produzindo duas safras/ano, tem-se colheita concentrada em determinadas épocas do ano, o que é ruim para os empreendimentos agroindustriais devido a oferta sazonal de matéria-prima na indústria. Isso faz com que o sorgo seja cultivado como cultura complementar a outras cadeias agroindustriais, como a da cana-de-açúcar por exemplo.

### 3 – *Sorgo sacarino*

#### 3.1 – Características gerais

O sorgo sacarino é uma opção a diversificação e aumento da oferta de matéria-prima para etanol, principalmente por viabilizar a sua produção na entressafra da cana-de-açúcar, diminuindo a ociosidade das indústrias no setor sucroenergético (SANTOS *et al.*, 2015). Quanto às características morfológicas, é uma planta que cresce até 4 m de altura, com grande acúmulo de açúcares solúveis em seus colmos (até 78% do total de sua biomassa) (MATHUR *et al.*, 2017). O sorgo sacarino, diferentemente da biomassa, é rico em caldo nos colmos devido possuir os alelos recessivos (*dd*) do gene *dry*. E ainda, apresenta um sistema radicular fibroso, denso e profundo, com formação de raízes adventícias nos nós acima do solo. A espessura do caule pode ser altamente variável, conforme a genética do material, região de cultivo, manejo e condições ambientais (ROONEY, 2014). Embora apresente um baixo rendimento de sementes, o sorgo sacarino tem capacidade de produzir rendimentos de biomassa significativamente maiores em comparação com o sorgo granífero (Figura 3).



Figura 3 - Características morfológicas do sorgo sacarino: cresce até 4 m de altura. Grande acúmulo de açúcares solúveis em seus colmos e boa produção de grãos. Foto: Leonardo D. Pimentel.

O sorgo sacarino maduro consiste de cerca de 75% de colmo, 10% de folhas, 10% de raízes e 5% de sementes em peso. Características como, dias para o florescimento, altura da planta e diâmetro do colmo, foram indicadas como os principais traços que apresentam efeito indireto sobre a produção de etanol. Já a produção de biomassa tem efeito direto na produção de etanol, indicando que, essas características devem ser consideradas durante um programa de seleção de genótipos de sorgo sacarino.

Uma característica importante é o período de utilização industrial (PUI), que compreende o período que a cultivar estará apta para colheita no campo, mantendo os padrões mínimos de produtividade e qualidade da matéria prima, que reflitam em rendimento de etanol viável economicamente (SCHAFFERT; PARRELLA, 2012).

O PUI é necessário para o planejamento de colheita e processamento da matéria prima, devendo ser o maior possível e mínimo de 30 dias, uma vez que a possibilidade de atrasos na colheita é comum por parte da usina devido a fatores operacionais (manutenção da usina) ou fatores climáticos (chuvas). Desta forma, cultivares com PUI inferior a 10 dias apresentam grande risco para o setor sucroalcooleiro, pois este curto período associado aos frequentes atrasos na colheita por parte da usina, resultam em produtividades abaixo da viabilidade econômica.

Características agrônômicas como ciclo de vida curto de cerca de 4 meses, capacidade de crescer sob condições ambientais adversas, baixo custo de cultivo e sistema fotossintético C4 são especialmente úteis para sua adoção como matéria-prima de biocombustível (MATHUR *et al.*, 2017). Adicionalmente, variedades de sorgo sacarino são mais altas, têm maior superfície de área foliar, possuem uma melhor capacidade de interceptação de luz e alta eficiência de uso de radiação em comparação com sorgo granífero e sorgo energia. Outra característica importante e exclusiva do sorgo sacarino, em comparação com outros tipos de sorgo, é a duração da produção ótima de açúcar, que geralmente ocorre antes da maturação fisiológica e é mantida por um maior período de tempo (KARLEN, 2014).

O plantio do sorgo sacarino é recomendado nos meses de outubro a dezembro, que corresponde ao período chuvoso no centro sul do Brasil. Uma população de 120.000 a 130.000 plantas ha<sup>-1</sup> é indicada para cultivares com baixo grau de perfilhamento, enquanto que 110.000 plantas ha<sup>-1</sup> é recomendada para cultivadas que perfilham mais (BORÉM *et al.*, 2014). Os espaçamentos adotados variam entre a cultivar e o local de cultivo. Em estudos realizados no Mato Grosso, a cultivar BRS 506 produziu aproximadamente 65 t ha<sup>-1</sup> de colmos no espaçamento de 0,5 m entrelinhas e, a população de 80.000 plantas ha<sup>-1</sup> foi considerada a mais adequada (SILVA *et al.*, 2016).

Quanto à adubação no plantio sobre a palha da cana-de-açúcar, é necessário aplicar entre 30 e 40 kg ha<sup>-1</sup> de nitrogênio na semeadura (MAY *et al.*, 2018). A adubação de cobertura supre a alta demanda de nitrogênio e potássio antes da fase reprodutiva e é feita no estágio de quatro folhas completamente desenvolvidas. A colheita ocorre geralmente nos meses de fevereiro a abril, quando as usinas de cana estão ociosas por causa da entressafra e, portanto, o sorgo sacarino pode ser moído e processado utilizando a mesma estrutura da usina (DURÃES *et al.*, 2012).

### 3.2 – Composição

Entre os materiais que são usados na produção de bioenergia, o ponto de maior interesse é a produção de carboidratos, tanto não estruturais (açúcar e amido) quanto os estruturais (celulose, hemicelulose e lignina) (ISIKGOR; BECER, 2015). O sorgo sacarino tem como componente de maior interesse, os carboidratos não estruturais, sendo que, grande parte do conteúdo de carboidratos do suco do colmo é a sacarose e/ou glicose.

Numa abordagem geral, a casca e o mesocarpo do sorgo sacarino são bastante heterogêneos quanto à sua composição química (Tabela 3). Como observado, o mesocarpo do sorgo sacarino é rico em carboidratos não-estruturais (71%), tais como, sacarose (principalmente) e glicose. Já a casca é rica em carboidratos estruturais (45,5%), além de uma boa fração de sacarose (32,2%) (BILLA *et al.*, 1997). Tais características confere ao sorgo sacarino, ser uma boa fonte para produção de etanol, devido seus baixos teores de lignina e grande quantidade de açúcares solúveis. Em se tratando de produção de etanol, variedades que apresentam reduzido conteúdo de lignina na parede celular são preferenciais.

Em comparação com a cana energia, o caldo do sorgo sacarino contém 11,8% de açúcares, consistindo em sacarose, glicose e frutose, que podem ser prontamente convertidos em etanol, enquanto que a cana possui 9,8% (Tabela 4).

Tabela 3 - Composição química da medula e casca do colmo de sorgo sacarino. Os resultados são expressados como porcentagem (%) de massa seca

Componentes	Medula	Casca
Celulose	8,7	19,2
Hemicelulose	6,3	17,5
Lignina	0,6	8,8
Sacarose	67,4	32,2
Glicose	3,7	2,4
Cinzas	0,2	0,5

Fonte: Billa *et al.* (1997)

Tabela 4 - Composição do suco e fibra do sorgo sacarino em comparação com a cana energia

Componentes	Sorgo sacarino	Cana energia
Suco	71,9	53,6
Sacarose (% suco)	7,6	9,6
Glicose (% suco)	2,6	0,1
Frutose (% suco)	1,6	0,1
Açúcares totais (% suco)	11,8	9,8
Fibras (% massa seca)	13,0	26,7
Celulose (% massa seca)	44,6	43,3
Hemicelulose (% massa seca)	27,1	23,8
Lignina (% massa seca)	20,7	21,7
Cinzas	0,4	0,8

Fonte: Kim; Day (2011)

Assim, o sorgo sacarino produz mais etanol a partir do caldo, do que a cana energia (KIM; DAY, 2011). Alguns outros açúcares como arabinose, galactose, manose e xilose também são presentes na composição do caldo do sorgo sacarino (BILLA *et al.*, 1997; DAR *et al.*, 2008). Segundo Teixeira *et al.* (2017), o ponto ideal de colheita é após o florescimento, quando os grãos da panícula apresentam o estágio de grão leitoso, que é o momento em que se tem os melhores rendimentos indústrias.

Ainda segundo esses autores, a amostragem do Brix do caldo deve ser feita nos primeiros 2 ou 3 internódios da base do colmo, pois é nesta posição que se tem melhor representatividade do Brix obtido pela extração da planta inteira. Essa informação é muito importante na tomada de decisão para colheita, pois é muito comum se amostrar o meio do colmo, que tem maior Brix, porém, esse valor não representa o Brix da planta inteira.

### 3.3 - Produção de bioenergia

O principal componente do sorgo sacarino para a produção de bioenergia, concentra-se em seus colmos suculentos, onde açúcares acumulados na forma de suco, podem ser facilmente extraídos e fermentados para produção de etanol. O processamento industrial do sorgo sacarino é semelhante ao da cana-de-açúcar para a produção de etanol, podendo utilizar a mesma estrutura e processo empregado. As etapas constitui primariamente do pré-tratamento do sorgo, para facilitar a extração do caldo, que posteriormente, passará por aquecimento, decantação e filtração (FERREIRA, 2015).

Além dos açúcares do colmo, coprodutos na forma de bagaço, vinhaça, vapor e espuma, também são utilizados como matéria-prima para diversas finalidades. Uma visão geral da planta e dos vários produtos que podem ser derivados do sorgo sacarino são mostrados na Figura 4.

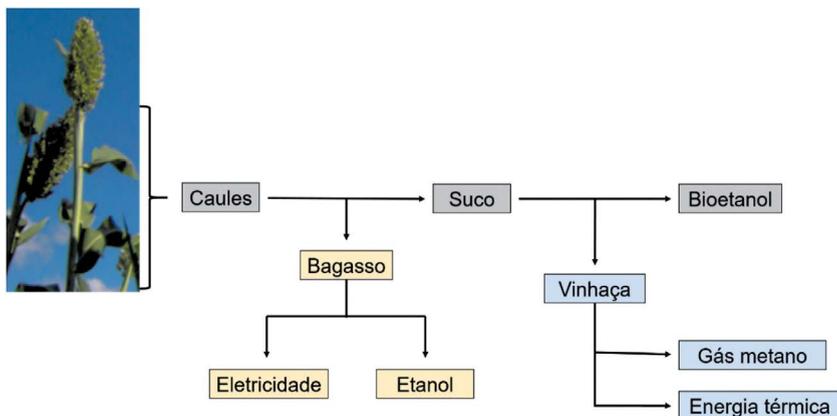


Figura 4 - As várias formas de uso do caule do sorgo sacarino para produção de bioenergia. Modificado a partir de Mathuret al. (2017)

Após a extração do suco, o material restante fibroso, conhecido como bagaço, serve como matéria-prima para geração de eletricidade. A biomassa lignocelulósica na forma de bagaço também pode ser usada para produção de etanol e plásticos biodegradáveis. O destilado líquido obtido após a extração de etanol do suco do sorgo sacarino, chamado de vinhaça, é um subproduto da produção de etanol.

Outros usos da vinhaça são na digestão anaeróbica para produzir gás metano para combustão na produção de energia térmica. A partir do sorgo sacarino, pode ser produzido ainda, o biogás, que é um combustível limpo e favorável ao meio ambiente por causa do menor derramamento de poluentes precários (APPELS *et al.*, 2011).

O sorgo sacarino pode render mais de 60 a 70 litros de etanol por tonelada processada de acordo a época de colheita, enquanto a cana-de-açúcar produz, em média, 85 litros por tonelada. Embora, a produção anual de etanol de sorgo sacarino depende de vários fatores, incluindo o potencial genético das cultivares, época do ano, qualidade do solo e outras condições ambientais, estima-se que a cultura de sorgo sacarino produza 8000 L ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> de etanol (MATHUR *et al.*, 2017).

## 4 - Sorgo granífero

### 4.1 - Características gerais

O sorgo granífero que por muito tempo foi utilizado apenas na cadeia alimentícia, hoje representa grande potencial no setor bioenergético, devido seu grão possuir características semelhante ao milho e possibilitar a produção de etanol a partir de fonte amilácea (ROONEY, 2014). É uma planta que apresenta importantes vantagens agrônomicas, como capacidade de crescer em uma ampla gama de tipos de climas e solo, maior eficiência no uso da água e tolerante à seca. Além disso, o cultivo do sorgo é considerado menos oneroso, quando comparado ao milho, devido apresentar menor exigência nutricional e tecnológico, justamente por ser comumente plantada como uma cultura substituta (BORÉM *et al.*, 2014). Entre os demais tipos de sorgo, o granífero é o que tem maior expressão econômica e está entre os cinco cereais mais cultivados do mundo.

Através de avanços em programas de melhoramento genético, em meados da década de 40, foi possível desenvolver e lançar no mercado uma variedade de sorgo destinada a produção de grãos, com porte baixo e insensível ao fotoperíodo, conhecida como sorgo granífero, que contribuiu para que o cultivo da cultura fosse expandido para diversas regiões dos EUA. Em meados da década de 60 com a viabilização dos híbridos, a cultura rompeu a fronteira dos EUA, tornando-se popular em outros países.

Morfológicamente, o sorgo granífero é caracterizado como uma planta de porte pequeno quando comparado com outros tipos de sorgo, característica que facilita a colheita mecanizada (Figura 5 A) (PRAKASHAM *et al.*, 2015). Trata-se de uma planta ereta, com sistema radicular ramificado e profundo, que lhe confere maior resistência à déficit hídrico. Produz uma panícula (cacho) compacta de grãos, que representa o produto de maior interesse econômico (Figura 5 B). Os grãos são relativamente grandes e de cores variadas. Os colmos são suculentos, não doces ou ligeiramente doces, raramente secos (BORÉM *et al.*, 2014).

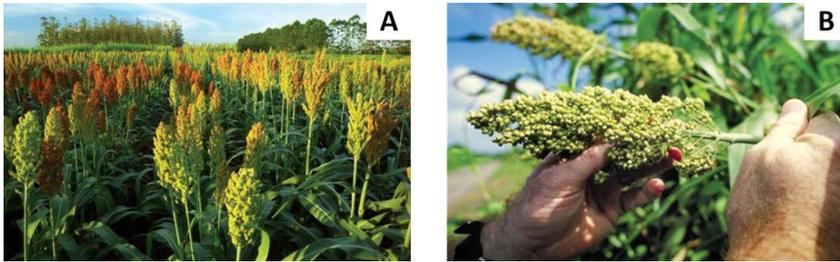


Figura 5 - Sorgho granífero em cultivo comercial no sul de Minas Gerais (5 A). Panícula do sorgo no estágio de maturação fisiológica, com grãos na consistência pastosa (5 B). Foto: Leonardo D. Pimentel.

O principal uso do sorgo granífero consiste na alimentação animal, em substituição parcial ou total ao milho, principalmente durante a entressafra, com uma vantagem comparativa de menor custo de produção e valor de comercialização de 80% do preço do milho. Entretanto, quando destinado a produção de etanol, o sorgo granífero é cultivado principalmente para obtenção do amido, um componente primário do grão, assim como o milho, que também serve de matéria-prima para produção de etanol (MURRAY *et al.*, 2008). Dessa forma, quando se aumenta o rendimento de grãos, aumenta também o rendimento do etanol, devido ao aumento de amido por unidade de área.

Em comparação com os demais morfotipos de sorgo, o granífero permite um plantio mais adensado, com populações finais que variam de 160.000 a 240.000 plantas por hectare, utilizando espaçamentos entre linhas de 0,45m e 0,60 m, dependendo da época do ano e sistema de cultivo (BORÉM *et al.*, 2014). Devido às características da planta de sorgo de tolerância a seca e de maior eficiência na utilização de água para completar seu ciclo, quando comparada à planta de milho, as datas limites para seu plantio são superiores às do milho, fazendo com que o sorgo seja uma melhor opção para o plantio tardio em condição de segunda safra. A partir da maturação fisiológica do grão, a colheita pode ser iniciada, com o grão com alta umidade, em torno de 28%. Entretanto, uma recomendação mais adequada é colher em uma faixa intermediária, entre 18 e 20%, quando o grão está mais maleável, evitando quebra e com menores perdas.

#### 4.2 – Composição

Amido e proteínas são os principais componentes do grão do sorgo, na maioria das cultivares lançadas no mercado (JONES; BECKWITH, 1970; RAMÍREZ *et al.*, 2016) (Tabela 5), entretanto, existe variações quanto ao teor de amido em diferentes genótipos de sorgo granífero, que pode variar entre 64 e 74% do peso seco dos grãos. Além disso, nem todos os amidos de diferentes variedades de sorgo contribuem igualmente para a produção de etanol (WANG *et al.*, 2008).

Tabela 5 - Composição dos grãos do sorgo em % do peso total (massa seca)

Componentes	Cultivares		
	OK612	RS626	TE77
Proteína	11,6	11,5	11,7
Amido	75,9	76,3	75,9
Lípídeo	3,3	3,1	3,4
Fibras	1,9	1,8	---
Cinzas	1,3	1,2	---

Fonte: Jones; Beckwith (1970)

Os teores de amido, proteína, lipídios, taninos e teores de amilose são encontrados em maior quantidade nos grãos de sorgo em comparação com o do milho. O conteúdo lipídico da maioria das variedades de sorgo também são maiores do que do milho. Os amidos dos grãos de sorgo podem ainda, apresentar menor quantidade de amilose do que o amido de milho (AL *et al.*, 2011). Sabendo que, a relação amilose / amilopectina afeta a hidrólise do amido, a resistência a hidrólise é maior quando se tem maior teor de amilose (WU *et al.*, 2006).

Os grãos de sorgo apresentam alto teor de tanino, que tem capacidade de interação com proteínas, incluindo enzimas amilolíticas, via pontes de hidrogênio acopladas a hidrofóbicas interações. Esta associação de taninos com proteínas é reconhecida como tendo efeitos adversos na taxa de conversão do etanol (WANG *et al.*, 2008; RAMÍREZ *et al.*, 2016). Entretanto, interações de tanino de sorgo com proteínas pode ser evitado por etapas de pré-processamento de grãos, como tratamento químico. De qualquer forma, a maioria das cultivares comerciais de sorgo granífero disponíveis no mercado brasileira tem baixa concentração ou são isentas de tanino no grão.

#### 4.3 - Produção de bioenergia

O sorgo granífero na maioria das vezes é utilizado para alimentação animal, mas também, é usado como fonte de amido para a produção de etanol, onde os grãos inteiros são moídos, molhados e depois cozidos para gelatinizar o amido. O amido é então decomposto enzimaticamente em açúcares, que são subsequentemente convertidos em etanol por levedura. Materiais não-amiláceos, como lipídios, proteínas, celulose e outros constituintes secundários da amêndoa, que compõem o grão seco, também são aproveitados como ração animal após o processo de produção do etanol.

A produção de etanol por fonte amilácea a partir dos grãos do sorgo, se assemelha muito a do milho, tecnologia esta, que já se encontra bem estabelecida nas refinarias norte americanas.

Pesquisas recentes tem demonstrado que o grão do sorgo também é uma matéria-prima viável para a produção do etanol, devido sua capacidade de adaptação à infraestrutura das refinarias de milho, associado à viabilidade econômica. Além disso, o rendimento do etanol de sorgo granífero é semelhante ao rendimento do etanol de milho (WANG *et al.*, 2008).

No Brasil, apesar de predominar a produção de etanol a partir da cana-de-açúcar, nos últimos anos iniciaram experiências bem sucedidas de usinas *Flex* (cana e milho). Mais recentemente, grandes empreendimentos de usinas focadas na produção exclusiva de etanol a partir de fonte amilácea (milho e sorgo) vem sendo implantados principalmente no estado do Mato Grosso. Isso porque, a grande oferta de matéria prima (milho e sorgo) associados aos custos elevados logísticos para exportação criam uma situação favorável para compra de matéria prima com preços competitivos.

Além do etanol obtido a partir da fonte amilácea, é produzido também a ração animal de alto valor agregado como coproduto do processo. O WDG (*Wet Distillers Grains* – grãos úmidos de destilaria) e o DDG (*Dried Distillers Grains* - grão seco de destilaria) são coprodutos resultantes da fermentação dos grãos, que passam a ser utilizados na nutrição do gado de corte e leiteiro. Ambos WDG e DDG, são fontes de fibra, proteína bruta, baixo conteúdo de amido e alta concentração de gordura, que torna-os ricos em energia e de fácil digestão para o animal (KLEINSCHMIT *et al.*, 2006).

O WDG apresenta alto teor de umidade (cerca de 70%), que inviabiliza seu uso em confinamentos que estão muito longe das usinas de etanol, além de necessitar de maiores cuidados de armazenamento.

Por outro lado, o DDG (versão seca do coproduto - 10-12% de umidade), tem vida útil longa, assim como os alimentos concentrados comumente utilizados, como milho e farelo de soja.

O processo de produção do DDG consiste da moagem do grão, que segue para a fermentação e destilação, resultando na vinhaça completa. Esta é separada por centrifugação em sólidos grosseiros e vinhaça fina. Os sólidos grosseiros passam por secagem, sendo transformados diretamente em DDG. Diversos estudos têm demonstrado a eficácia da utilização desses coprodutos em substituição ao farelo de soja sem efeitos negativos na alimentação animal. Além disso, os preços de compra, ou incorporados na produção do WDG e DDG são bem mais atrativos em comparação com outras rações tradicionais. Assim, o uso do grão de sorgo para produção de etanol ganha um reforço extra, através do uso dos excedentes para outros fins, agregando mais valor e rentabilidade para a cadeia produtiva do sorgo.

## 5 – Considerações Finais

O sorgo biomassa e o sorgo sacarino são culturas bastante promissoras para compor os sistemas agroindustriais para produção de energia, especialmente se forem implementados em complemento à produção de cana-de-açúcar, reduzindo a ociosidade industrial na entressafra da cana.

As principais vantagens dos sorgos seriam: elevada produtividade de biomassa por unidade de área; possibilidade de uso da rebrota; propagação seminífera. Como desvantagens, o principal fator limitante seria a sazonalidade de produção quando se cultiva o sorgo como cultura anual (150 dias/ciclo). Assim, mesmo produzindo duas safras/ano, tem-se colheita concentrada em determinadas épocas do ano, o que é ruim para os empreendimentos agroindustriais devido a oferta sazonal de matéria-prima na indústria. Porém, se o sorgo for implementado em sinergia com a cana-de-açúcar pode-se aumentar a oferta de energia do setor de forma complementar e não competitiva.

Se considerar sorgo granífero para produção de etanol amiláceo, abre-se uma nova oportunidade para regiões produtoras de grãos no interior do Brasil, que tem sérios problemas logísticos, os quais culminam com perda de competitividade. Neste sentido, a possibilidade de processar os grãos nas regiões produtoras gerando etanol e proteína vegetal (ração animal) agrega valor à cadeia produtiva de grãos, reduz a pressão por armazenamento e logística de transporte, permitindo regulação de preços e maior rentabilidade aos produtores brasileiros. Ainda comparando o sorgo com o milho (principais fontes de etanol amiláceo) tem-se a vantagem de compra do sorgo com valor em média 20% abaixo do preço do milho, resultando em menor custo do etanol produzido.

## Referências

ALMEIDA, L. G. F. de. **Etanol de segunda geração utilizando sorgo biomassa de nervura marrom “brown midrib” BRM (*Sorghum bicolor*)**. 2019. 115 f. Tese de Doutorado - Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, 2019.

ALMEIDA, Luciana Gomes Fonseca de; PARRELLA, Rafael Augusto da Costa; SIMEONE, Maria Lúcia Ferreira; RIBEIRO, Pedro César de Oliveira; SANTOS, Alexandre Soares dos; COSTA, Alexandre Sylvio Vieira da; GUIMARÃES, Amanda Gonçalves; SCHAFFERT, Robert Eugene . Composition and growth of sorghum biomass genotypes for ethanol production. **Biomass & Bioenergy**, v. 122, p. 343-348, 2019.

AL, Y. et al. Starch characterization and ethanol production of sorghum. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 59, p. 7385-7392, 2011.

APPELS, L. et al. Anaerobic digestion in global bio-energy production: potential and research challenges. **Renew Sustain Energy Review**, v.15, p. 4295-4301, 2011.

BATISTA, V. A. P. et al. Agronomic and energetic potential of sorghum evaluated in two consecutive crops. **Journal of Experimental Agriculture International**. v. 22, n. 6, p. 1-9, 2018.

BILLA, E. et al. Structure and composition of sweet sorghum stalk components. **Industrial Crop and Products**, v. 6, p. 297-302. 1997.

BORÉM, A.; PIMENTEL, L.; PARRELLA, R. A. da C. **Sorgo do plantio à colheita**. Viçosa: Ed. UFV, 2014.

CAPECCHI, L. et al. Crop factors influencing ethanol production from sorghum juice and bagasse. **Energies**, v. 10, p. 1-15, 2017.

CASTRO, F. M. R. **Potencial agrônômico e energético de híbridos de sorgo biomassa**. 2014. 80 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2014.

DAR, R. A. et al. Sweet sorghum-a promising alternative feedstock for biofuel production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 4070-4090, 2018.

DURÃES, F. O. M.; MAY, A.; PARRELLA, R. A. da C. **Sistema agroindustrial do sorgo sacarino no Brasil e a participação público-privada: oportunidades, perspectivas e desafios**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2012.

FERREIRA, O. E. **Produção de etanol a partir de sorgo sacarino com tratamento enzimático**. 2015. 98 f. Tese de Doutorado. Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, 2015.

ISIKGOR, F. H.; BECER, C. R. Lignocellulosic biomass: a sustainable platform for the production of bio-based chemicals and polymers. **Polymer Chemistry**, v. 6, p. 4497-4559, 2015.

JONES, R. W.; BECKWITH, A. C. Proximate composition and proteins of threegrain sorghum hybrids and their drymill fractions. **Journal Agricultural and Food Chemistry**, v. 18, p.33-36, 1970.

JORDAN, D. B.; BOWMAN, M. J.; BRAKER, J. D.; DIEN, B. S.; HECTOR, R. E.; LEE, C. C.; MERTENS, J. A.; WAGSCHAL, K. Plant cell walls to ethanol. **Biochem J.**, v. 442, n. 2, p.241-252, 2012.

KARLEN, D. L. **Cellulosic energy cropping systems**. USDA, Agricultural Research Service, National Laboratory for Agriculture and the Environment. USA, 2014.

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 & Biotechnology**, v. 38, p. 803-807, 2011.

KLEINSCHMIT, D. H. et al. Evaluation of various sources of corn dried distillers grains plus solubles for lactating dairy cattle. **Journal of Dairy Science**, v. 89, n. 12, p. 4784 – 4794, 2006.

ZHANG, Li-Min; LENG, Chuan-Yuan; LUO, Hong; WU, Xiao-Yuan; LIU, Zhi-Quan; ZHANG, Yu-Miao; ZHANG, Hong; XIA, Yan; SHANG, Li; LIU, Chun-Ming; HAO, Dong-Yun; ZHOU, Yi-Hua; CHU, Cheng-Cai; CAI, Hong-Wei; JING, Hai-Chun. Sweet Sorghum Originated through Selection of Dry, a Plant-Specific NAC Transcription Factor Gene. **The Plant Cell**, v. 30, p. 2286–2307, oct. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1105/tpc.18.00313>

MARAFON, A. C. et al. Capim-elefante como matéria-prima para a produção de energia térmica. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE BIOMASSA, **Anais...** Curitiba, 2018.

MATHUR, S. et al. Sweet sorghum as biofuel feedstock: recent advances and available resources. **Biotechnology for Biofuels**, v. 146, n. 10, p. 1-19, 2017.

MAY, A.; DA SILVA, D. D.; SANTOS, F. C. dos. **Cultivo do sorgo biomassa para a cogeração de energia elétrica**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo. 2013. 65p. (Documentos 152).

MEKI, M. N. et al. Performance evaluation of biomass sorghum in Hawaii and Texas. **Industrial Crops & Products**, v. 103, p. 257-266, 2017.

MURRAY, S. et al. 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, 2008.

NEUMANN, M. et al. Avaliação do valor nutritivo da planta e da silagem de diferentes híbridos de sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench.). **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 31, n.1, p. 293-301, 2002.

PIMENTEL, L. D. et al. Chemical and bioenergetics characterization of sorghum agronomic groups. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 47, n. 4, p. 424-431, 2017.

PRAKASHAM, R. S. et al. Sorghum biomass: a novel renewable carbon source for industrial bioproducts. **Biofuel**, v. 5, n. 2, p. 159-174, 2015.

PROTASIO, T. P. et al. Relação entre poder calorífico superior e os componentes elementares e minerais da biomassa vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**. v. 31, n. 66, p. 113 – 122, 2011.

RAMÍREZ, M. B. et al. Fuel ethanol production from commercial grain sorghum cultivars with different tannin content. **Journal of Cereal Science**, v. 69, p. 125-131, 2016.

RIBAS, Paulo Motta. **Importância econômica: cultivo do sorgo**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo. 2013. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream>. Acesso em: 13 set. 2020.

ROCATTELI, A. C. et al. Biomass sorghum production and components under different irrigation/tillage systems for the southeastern U.S. **Industrial Crops & Products**, v. 36, p. 589-598, 2012.

RODRIGUES, J. A. S. **Sistema de produção do sorgo**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo. *Sistemas de Produção*. v. 2, 2010.

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.

SABALLOS, A.; VERMERRIS, W.; RIVERA, L.; EJETA, G. Allelic association, chemical characterization and saccharification properties of brown midrib mutants of sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). **Bioenergy Research**. v.1, p.193-204, 2008.

SANTOS, F. G.; CASELA, C. R.; WAQUIL, J. M. Melhoramento de sorgo. In: BORÉM, A. **Melhoramento de espécies cultivadas**. 2. ed. Viçosa: UFV, 2005.

SATTLER, S. E.; SAATHOFF, A.J.; HAAS, E. J.; PALMER, N. A.; FUNNELL-HARRIS, D. L.; SARATH, G. et al. A nonsense mutation in a cinnamyl alcohol dehydrogenase gene is responsible for the sorghum brown midrib 6 phenotype. **Plant Physiol.**, v. 150, n. 2, p.584–595, 2009.

SCHAFFERT, R. E.; PARRELLA, R. A. da C. Planejamento Industrial. In: MAY, A.; DURAES, 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. (Documentos, 139).

SILVA, A. F. et al. **Influência do espaçamento entrelinhas e da população de plantas no desempenho produtivo de sorgo sacarino no meio norte do Mato Grosso**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo. 2016. 16 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 134).

TANG, C. et al. Bioethanol potential of energy sorghum grown on marginal and arable lands. **Frontiers in Plant Science**, v. 9, n. 440, p. 1-11, 2018.

TEIXEIRA, T. P. M. et al. Redefinition of sweet sorghum harvest time: new approach for sampling and decision-making in field. **Industrial Crops & Products**, v. 109, p. 579-586, 2017.

VIEIRA, A. C. **Caracterização da biomassa proveniente de resíduos agrícolas.** 2012. 72 f. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2012.

WANG, D. et al. Grain sorghum is a viable feedstock for ethanol production. **Journal Industrial Microbiology Biotechnology**, v. 35, p. 313-320, 2008.

WU, X. et al. Effects of amylose, corn protein, and corn fiber contents on production of ethanol from starch-rich media. **Cereal Chem.**, v. 83, n. 5, p. 569-575, 2006.

ZHANG, Li-Min; LENG, Chuan-Yuan; LUO, Hong; WU, Xiao-Yuan; LIU, Zhi-Quan; ZHANG, Yu-Miao; ZHANG, Hong; XIA, Yan; SHANG, Li; LIU, Chun-Ming; HAO, Dong-Yun; ZHOU, Yi-Hua; CHU, Cheng-Cai; CAI, Hong-Wei; JING, Hai-Chun. Sweet Sorghum Originated through Selection of *Dry*, a Plant-Specific NAC Transcription Factor Gene. **The Plant Cell**, v. 30, p. 2286–2307, oct. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1105/tpc.18.00313>