

VANESSA APARECIDA PEREIRA BATISTA

**AVALIAÇÃO BIOENERGÉTICA DE SORGOS BIOMASSA, SACARINO E
FORRAGEIRO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, para obtenção do título de Magister Scientiae.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2016

Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa

T

B333a
2016

Batista, Vanessa Aparecida Pereira, 1989-
Avaliação bioenergética de sorgos biomassa, sacarino e
forrageiro / Vanessa Aparecida Pereira Batista. – Viçosa, MG,
2016.

xi, 68f. : il. ; 29 cm.

Orientador: Leonardo Duarte Pimentel.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. *Sorghum bicolor*. 2. Sorgo - Produtividade.
3. Bioenergia. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento
de Fitotecnia. Programa de Pós-graduação em Fitotecnia.
II. Título.


CDD 22. ed. 633.62

VANESSA APARECIDA PEREIRA BATISTA


AVALIAÇÃO BIOENERGÉTICA DE SORGOS BIOMASSA, SACARINO E FORRAGEIRO

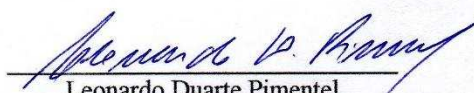
Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 29 de julho de 2016.


Reinaldo Francisco Teófilo


Denise Cunha Fernandes dos Santos Dias
(Coorientadora)


Luiz Antônio dos Santos Dias
(Coorientador)


Leonardo Duarte Pimentel
(Orientador)

*Aos meus pais Ricardo e Rosângela
e aos meus irmãos Vanucci e Ricardo Júnior.*

DEDICO

*O bom Deus não me inspiraria desejos irrealizáveis, portanto, posso
apesar de minha pequenez aspirar à santidade” (Santa Teresinha).*

AGRADECIMENTOS

À Deus pelo dom da vida, por ser meu sustento e por todas as graças concedidas.

À Universidade Federal de Viçosa, em especial ao Departamento de Fitotecnia pela oportunidade de realizar a pós-graduação e pela infraestrutura disponibilizada. Estendo meus agradecimentos aos professores do departamento por todo aprendizado e aos funcionários do Campo Experimental de Coimbra, do CECA e do Setor de Fruticultura por toda ajuda na condução dos trabalhos.

À FAPEMIG pela concessão da bolsa de estudos.

Ao professor Leonardo Duarte Pimentel pela excelente orientação, por todos os ensinamentos, dedicação, paciência e principalmente pela confiança depositada.

Ao professor Luiz Antônio dos Santos Dias pela disponibilidade e orientações neste trabalho, principalmente nas análises estatísticas.

À professora Denise Cunha Fernandes dos Santos Dias pelo apoio neste trabalho.

Ao professor Reinaldo Teófilo pelas orientações na condução dos experimentos.

À Telma Queiroz pela amizade e por ser tão prestativa na condução dos trabalhos, principalmente nas análises em laboratório.

Ao Domingos Queiroz pela disponibilidade em me ajudar.

Aos meus pais Ricardo e Rosangela pelo amor incondicional e por não medirem esforços para me ajudar. Sem vocês essa jornada seria muito mais árdua.

À minha irmã Vanucci por estar comigo “do plantio à colheita”. Agradeço imensamente por toda a ajuda, irmandade, companheirismo, alegrias compartilhadas, por estar ao meu lado nos momentos difíceis e me impulsionar a ir mais longe.

Ao meu irmão Ricardo Júnior por seu meu amuleto da sorte. Agradeço por me ajudar de uma maneira única e me mostrar quão forte somos juntos.

Aos meus avós José Horta e Zilda pelo apoio, carinho e todo cuidado.

Aos meus tios e primos pelas orações e todo cuidado. Em especial, ao meu tio Antônio Luiz pelos conselhos e mensagens de apoio.

Ao Wallace por toda ajuda, pelas inúmeras idas à Coimbra, pelos momentos de descontração, companheirismo e amor.

Ao quarteto mágico (Paulinha, Carol e Monizy) pela amizade ímpar, por todo apoio, cumplicidade e carinho.

A Emília por todo cuidado, conselhos e por ser uma amiga tão presente.

Aos eternos amigos do JSC, que se fazem sempre presentes através do apoio e amizade sincera. Agradeço por me aproximarem de Deus à todo instante.

A Angélica pela amizade e presença tão essenciais, por cada conversa, por todo apoio, pelas tardes de estudo em sua casa e pela ajuda em todas as etapas deste trabalho.

Aos colegas da pós-graduação pela ótima convivência e diversos aprendizados.

Aos amigos do Programa Sorgo da UFV, por toda ajuda nos experimentos, pela amizade tão prestativa, pelos momentos de descontração e conselhos. Vocês foram muito importantes nesses dois anos de mestrado.

A todos que contribuíram para a realização deste trabalho.

Muito obrigada.

BIOGRAFIA

Vanessa Aparecida Pereira Batista, filha de Ricardo José Batista e Rosangela Aparecida Pereira Batista, nasceu em 28 de julho de 1989 em Viçosa, MG.

Graduou-se em Agronomia, em março de 2014 pela Universidade Federal de Viçosa. Em agosto de 2014, ingressou no programa de pós-graduação em Fitotecnia em nível de mestrado.

Defendeu sua dissertação em julho de 2016.

ÍNDICE

RESUMO.....	ix
ABSTRACT.....	xi
INTRODUÇÃO GERAL.....	1
REVISÃO DE LITERATURA	3
1. BIOMASSA ENERGÉTICA.....	3
2. SETOR SUCROENERGÉTICO.....	6
3. CULTURA DO SORGO.....	7
3.1. CARACTERIZAÇÃO DA PLANTA DE SORGO.....	8
4. REFERÊNCIAS.....	11
CAPÍTULO I. CARACTERIZAÇÃO DO POTENCIAL PRODUTIVO E BIOENERGÉTICO DE TRÊS GRUPOS AGRONÔMICOS DE SORGO, AVALIADOS EM DUAS ÉPOCAS DE CORTE.....	15
RESUMO.....	15
ABSTRACT.....	17
INTRODUÇÃO.....	19
MATERIAL E MÉTODOS.....	21
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	27
Caracterização agronômica.....	27
Caracterização estrutural das partes da planta.....	35
Caracterização energética.....	41
CONCLUSÕES.....	45
AGRADECIMENTOS.....	45
REFERÊNCIAS.....	46
CAPÍTULO II. PRODUÇÃO DE AÇÚCARES NO COLMO DE SORGO SACARINO, AVALIADOS EM DUAS ÉPOCAS DE CORTE.....	50
RESUMO.....	50
ABSTRACT.....	51
INTRODUÇÃO.....	52
MATERIAL E MÉTODOS.....	53
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	57

CONCLUSÕES.....	64
AGRADECIMENTOS.....	64
REFERÊNCIAS	65
CONSIDERAÇÕES FINAIS	67

RESUMO

BATISTA, Vanessa Aparecida Pereira, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2016. **Avaliação bioenergética de sorgos biomassa, sacarino e forrageiro.** Orientador: Leonardo Duarte Pimentel.

Visando atender à crescente demanda por bioenergia (bioeletricidade e bioetanol), o setor sucroenergético busca alternativas para ampliar a produção de biomassa por unidade de área. Nesta perspectiva o sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] é visto como matéria-prima promissora, pois trata-se de uma planta C4, de ciclo curto, com grande potencial de produção de biomassa por unidade de área. Existem diversos tipos agronômicos com elevada produtividade de matéria seca por unidade de área e tempo, como o sorgo biomassa, o sacarino e o forrageiro. Entretanto, acredita-se que o real potencial de uso desta cultura ainda não tenha sido explorado adequadamente no setor bioenergético, devido à falta de conhecimento das características destes materiais. Deste modo, objetivou-se com este trabalho realizar uma caracterização do potencial produtivo e bioenergético de três grupos agronômicos de sorgo (sorgo biomassa, sorgo sacarino e sorgo forrageiro) em duas épocas de corte. Para isso, realizou-se um experimento inédito, discutido neste trabalho em dois capítulos. Capítulo 1: As cultivares de sorgo foram semeados no campo, sendo avaliados em duas safras consecutivas (safra principal e rebrota). Ao final do ciclo de cada variedade foram realizadas avaliações agronômicas (duração do ciclo, altura de plantas, produção de massa fresca e massa fresca /ha e participação das partes na biomassa total das plantas), estrutural (composição lignocelulósica) e bioenergética (poder calorífico superior) da planta de sorgo, afim de caracterizar a produção de energia potencial (GJ) por unidade de área de cada cultivar e estudar o melhor uso destes matérias no setor bioenergético. Verificou-se que o potencial de produção de massa fresca total é maior na safra para todas as cultivares, e as cultivares BD 7607 e BRS 716 (sorgo biomassa) apresentaram as maiores produções de biomassa, 110 e 108 t/ha respectivamente. A produtividade das cultivares na rebrota foi pouco significativa devido às condições climáticas desfavoráveis. Foi verificado também que o poder calorífico superior foi maior nas folhas para todas as cultivares em relação aos outros componentes das plantas e que as cultivares que apresentaram maior produção de massa seca/ha, pertencentes ao grupo do sorgo biomassa (BD 7607 e BRS 716), conseqüentemente também apresentaram maior produção de energia/ha. No segundo capítulo, foi avaliado a produção quantitativa e qualitativa dos açúcares produzidos no colmo apenas das cultivares pertencentes ao grupo do sorgo sacarino, em duas épocas de corte (safra principal e rebrota). Para isto foi realizada a extração do caldo e posteriormente foi determinado o teor de açúcares totais

(sacarose, glicose e frutose) em cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC). Foi verificado que a quantidade de açúcares (açúcares totais) produzidos não varia em função dos ciclos, porém a taxa de extração diminui na rebrota o que pode resultar em menores rendimentos industriais por tonelada de matéria-prima processada. Também, observou-se que a qualidade dos açúcares varia de acordo com a cultivar e estágio de desenvolvimento da planta. Conclui-se que a quantidade de energia produzida por cada tipo de sorgo é diretamente influenciada pelo seu desempenho agrônômico e pela composição estrutural. A composição quantitativa e qualitativa dos açúcares presentes no caldo das cultivares de sorgo sacarino variam em função da época de corte e da cultivar.

ABSTRACT

BATISTA, Vanessa Aparecida Pereira, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, July of 2016. **Bioenergetic evaluation of sorghum biomass, saccharine and forage.** Adviser: Leonardo Duarte Pimentel.

To meet the growing demand for bio-energy (bioelectricity and bioethanol), the sugarcane industry seeks alternatives to expand production of biomass per unit area. In this perspective sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] is seen as a promising raw material, because it is a C4 plant, short cycle, with great potential for biomass production per unit area. There are several types with high agronomic yield of dry matter per unit area and time such as sorghum biomass, saccharine and forage. However, it is believed that the actual potential use of this culture has not yet been properly exploited in bioenergy industry, due to lack of knowledge of the characteristics of these materials. Thus, the aim of this study was to perform a characterization of productive and bioenergetic potential of three agronomic groups of sorghum (sorghum biomass sorghum and forage sorghum) at two cutting times. For this, there was an unprecedented experiment discussed in this paper in two chapters. Chapter 1: The sorghum cultivars were planted in the field, being evaluated in two consecutive crops (main crop and regrowth). At the end of the cycle of each variety were carried out agronomic evaluations (cycle length, plant height, fresh pasta production and fresh weight / ha and participation of the parties in the total biomass of plants), structural (lignocellulosic composition) and bioenergetics (calorific top) of the sorghum plant, in order to characterize the potential energy (GJ) per unit area of each cultivar and study the best use of these materials in the bioenergy sector. It was found that the total fresh mass production potential is higher in yield for all cultivars, and cultivars BD 7607 and BRS 716 (sorghum biomass) had the highest biomass production, 110 and 108 t/ha respectively. The grain yields in regrowth was negligible due to unfavorable weather conditions. It was also found that the higher calorific value was higher in the leaves for all cultivars in relation to other components of plants and cultivars that showed higher dry matter yield/ha, belonging to the sorghum biomass group (BD 7607 and BRS 716) consequently also showed higher energy /ha. In the second chapter, it was assessed the quantitative and qualitative production of sugar produced in the stem only from cultivars belonging to the sorghum group in two harvest periods (main crop and regrowth). To this was done extracting the broth and was subsequently given the total sugar content (sucrose, glucose and fructose) in high-performance liquid chromatography (HPLC). It was found that the amount of sugar (total sugars) produced does not vary as a function of cycles, but the extraction rate decreases the regrowth which may result in lower

yields industrial per ton of feedstock processed. Also, it was observed that the quality of sugars varies with the cultivar and plant development stage. It follows that the amount of energy produced by each type of sorghum is directly influenced by agronomic performance and structural composition. The quantitative and qualitative composition of sugars in the juice of sweet sorghum cultivars vary depending on cutting time and cultivar.

INTRODUÇÃO GERAL

O setor sucroenergético brasileiro busca fontes alternativas e renováveis de energia aliada a processos eficientes para otimizar a produção bioenergética (Unica, 2010). Especificamente, procura-se alternativas para produção de bioenergia na entressafra da cana-de-açúcar (Carlin & Rosseto, 2014), visando manter o complexo agroindustrial em atividade o ano todo. Outra possibilidade, seria ampliar a atuação das usinas para as áreas marginais cultivadas com culturas anuais por meio de contratos de curto prazo. Neste sentido, as usinas buscam materiais que apresentem elevada produtividade e ciclo rápido, de modo que se otimize o uso do solo e das plataformas industriais.

O sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] é uma planta C4, com elevada capacidade de produção de biomassa. Quando comparado a outras culturas que possuem potencial energético, se destaca por atender às necessidades de mercado, como: baixo custo de implantação, ciclo curto, ampla adaptabilidade podendo ser cultivado em diferentes condições edafoclimáticas, é uma cultura totalmente mecanizável, com baixa umidade e alto poder calorífico em caldeiras (Castro, 2014).

Existem diversos tipos agronômicos de sorgo com elevada produtividade de matéria seca, como o sorgo biomassa, o sacarino e o forrageiro. Estes materiais são utilizados tradicionalmente para queima (geração de eletricidade), produção de bioetanol e alimentação animal, respectivamente (Ribas, 2014). O sorgo biomassa e o sacarino vem sendo incorporados como cultivos de verão nas áreas de renovação de canavial, em que o solo, tradicionalmente cultivado com cana-de-açúcar, fica pelo menos 4 meses em pousio. Esta estratégia de uso do solo tem possibilitado aumento do período de funcionamento das usinas e da oferta de energia para o mercado consumidor, contribuindo também para a sustentabilidade financeira dos complexos agroindustriais.

Além disto, após a colheita da cultura original, a planta do sorgo conserva vivo o seu sistema radicular, o que possibilita a rebrota quando há condições ideais para seu desenvolvimento. Desta forma, a rebrota também poderá ser utilizada na produção de biomassa, otimizando a produção de bioenergia por unidade de área/ano, resultando em menor custo de produção da energia gerada.

Entretanto o potencial produtivo das variedades de sorgo disponíveis no mercado para este fim é pouco conhecido. É preciso caracterizá-las quanto à capacidade de produção de biomassa por unidade de área/ano. Acredita-se que o real potencial da cultura do sorgo ainda não

tenha sido explorado no Brasil por falta de conhecimento. O sorgo forrageiro por exemplo, pode ser uma excelente fonte de biomassa para produção de biocombustíveis como etanol 2ª geração, devido ao ciclo curto, elevada produtividade e digestibilidade deste material pelos microrganismos. Entretanto, é preciso entender e compatibilizar os fatores de produção agrícola (produtividade, ciclo, possibilidade de uso da rebrota) com as características estruturais (umidade, % lignina, % de celulose e % hemicelulose) destes materiais a fim de propor o melhor aproveitamento industrial.

Neste sentido, o objetivo com este trabalho foi realizar a caracterização do potencial produtivo e bioenergético de seis cultivares de sorgo, divididos nos três grupos agronômicos: sorgo biomassa, sorgo sacarino e sorgo forrageiro, e estimar a quantidade de energia potencial a ser gerada em GJ/ha/ano de cada grupo agronômico. Além disso, procura-se caracterizar outros usos potenciais para estes materiais baseado na composição estrutural e direcioná-los para produção de biocombustíveis líquidos e/ou sólidos.

Para isso, foi realizado um trabalho inédito, dividido em dois capítulos, sendo conduzido em condições de campo onde foram realizadas as avaliações fitotécnicas (safra e rebrota) e estruturais do potencial bioenergético dos materiais de sorgo em laboratório.

REVISÃO DE LITERATURA

1. BIOMASSA ENERGÉTICA

Biomassa é uma forma indireta da energia solar. Todo material orgânico tem origem na fotossíntese vegetal, que é o processo onde ocorre a redução do gás carbônico (CO₂ do ar), uma molécula inorgânica, à um composto orgânico reduzido (carboidrato), sendo realizada principalmente pelos vegetais a partir da luz solar (Souza, 2011). A energia química armazenada na biomassa pode ser liberada diretamente por combustão ou convertida a outros tipos de combustíveis líquidos, sólidos ou gasosos, de acordo com a especificidade de uso, como biocombustíveis e biomateriais.

A biomassa possui átomos de oxigênio na sua composição química diferentemente dos combustíveis fósseis. A presença desse átomo faz com que a biomassa necessite de menos oxigênio do ar, resultando em menor potencial poluidor. Por outro lado, a presença de oxigênio na estrutura do material reduz a quantidade de energia a ser liberada por unidade de massa (Nogueira & Rendeiro, 2008). A principal vantagem da biomassa como fonte de energia é o reaproveitamento do CO₂ liberado pelo processo fotossintético, o que resulta em um processo de produção de energia renovável e limpa, além dos fatores socioeconômicos (produção descentralizada de energia, geração de renda distribuída, dentre outros).

O potencial energético da biomassa é medido através do poder calorífico (Telmo & Lousada, 2011). O poder calorífico é a quantidade de calorías (energia) liberadas por um material em sua combustão completa, sendo esta quantidade proporcional ao peso do material queimado (Quirino, 2011). A energia contida em um combustível será maior quanto maior for o seu poder calorífico, mostrando assim a importância do conhecimento dessa propriedade para avaliação de um combustível como insumo energético.

A biomassa vegetal é composta por quantidades variáveis de celulose, hemicelulose, lignina e pequenas quantidades de lipídios, proteínas, açúcares simples e amidos (Vieira, 2012). A biomassa também contém constituintes inorgânicos e uma fração de água. Dentre estes compostos a celulose, hemicelulose e lignina são os três constituintes principais (Zhang et al., 2010) que influenciam diretamente na conversão da biomassa em biocombustíveis.

A celulose é componente mais abundante dos materiais lignocelulósicos, constituído unicamente por unidades de D-glicose, mantidas unidas numa cadeia molecular linear (Jorgensen et al., 2007). Seu conteúdo varia de 40 a 50% e está presente em todos os vegetais, desde os mais simples até em árvores mais complexas (Rabelo et al., 2011). A hidrólise completa da

celulose gera glicose, que pode ser convertida em diversas substâncias tanto por processos químicos quanto bioquímicos. A glicose, por sua vez, por ter uma via metabólica exclusiva e comum à grande maioria dos seres vivos, pode ser convertida biologicamente em etanol de segunda geração (Canilha et al, 2012), bem como utilizada para a produção de uma ampla variedade de substâncias como: ácidos orgânicos, glicerol, sorbitol, manitol, frutose, entre outras. No entanto, para que tais substâncias possam ser produzidas a partir da glicose gerada da celulose, é necessário hidrolisar este polissacarídeo a fim de disponibilizar seus monômeros para os processos posteriores (Rabelo et al., 2011).

As hemiceluloses são uma classe heterogênea de polímeros que representam, em geral, 15-35% da biomassa da planta e que pode conter pentoses (arabiose), hexoses (xilose, glicose, manose e galactose) e ácidos urônicos (glucurônico, galactourônico, etc). São estruturalmente mais semelhantes com a celulose do que com a lignina, têm função de estabilizar a parede celular através de pontes de hidrogênio com a celulose e de ligações covalentes com a lignina (Gírio et al., 2010). A hidrólise da fração hemicelulósica gera como produto uma mistura de açúcares, com predominância de xilose. Tradicionalmente, este açúcar tem sido usado na produção de furfural, que é um solvente seletivo, muito reativo, utilizado em larga escala na purificação de óleos minerais, vegetais e animais, como também na concentração de vitamina A de óleo de fígado de peixe (Assunção et al., 2010). A produção de etanol a partir da fração de hemicelulose geralmente é realizada através da conversão microbiana, seja na forma monomérica ou na forma oligomérica, sendo esta forma essencial para aumentar a produção de combustível (Gírio et al., 2010).

O xilitol é um poliálcool que pode ser convertido também através da xilose presente na fração hemicelulósica. O xilitol é lentamente absorvido no trato gastrointestinal e seu metabolismo independe da insulina possibilitando sua utilização como adoçante para diabéticos (Winkelhausen & Kuzmanova, 1998). É utilizado também como aditivo alimentar do tipo umectante, sendo empregado em balas, confeitos, gomas de mascar e produtos do gênero. Sua vantagem é não afetar a identidade e a genuidade dos alimentos (Canilha et al., 2012).

A lignina é o terceiro componente principal da parede celular vegetal, correspondendo de 6 a 30% da biomassa. A lignina possui estrutura bem mais complexa do que a da celulose e da hemicelulose devido à presença de diversas unidades precursoras e ao grande número de combinações possíveis entre as mesmas (Godin et al., 2011). A principal função da lignina nas

plantas é proporcionar suporte estrutural e resistência contra ataque microbiano. Conseqüentemente, a lignina constitui a principal resistência mecânica e química à utilização da celulose e da hemicelulose para produção de bioetanol (Saidur et al., 2011).

A lignina é um componente aromático, rico em carbono e que apresenta alta estabilidade térmica devido aos tipos de ligações químicas existentes dentro desta macromolécula. A lignina não é fermentável e sua estrutura pode influenciar a degradação térmica da biomassa, elevando o seu poder calorífico superior (Jenkins et al., 1998). Deste modo a biomassa rica em lignina é muito utilizada na queima direta para gerar energia no segmento industrial. Além disso, devido às suas propriedades funcionais, a lignina oferece perspectivas de utilização para a obtenção de produtos de alto valor agregado, como emulsificantes com aplicação na área alimentícia e na produção de vanilina, que é usada extensamente como flavorizante em alimentos.

O teor de umidade é um fator importante que influencia diretamente o poder calorífico da biomassa vegetal. Na queima do combustível úmido, a água é evaporada, portanto parte da energia liberada na combustão é gasta para essa evaporação. Assim, quanto maior o teor de umidade, menor será a quantidade de energia proporcionada pelo combustível (Fernandes, 2014). Por existir essa umidade, é inevitável que ocorra uma perda de calor nos gases de combustão em forma de vapor de água, já que a umidade da biomassa ao evaporar absorve energia em combustão. A quantidade máxima de água que a biomassa vegetal pode conter para entrar em combustão tem sido calculada em aproximadamente 65% na base úmida (o resto corresponde ao material sólido). Desta forma, biomassa muito úmida, com teor de umidade acima deste limite, necessita calor de origem externa para secar e entrar em combustão (Cunha et al., 1989).

A condição de queima de um material é considerada como ideal quando se encontra absolutamente seco, mas também está diretamente influenciada pela constituição química da biomassa – lignina e extrativos, que elevam seu potencial (Quirino et al., 2005). Há uma alta correlação entre altos teores de lignina e baixo teor de umidade, que resulta em um material com alto poder calorífico.

Neste contexto, o uso sustentável da biomassa poderá ser realizado em biorrefinarias através de métodos que oferecem vantagens econômicas, ambientais e estratégicas. As biorrefinarias são compostas por instalações integradas de tecnologias que convertem a biomassa em produtos de valor agregado como: biocombustíveis de transporte, energia e produtos químicos (Cherubini & Stromman, 2011). Através da produção de vários produtos, uma biorrefinaria pode tirar vantagem dos diferentes componentes da biomassa e seus intermediários, além de

maximizar o valor derivado a partir da matéria-prima da biomassa de acordo com a disponibilidade do mercado (Luo et al., 2009).

2. SETOR SUCROENERGÉTICO

O setor sucroenergético compreende a cadeia agroindustrial relacionada à produção de açúcar, bioetanol e bioeletricidade (Nastari, 2012). No Brasil, estes produtos decorrem de forma quase exclusiva do processamento da cana-de-açúcar utilizada para fins industriais. Normalmente as usinas priorizam a produção de açúcar, que resulta em maior retorno financeiro, porém, é comum a produção integrada destes três produtos. Isso porque o mercado de alimentos é limitado e é altamente subsidiado pelos países concorrentes. Além do açúcar e/ou etanol, há grande quantidade de resíduos (fibras) geradas, que quando aproveitadas para produção de bioeletricidade resulta em otimização dos processos industriais.

Além disto, o Brasil possui uma matriz elétrica predominantemente renovável, com destaque para a geração hidráulica que corresponde à 65,2% da oferta interna de energia elétrica (EPE, 2015). Atualmente, cerca de 5% da matriz brasileira de geração de energia elétrica é oriunda da queima do bagaço da cana-de-açúcar. A bioeletricidade sucroenergética é uma fonte de energia que contribui para a segurança da oferta brasileira de energia elétrica por diversificar a matriz, ser sustentável ambientalmente e, sobretudo, ser complementar à geração hídrica (Unica, 2010).

Neste sentido, o setor sucroenergético pode ser considerado um dos exemplos mais bem-sucedidos de estratégia integrada de desenvolvimento econômico descentralizado, capaz de atingir elevado grau de sustentabilidade ao longo do tempo (Nastari, 2012). Este setor tem uma ampla contribuição no cenário nacional, desde o campo econômico pela significativa redução da importação de combustível fóssil, como no campo socioambiental pela geração de empregos e redução da emissão de gases de efeito estufa nos veículos leves.

As demandas por etanol, bioeletricidade e açúcar, nos mercados interno e externo, continuam em crescimento. Logo, é alta a demanda por matéria-prima de qualidade. Além disso, é preciso garantir o fornecimento principalmente nos períodos de entressafra da cana-de-açúcar (atualmente a principal fonte de matéria-prima), garantindo assim o abastecimento durante o ano todo.

A entressafra da cana-de-açúcar compreende os meses de dezembro a abril, quando os colmos encontram-se imaturos apresentando baixos teores de açúcares fermentescíveis (Teixeira et al., 1997). Neste período a realização do corte da cana-de-açúcar implicaria na redução

do rendimento industrial, resultando em elevada ociosidade das unidades industriais, e consequentemente, baixa competitividade.

Deste modo o sorgo tem sido avaliado para complementar a produção industrial na entressafra da cana. Suas vantagens são: ciclo curto de produção, facilidade de mecanização da cultura, teor relativamente alto de açúcares diretamente fermentáveis contidos no colmo e pela antecipação da colheita em 4 meses nos complexos agroindustriais. Acredita-se que esta planta seja uma alternativa técnica e economicamente viável para fornecimento de matéria-prima renovável, com custo competitivo e em grande escala nas usinas, evitando o corte antecipado de cana-de-açúcar. Contudo, isso ainda não é uma realidade nas usinas brasileiras. Existem vários gargalos de ordem fitotécnicas e industriais a serem resolvidos, como arranjo de plantas, ponto de colheita, viabilidade de se utilizar a rebrota (quantitativa e qualitativamente), dentre outros. Isso resulta em insegurança por parte do produtor de matéria-prima que não investe na atividade.

3. CULTURA DO SORGO

Sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) é uma planta originária do continente africano mais precisamente da África Oriental (Sudão e/ou Etiópia). Provavelmente, foi introduzido no Brasil no século XX pela região nordeste (Ribas, 2014). Hoje os Estados Unidos lideram a produção mundial de sorgo, seguido por México, Nigéria, Índia, Argentina, Sudão, Etiópia, China e Brasil (Conab, 2014).

A área cultivada com sorgo no Brasil deu um salto extraordinário, a partir do início dos anos 1990, e isso se deve principalmente à criação do Grupo Pró-sorgo que teve como objetivo o fomento da produção de sorgo no país, com maior divulgação das potencialidades da cultura, além da crescente importância da safra de inverno (segunda safra ou safrinha) na região central do Brasil, onde o sorgo se destaca por apresentar maior resistência ao estresse hídrico do que o milho. Dados fornecidos pelos índices econômicos e de produção, de 1976 a 2009, indicam que no Brasil o aumento em toneladas de sorgo por hectare foi na ordem de 449,32% (Diniz, 2010). A maior parte da produção de sorgo no país concentra-se nos estados de Goiás, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Oeste da Bahia, Triângulo Mineiro e São Paulo (Ribas, 2014).

O sorgo proporciona grande utilidade no meio agrícola, podendo ser utilizado tanto na alimentação humana como animal (para volumosos ou na composição de rações) (Magalhães et al., 2003). No Brasil, a cultura do sorgo tem sido utilizada também como fonte de energia

renovável através da produção de etanol lignocelulósico e geração de energia térmica, elétrica e mecânica através da queima de biomassa (Unica, 2013).

Por ser uma planta C4, o sorgo apresenta altas taxas fotossintéticas, sendo considerada uma das plantas mais eficientes no acúmulo de biomassa por unidade de área do mundo. Além disto, possui um alto potencial de rendimento, facilidade de cultivo, ampla adaptabilidade e reprodução por sementes, tornando-se uma espécie muito atraente para exploração de energia (Magalhães et al., 2003).

3.1. CARACTERIZAÇÃO DA PLANTA DE SORGO;

Pertencente ao grupo das gramíneas (C4), é uma planta de clima tropical, de dias curtos, com temperatura ótima para o seu desenvolvimento oscilando entre 16 e 38°C. É cultivado principalmente em locais onde a precipitação anual ocorre entre 375 e 625 mm (Ribas, 2009). Possui raízes adventícias, com profundidade de enraizamento podendo chegar a 1,30m com 80% das raízes distribuídas nos primeiros 30 cm de profundidade.

O caule é do tipo colmo, dividido em nós, que dependendo do sorgo, podem variar entre 7 e 24. A altura é determinada pela quantidade de nós que apresentam o colmo e pelo tamanho dos entrenós. Nos tipos comerciais a altura da planta varia de 1,20 m (granífero) até 5,30 m (biomassa). As folhas do sorgo possuem depósito de substância cerosa na junção da bainha com o limbo, que reduz a perda de água na transpiração. O fruto do sorgo é do tipo cariopse ou grão seco que é constituído principalmente de amido (65%) e seu teor de açúcar é formado principalmente de sacarose e a quantidade de proteína varia de acordo com o cultivar, podendo atingir até 18% em alguns deles.

A planta de sorgo se adapta a uma gama de ambientes, principalmente sob condições de deficiência hídrica, desfavoráveis à maioria dos outros cereais. A tolerância da cultura ao déficit hídrico está relacionada à estratégia de escape, através de um sistema radicular profundo e ramificado de alta eficiência na extração de água do solo. Outra estratégia é a tolerância, relacionada ao nível bioquímico, onde a planta é capaz de reduzir o metabolismo, murchar e recuperar-se quando o estresse é interrompido (Magalhães et al., 2014).

Além disto, a planta de sorgo requer menor quantidade de água para se desenvolver, cerca de 300 L/kg de matéria seca produzida enquanto o milho requer cerca de 400 L/kg de matéria seca produzida. Além disto o período mais crítico à falta de água, para as plantas de sorgo é durante o florescimento. Esta característica permite que a cultura seja apta para desen-

volvimento e expansão em regiões de cultivo com distribuição irregular de chuvas e em sucessão a culturas de verão. Quando comparado ao milho (*Zea mays* L.), o sorgo consome 30-50% menos água, conseqüentemente menos pesticidas e outros insumos químicos, além de otimizar o uso da terra por ser possível sua implantação em terras marginais (Castro, 2014). É considerado uma cultura de baixo custo de implantação com capacidade de mecanização, o que facilita a colheita e logística do produto.

Todos os sorgos de interesse comercial, independentemente de sua morfologia ou finalidade, pertencem ao gênero *Sorghum*. Agronomicamente os tipos de sorgos podem ser classificados em cinco grupos distintos: granífero; forrageiro; sacarino; biomassa e vassoura. As cultivares de sorgo mais utilizadas como fonte para a bioenergia são os tipos agrônômicos com elevada produtividade de matéria seca, como o sorgo biomassa, o sacarino e o forrageiro.

- Sorgo Forrageiro

Geralmente são cultivares de porte alto entre 2 e 3 metros, com colmos suculentos ou secos, doces ou insípidos que possuem grãos pequenos. Apresenta características fenotípicas que determinam facilidade de plantio, manejo, colheita e armazenamento, alto valor nutritivo, alta concentração de carboidratos solúveis que garantem uma adequada fermentação láctica, bem como altos rendimentos de massa seca por unidade de área, é uma planta muito utilizada como silagem na alimentação de bovinos (Castro, 2014).

Normalmente é um material que produz grande quantidade de massa verde e que constitui a opção mais viável para atender a demanda dos pecuaristas, em razão das suas características bromatológicas, que, à semelhança do milho, possibilitam fermentação adequada e consequente conservação deste alimento sob a forma de silagem (Gomes et al., 2006).

- Sorgo Sacarino

Cultivar de porte alto (maior de 3 m), apresenta colmos suculentos. O caldo extraído do colmo fresco é composto de sacarose, glicose e frutose e pode, portanto, ser prontamente fermentados em álcool (Saidur et al., 2011). O sorgo sacarino se assemelha à cana-de-açúcar, uma vez que armazena açúcares simples em colmos, apresentando assim grande potencial na produção de bioetanol. Destaca-se em relação à cana-de-açúcar, sobretudo, na rapidez do ciclo de produção, na mecanização da cultura e na antecipação da colheita em até quatro meses (Embrapa, 2008). Após a extração do caldo, o bagaço é gerado e este pode ser utilizado na geração

de energia térmica ou elétrica ou na produção de etanol de celulose, ou seja, etanol de 2ª geração. Além disso, seria possível utilizar o bagaço na forragem para animais em confinamentos, contribuindo para um balanço energético e econômico favoráveis.

- Sorgo Biomassa

Cultivar de porte muito alto, com altura mínima de 3 metros. Possui colmos grossos e fibrosos, panículas pequenas e baixa produção de grãos. É sensível ao fotoperíodo, pois floresce apenas quando os dias possuem menos de 12 horas e 20 minutos, ou seja, período entre 21 de março e 22 de setembro, na maior parte do Brasil (Pereira Filho et al., 2013).

O sorgo biomassa apresenta qualidade para geração de energia, com poder calorífico similar ao da cana, do eucalipto e do capim elefante (Embrapa, 2014). O material pode ser utilizado em usinas termoelétricas, como também em indústrias que têm caldeiras e geram energia para consumo próprio. É um material que se mostra mais econômico por produzir muita biomassa num curto intervalo de tempo, chegando a produção de 150 toneladas de matéria fresca por hectare e até 50 toneladas de matéria seca. Além disso, é um tipo de sorgo vigoroso, resistente a pragas, a doenças e tem boa tolerância ao acamamento (Torres, 2013).

4. REFERÊNCIAS

Assunção, F. C. R.; Carioca, J. O. B.; Almeida, M. F. L.; Seidl, P. R.; Silva Filho, D. A.; Medeiros, E. F. *Química Verde no Brasil: 2010-2030*. Brasília, DF: **Centro de Gestão e Estudos Estratégicos–CGEE**, 2010.

Canilha, L.; Chandel, A. K.; Milessi, T. S. S.; Antunes, F. A. F.; Freitas, W. L. C.; Felipe, M. G. A.; Silva, S. S. Bioconversion of sugarcane biomass into ethanol: an overview about composition, pretreatment methods, detoxification of hydrolysates, enzymatic saccharification, and ethanol fermentation. **Journal of Biomedicine and Biotechnology**, v.3, p.1-15, 2012.

Carlin, S. D.; Rossetto, R.; **Biomassa para produção de energia**, 2014. Disponível em: <<http://www.aptaregional.sp.gov.br/acesse-os-artigos-pesquisa-e-tecnologia/2014/julho-dezembro/1631-biomassa-para-producao-de-energia/file.html>>; Acesso em 20 de novembro de 2015.

Castro, F. M. R. (2014) **Potencial agrônômico e energético de genótipos de sorgo biomassa**. Dissertação de Mestrado (Produção Vegetal), 84p. Lavras, MG

Cherubini, F.; Stromman, A. H. Chemicals from lignocellulosic biomass: opportunities, perspectives, and potential of biorefinery systems. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v.5, p. 548-561, 2011

CONAB: Companhia Nacional de Abastecimento. **Sorgo: Período março 2014**. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/14_04_11_17_31_44_sorgomarco2014.pdf>; Acesso em 20 de setembro de 2014.

Cunha, M. P. S. C.; Pontes, C. L. F.; Cruz, I. A.; Cabral, M. T. F. D.; Cunha Neto, Z. B.; Barbosa, A. P. R. **Estudo químico de 55 espécies lenhosas para geração de energia em caldeiras**. In: 3º encontro Brasileiro em madeiras e em estruturas de madeira: Anais, São Carlos, SP v.2, p. 93-121, 1989.

Diniz, G. M. M. (2010) **Produção de sorgo (Sorghum bicolor L. Moench) aspectos gerais**. Dissertação de Mestrado (Melhoramento genético de plantas), 23p. Recife, PE.

Embrapa Milho e Sorgo (2014) **Sorgo biomassa é ótima opção para geração de energia**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/2246665/sorgo-biomassa-e-otima-opcao-para-geracao-de-energia>. Acessado em: 10 de abril de 2016.

Embrapa Milho e Sorgo. **Cultivo do sorgo**, 2008. Disponível em: <http://www.cnpms.embrapa.br/publicacoes/sorgo_4_ed/plantio-plantio.htm>. Acessado em: 20 de outubro de 2015.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética (2015) **Balço energético nacional: Ano base 2014**.

Fernandes, G. (2014). **Avaliação e caracterização agroindustrial do sorgo sacarino visando a produção de etanol**. Tese de Doutorado (Engenharia Química), 198p. Uberlândia, MG.

Gírio, F. M.; Fonseca, C.; Carvalheiro, F.; Duarte, L. C.; Marques, S.; Bogel-Lukasik. Hemicelluloses for fuel ethanol: A review. **Bioresource Technology**, v.101, p. 4775 -4800, 2010

Godin, B.; Agneessens, R.; Gerin, P. A.; Delcarte, J. Composition of structural carbohydrates in biomass: Precision of a liquid chromatography method using a neutral detergent extraction and a charged aerosol detector. **Talanta**, v.85, p. 2014 – 2026, 2011.

Gomes, S. O.; Pitombeira, J. B.; Neiva, J. N. M.; Cândido, M. J. D. Comportamento agrônomo e composição químico-bromatológico de cultivares de sorgo forrageiro no Estado do Ceará. **Revista Ciência Agrônomoica**, v. 37, p. 221-227, 2006.

Jenkins, B. M.; Baxter, L. L.; Miles Jr, T. R.; Miles, T. R. Combustion properties of biomass. **Fuel Processing Technology**, v. 54, p. 17-46, 1998.

Jorgensen, H.; Kristensen, J. B.; Felby, C. Enzymatic conversion of lignocellulose into fermentable sugars: challenges and opportunities. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v.1, p. 119-134, 2007.

Luo, L.; Van der Voet, E.; Huppel, G. Life cycle assessment and life cycle costing of bioethanol from sugarcane in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.13, p. 1613-1619, 2009.

Magalhães, P. C.; Duraes, F. O. M.; Rodrigues, J. A. S. **Fisiologia da planta de sorgo**. Sete Lagoas, Embrapa Milho e Sorgo, 4p, 2003. (Comunicado técnico, 86).

Magalhães, P. C.; Souza, T. C.; May, A.; Lima Filho, O. F.; Santos, F. C.; Moreira, J. A. A.; Leite, C. E. P.; Albuquerque, C. J. B.; Freitas, R. S. Exigências edafoclimáticas e fisiologia da produção. In: Borém, A.; Pimentel, L. D.; Parrela, R. **Sorgo: do plantio à colheita**. Editora UFV, 2014, 275p.

Nastari, P. M. **Produção sustentável - A importância do setor sucroenergético no Brasil**, 2012. Revista Agroanalysis. Disponível em: <http://www.agroanalysis.com.br/3/2012/mercado-negocios/producao-sustentavel-a-importancia-do-setor-sucroenergetico-no-brasil>. Acessado em: 18 de agosto de 2015.

Nogueira, M. F. M.; Rendeiro, G. Caracterização Energética da Biomassa Vegetal. Barreto, Eduardo José Fagundes (Coord). Combustão e Gaseificação da Biomassa Sólida: Soluções Energéticas para a Amazônia. **Brasília: Ministério de Minas e Energia**, v.1, p.52-63, 2008.

Pereira Filho, I. A.; Parrella, R. A. C.; Moreira, J. A. A.; May, A.; Souza, V. F.; Cruz, J. C. Avaliação de cultivares de sorgo sacarino [*Sorghum bicolor* L. MOENCH] em diferentes densidades de semeadura visando a características importantes na produção de etanol. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 12, p. 118 -127, 2013.

Quirino, W. F. **Utilização Energética de Resíduos Vegetais**, 2011. Disponível em: <http://www.mundoflorestal.com.br/arquivos/aproveitamento.pdf>. Acesso em: 10 de maio de 2015.

Quirino, W. F.; Vale, A. T.; Andrade, A. P. A.; Abreu, V. L. S.; Azevedo, A. C. S. Poder calorífico da madeira e de materiais ligno-celulósicos. **Revista da Madeira**, v. 89, p. 100-106, 2005.

Rabelo, S. C.; Carrere, H.; Maciel Filho, R.; Costa, A. C. Production of bioethanol, methane and heat from sugarcane bagasse in a biorefinery concept. **Bioresource Technology**, v.102, p. 7887-7895, 2011.

Ribas, P. M. Sorgo: introdução e importância econômica. **Embrapa Milho e Sorgo**. Sete Lagoas, MG, 2009.

Ribas, P. M. (2014) Origem e importância econômica. In: Borém, A.; Pimentel, L.; Parrella, R. **Sorgo: do plantio à colheita**. Editora UFV, 2014, 275p.

Saidur, R.; Abdelaziz, E. A.; Demirbas, A.; Hossain, M. S.; Mekhilef, S. A review on biomass as a fuel for boilers. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.15, p. 2262 – 2289, 2011.

Souza, V. F. (2011) **Adaptabilidade e estabilidade de cultivares de sorgo sacarino**. Dissertação de Mestrado (Produção vegetal no semiárido), 63p. Montes Claros, MG.

Teixeira, C. G.; Jardine, J. G.; Beisman, D. A. Sweet sorghum utilization as complementary raw material of sugar cane for ethanol production in microdistillery. **Food Science and Technology** (Campinas), v.17, p. 248-251, 1997.

Telmo, C.; Lousada, J. Heating values of wood pellets from different species. **Biomass and Bioenergy**, Amsterdam, v. 35, p. 2634-2639, 2011.

Torres, M. Sorgo biomassa: cultura promissora para geração de energia, 2013, **Jornal Eletrônico da Embrapa Milho e Sorgo**. Ano 07, Ed. 43. Disponível em: <<http://grao.cnpms.embrapa.br/noticia.php?ed=MTM=&id=NDY>>. Acessado em: 10 de julho de 2015.

UNICA, **Efeito da seca sobre a cana abre perspectiva para híbridos de sorgo na próxima entressafra**, 2013. Disponível em: <http://www.unica.com.br/unica-na-midia/17729932920315173097/efeito-da-seca-sobre-a-cana-abre-perspectiva-para-hibridos-de-sorgo-na-proxima-entressafra/>>. Acessado em: 19 de julho de 2015.

UNICA, **Etanol e Bioeletricidade – A cana-de-açúcar no futuro da matriz energética**, 2010.

Vieira, A. C. (2012) **Caracterização da biomassa proveniente de resíduos agrícolas**. Dissertação de mestrado (Energia na Agricultura), 56p. Cascavel, Paraná.

Winkelhausen, E.; Kuzmanova, S. Microbial conversion of D-xylose to xylitol. **Journal of Fermentation and Bioengineering**, v. 86, p. 1-14, 1998.

Zhang, L.; Xu, C. C.; Champagne, P. Overview of recent advances in thermo-chemical conversion of biomass. **Energy Conversion and Management**, v.51, p. 969-982, 2010.

CAPÍTULO I: CARACTERIZAÇÃO DO POTENCIAL PRODUTIVO E BIOENERGÉTICO DE TRÊS GRUPOS AGRONÔMICOS DE SORGO, AVALIADOS EM DUAS ÉPOCAS DE CORTE

RESUMO

O sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] é visto como alternativa promissora para ser utilizado no setor bioenergético, devido suas características de cultivo, ampla diversidade de uso e sua capacidade de rebrota. Entretanto, há poucos estudos sobre o potencial de uso das cultivares de sorgo disponíveis no mercado destinadas ao setor bioenergético. Objetivou-se com este trabalho avaliar o potencial produtivo de três grupos agronômicos do sorgo (biomassa, sacarino e forrageiro) em duas épocas de corte (safra e rebrota) e realizar a caracterização estrutural e energética (GJ/ ha/ciclo) da biomassa destes materiais a fim direcioná-los para produção de biocombustíveis e biomateriais. Foram realizadas avaliações agronômicas [duração do ciclo, altura de plantas, produção de massa fresca (PMF) e massa seca (PMS), produção total nas duas safras, percentagem de matéria seca e a participação das partes das plantas na massa seca (%)], avaliações estruturais e energéticas das partes [teor de umidade, teor de celulose, teor de hemicelulose, teor de lignina, teor de cinzas, poder calorífico superior (PCS) e a produção de energia potencial]. Verificou-se que na safra as cultivares BD 7607 e BRS 716, pertencentes ao sorgo biomassa, tiveram um ciclo mais longo com 146 dias e desta forma acumularam maior quantidade de matéria fresca alcançando as maiores produções por hectare. As cultivares de sorgo sacarino e forrageiro (BRS 511 e BRS 655, respectivamente) apresentaram o ciclo mais precoce na safra com duração de 114 dias. Já as cultivares de sorgo sacarino e forrageiro (BD 5404 e BD 1615, respectivamente) apresentaram um ciclo intermediário com duração de 133 dias. Porém as cultivares BRS 511, BD 5404 e BD 1615 não diferiram estatisticamente na matéria fresca com produtividade de 78 t/ha, 79 t/ha e 73 t/ha, respectivamente. Já a cultivar BRS 655 apresentou as menores produções de matéria fresca por hectare na safra com 52t/ha. O teor de umidade no componente colmo foi significativamente superior aos demais componentes da planta, para todas as cultivares com teor médio de 65%. Foi observado que houve variação para os componentes estruturais das plantas. As cultivares BD 7607 e BRS 716 pertencentes ao sorgo biomassa, apresentaram os maiores valores de energia potencial com 815 e 654 GJ/ha, respectivamente. Conclui-se que as cultivares de sorgo apresentaram maior potencial produtivo na safra, sendo as cultivares BD 7607 e BRS 716 pertencentes ao grupo do sorgo biomassa as mais produtivas e apresentaram os maiores valores de produção de energia por hectare considerando

a queima direta dos materiais Na rebrota houve uma redução significativa na biomassa total produzida pelas cultivares, principalmente para os materiais de ciclo longo. Observou-se redução de 94% de produção da safra para rebrota em sorgo biomassa, redução de 87% da safra para a rebrota dos sorgos sacarino e forrageiro (BD 5404 e BD 1615, respectivamente) da Ceres e redução de 75% da safra para a rebrota dos sorgos sacarino e forrageiro (BRS 511 e BRS 655) da Embrapa. Os componentes físicos da planta apresentam diferentes potenciais de uso devido a composição estrutural. Por fim, comprovou-se que o sorgo apresenta diferentes potenciais de uso que podem ser explorados pelo setor bioenergético de acordo com a parte física da planta.

Palavras-chaves: Sorghum bicolor; bioenergia, produtividade, safrinha.

DESCRIPTION OF THE PRODUCTION POTENTIAL AND BIOENERGETIC THREE AGRONOMIC SORGHUM GROUPS, ASSESSED IN TWO CUTTING TIMES

ABSTRACT

The sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] is seen as a promising alternative to be used in the bioenergy sector due its characteristics of cultivation, wide range of use and its regrowth capacity. However, there are few studies on the potential use of sorghum cultivars available on the market intended for bio-energy sector. The objective of this study was to evaluate the productive potential of three agronomic groups sorghum (biomass, saccharine and green) in two cutting seasons (harvest and regrowth) and perform structural characterization and energy (GJ / ha / cycle) of biomass of these materials in order directs them to produce biofuels and biomaterials. Were carried out agronomic evaluations [cycle length, plant height, fresh pasta production (PMF) and dry matter (PMS), total production in the two seasons, percentage of dry matter and the participation of parts of the plants in dry matter (%)], structural and energy ratings of the parties [moisture content, cellulose content, hemicellulose content, lignin content, ash content, higher heating value (HHV) and the potential energy production]. It was found that the crop cultivars BD 7607 and BRS 716, belonging to the biomass sorghum, had a longer cycle of 146 days and thus greater accumulated amount of fresh matter reaching the highest yields per hectare. Cultivars of saccharine and sorghum (BRS 511 and BRS 655, respectively) showed the earlier cycle in the harvest lasting 114 days. Already cultivars of saccharine and sorghum (BD 5404 and BD 1615, respectively) showed an intermediate cycle lasting 133 days. But the BRS 511 cultivars, BD 5404 and BD 1615 were not statistically different in the fresh matter with productivity of 78 t/ha, 79 t/ha and 73 t/ha, respectively. Already BRS 655 had the lowest yields of fresh matter per hectare at harvest with 52t/ha. The moisture content of the stem component was significantly higher than the other components of the plant, for all cultivars with an average grade of 65%. It was observed that there was a variation in the structural components of plants. BD 7607 cultivars and BRS 716 belonging to the sorghum biomass, showed the highest potential energy values 815 and 654 GJ/ha, respectively. It is concluded that the sorghum cultivars showed higher yield potential at harvest, and the BD 7607 cultivars and BRS 716 belonging to the sorghum group biomass the most productive and showed the highest per hectare energy production values considering the direct burning of materials In regrowth was a significant reduction in total biomass produced by the cultivars, especially for long-cycle materials. A reduction of 94% of crop production for regrowth in sorghum biomass,

87% reduction of the crop for the regrowth of saccharine and forage sorghums (BD 5404 and BD 1615, respectively) of Ceres and reduction of 75% of the crop for regrowth of saccharine and forage sorghums (BRS 511 and BRS 655) of Embrapa. The physical components of the plant have different potentials due to use structural composition. Finally, it was shown that sorghum has different potential uses that can be exploited by bioenergy sector according to the physical part of the plant.

Keywords: Sorghum bicolor; bioenergy, productivity, off-season.

INTRODUÇÃO

A demanda e produção mundial de energia primária deverá crescer à taxa de 1,4% ao ano até 2035. No mesmo período, a produção de energias renováveis deverá crescer à taxa de 6,6% ao ano, passando de 3 para 9% de energia primária mundial (BP, 2016). Logo, projeta-se aumento de 285% na demanda de fontes renováveis para os próximos anos. Neste contexto o aumento da oferta de biocombustíveis assume papel estratégico para segurança energética mundial.

O Brasil se destaca como um dos maiores produtores mundiais de bioenergia. No caso específico do etanol, é o 2^a maior produtor, atrás apenas do EUA. A principal matéria-prima utilizada é a cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) que é responsável por 16% da energia primária produzida no país (EPE, 2015). Nesta cadeia produtiva, tem-se a produção de etanol a partir da sacarose extraída do colmo da cana-de-açúcar (sólidos solúveis). Os resíduos da extração (fibras) normalmente são convertidos em bioeletricidade, a partir da queima do bagaço em caldeiras, garantindo a autosuficiência energética das unidades industriais e a venda de energia elétrica excedente para as distribuidoras de eletricidade.

Entretanto, o setor bioenergético brasileiro tem sofrido graves crises em função da oscilação no preço do etanol devido à sazonalidade na produção e às variações climáticas (ANP, 2014) e do período de entressafra da cana-de-açúcar que resulta em elevada ociosidade das unidades industriais, e conseqüentemente, baixa competitividade.

Uma estratégia promissora para alavancar a produção de bioenergia seria a inclusão de outras fontes de matéria-prima na entressafra de cana visando reduzir a ociosidade de produção das plataformas industriais e melhorar a competitividade do setor. Um dos maiores gargalos do setor bioenergético é a produção de matéria-prima com a qualidade desejada pela indústria a preços competitivos. Na pesquisa, tem-se observado avanços significativos em inovação e tecnologia na conversão de matérias-primas em biocombustíveis diversos (biodiesel, bioquerosene, biogasolina, pellets, etc) e biomateriais (biopolímeros, bioplásticos, etc.) (Goldemberg, 2009). Porém, na prática, estes avanços esbarram na viabilidade técnica e econômica de se obter o produto final (energia ou biomaterial) com preços competitivos.

Neste contexto, o sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] vem sendo testado como uma promissora alternativa para ampliar a produção de bioenergia, afim de manter os complexos agroindustriais em atividade o ano todo. O sorgo se destaca entre as plantas utilizadas para produção de bioenergia devido ao seu ciclo curto (aproximadamente 120 dias), pela rusticidade

e pela eficiência no uso da água, podendo ser cultivado em regiões e/ou épocas limitantes às outras espécies vegetais de alto potencial produtivo, como a cana-de-açúcar e o milho (Rooney et al., 2007; Yuan et al., 2008). Além disso, o sorgo possui baixa demanda de nitrogênio e capacidade de rebrota, o que pode reduzir custos com plantio e conseqüentemente, o custo final por unidade de biomassa produzida, além do ganho ambiental (Calvino & Messing, 2012).

Dentre os tipos de sorgo com características energéticas, se destacam: o sorgo sacarino, material utilizado para produção de etanol de primeira geração devido à elevada concentração de sacarose no colmo; o sorgo biomassa, utilizado para queima direta e geração de bioeletricidade devido ao elevado teor de lignina e o bom desempenho nos processos de combustão (May et al., 2013) e; o sorgo forrageiro, material utilizado para produção de silagem devido à elevada digestibilidade da biomassa para ruminantes. Apesar do principal uso deste material ser como silagem, acredita-se que há potencial de produção de etanol de segunda geração, devido ao baixo teor de lignina e elevada produtividade de biomassa.

Esses tipos de sorgo produzem de 50 a 150 t/ha de matéria fresca (May et al., 2016), em ciclo aproximado de 4 a 6 meses. A cana-de-açúcar, por exemplo, acumula 150 toneladas de biomassa em ciclo de um ano. Logo, os diferentes materiais de sorgo possuem elevado potencial para serem utilizados como matéria-prima energética. Quando consideradas as condições edafoclimáticas brasileiras, não se tem dados comparativos dos diferentes tipos agrônômicos de sorgo afim de melhor direcioná-los ao setor produtivo para a escolha do material mais promissor, considerando a produção de biomassa por unidade de área ao longo do ano agrícola. É possível que além do uso tradicional (sorgo biomassa: queima direta, sorgo sacarino: etanol, sorgo forrageiro: silagem) estes materiais possam ser explorados industrialmente de outras formas, através do conhecimento da composição estrutural e da produtividade desses materiais por unidade de área.

Desta forma, o objetivo com este trabalho foi avaliar o potencial produtivo de três grupos agrônômicos do sorgo (biomassa, sacarino e forrageiro) em duas épocas de corte (safra e rebrota) e realizar a caracterização estrutural e energética (GJ/ ha/ciclo) da biomassa destes materiais a fim de melhor direcioná-los para produção de biocombustíveis e biomateriais

MATERIAL E MÉTODOS

1) Local e condições climáticas

O experimento foi instalado no Campo Experimental de Coimbra, pertencente ao Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Viçosa, localizado no município de Coimbra-MG, situado a 20°51' de latitude Sul e 42°46' de longitude Oeste, a 720 metros de altitude. O trabalho foi conduzido em duas safras subsequentes, sendo realizado o primeiro e segundo cortes na safra principal e rebrota, respectivamente. O experimento foi conduzido durante os meses de dezembro/2014 a setembro/2015. As condições ambientais durante a condução do experimento estão descritas na Figura 1.

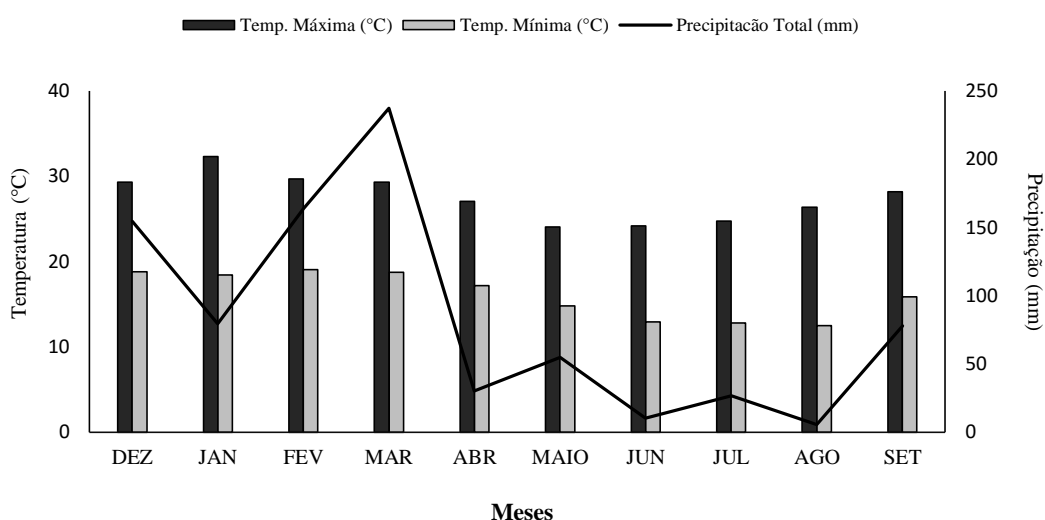


Figura 1. Precipitação acumulada (mm) e temperaturas (°C) médias mensais durante o período de condução do experimento.

O solo do local é classificado como Argissolo Vermelho Amarelo distrófico, de textura argilosa (Embrapa, 2011). Os resultados da análise química do solo apresentaram as seguintes características: $\text{pH}_{(\text{H}_2\text{O})} = 5,23$; $\text{P} = 13,4 \text{ mg dm}^{-3}$; $\text{K}^+ = 172 \text{ mg dm}^{-3}$; $\text{Ca}^{2+} = 2,60 \text{ cmol}_c.\text{dm}^{-3}$; $\text{Mg}^{2+} = 1,22 \text{ mg dm}^{-3}$; $\text{Al}^{3+} = 0,0 \text{ cmol}_c.\text{dm}^{-3}$; $\text{H} + \text{Al} = 3,6 \text{ cmol}_c.\text{dm}^{-3}$; $\text{CTC}(\text{t}) = 4,26 \text{ cmol}_c.\text{dm}^{-3}$; $\text{CTC}(\text{T}) = 7,86 \text{ cmol}_c.\text{dm}^{-3}$ e $\text{V} = 54,2\%$.

2) Implantação e manejo da cultura

O preparo da área experimental consistiu de uma aração seguida de duas gradagens, sendo posteriormente abertos os sulcos com auxílio de um escarificador. A semeadura foi realizada no dia 04/12/2014, adotando o sistema manual numa área plana de 861 m². As sementes

utilizadas foram disponibilizadas pelas empresas: Embrapa Milho e Sorgo situada em Sete Lagoas - MG (sendo estas iniciadas pelo prefixo BRS) e Ceres Sementes do Brasil (iniciadas pelo prefixo BD). A densidade de semeadura foi de 12 sementes/metro linear. Aos vinte dias após a semeadura foi realizado o desbaste manual, deixando 9 plantas/ metro linear.

A formulação de adubo utilizada para o plantio foi a 08:28:16 de NPK, utilizando 300 Kg/ha, e a adubação de cobertura foi de 222 Kg/ha de ureia, aplicados aos 20 dias após a emergência das plantas. As plantas daninhas foram inicialmente controladas com Atrazina, na dose de quatro L/ha e aos 45 dias após o plantio foi realizada uma capina manual com enxada.

As plantas foram colhidas duas vezes, sendo o primeiro corte realizado a uma altura de 10 cm do solo e o segundo, após a rebrota do sorgo, rente ao solo. Na rebrota a adubação de cobertura utilizada foi de 20-05-20 de NPK utilizando 300 Kg/ha. As plantas foram colhidas quando atingiram a maturidade fisiológica dos grãos (estádio pastoso e farináceo) e para as cultivares de sorgo sacarino foi avaliado, também, o °Brix (teor de sólidos solúveis) para tomada de decisão. As datas de coleta de amostras estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Época de plantio e colheita, de seis cultivares de sorgo em duas safras consecutivas (safra e rebrota). Coimbra, MG.

Tipo de sorgo/ Cultivar	Safra			Rebrota	
	Plantio	Coleta de amostras	Colheita 1*	Coleta de amostras	
Biomassa	BD 7607	04/12/2014	30/04/2015	05/05/2015	24/09/2015
	BRS 716	04/12/2014	30/04/2015	05/05/2015	24/09/2015
Sacarino	BD 5404	04/12/2014	17/04/2015	05/05/2015	17/09/2015
	BRS 511	04/12/2014	28/03/2015	10/04/2015	07/08/2015
Forrageiro	BD 1615	04/12/2014	17/04/2015	05/05/2015	17/09/2015
	BRS 655	04/12/2014	28/03/2015	10/04/2015	07/08/2015

*Retirada de todas a plantas da área para permitir a rebrota do 2º ciclo.

3) Delineamento estatístico

O delineamento utilizado, para as avaliações fitotécnicas, foi em blocos ao acaso com seis repetições e analisado em parcelas subdivididas no tempo. Foram avaliados seis cultivares de sorgo, divididos nos três grupos agronômicos: sorgo biomassa (híbridos BD 7607 e BRS 716), sorgo sacarino (híbridos BD 5404 e BRS 511) e sorgo forrageiro (híbridos BD1615 e BRS 655), em duas épocas de corte: safra e rebrota. O delineamento utilizado para as avaliações estruturais foi em blocos ao acaso.

As parcelas experimentais foram constituídas de quatro linhas de 6 m lineares cada, espaçadas em 0,70 m entre si. Foi acrescentada uma linha de bordadura entre as parcelas para separar os materiais distintos. A área útil utilizada para as avaliações foi composta das duas linhas centrais da parcela, eliminando 1,0 m de cada extremidade.

4) Características avaliadas

4.1) Características agronômicas

Para as avaliações fitotécnicas foram utilizadas amostras compostas por dez plantas retiradas de forma aleatória da área útil de cada parcela, sendo estas colhidas durante a maturidade fisiológica dos grãos de cada cultivar. Na sequência, foram avaliados:

- Ciclo da safra: contagem do número de dias desde a semeadura até a colheita das plantas;
- Ciclo da rebrota: contagem do número de dias desde o corte da primeira safra até a colheita das plantas;
- Altura de plantas (AP): considerando a altura média, em metros, da amostra selecionada, utilizando-se para este fim trena graduada em centímetros e considerando a distância entre a superfície do solo até a o ápice da panícula;
- Produção de massa fresca total (PMF): determinada em kg/ parcela através da pesagem das dez plantas completas.

Posteriormente, as plantas foram seccionadas em colmo, folhas e panícula para a pesagem de cada parte da matéria fresca, sendo posteriormente avaliado:

- Produção de massa seca total (PMS): determinada pela diferença de peso existente entre amostras de material recém colhido e após serem submetidos à secagem em estufa.
- Participação das partes (% PP): determinado através da pesagem de cada parte (colmo, folha e panícula) e avaliando a participação das mesmas na matéria seca total.
- Produção de biomassa total: determinada pela soma entre as produções de biomassa nas duas épocas de corte.

4.2) Características estruturais e energéticas

• Coleta das amostras da biomassa

Foram utilizadas amostras dos componentes físicos das plantas (panícula, folha e colmo) das cultivares de sorgo cultivados apenas na safra principal. Para as plantas que possuíam colmo suculento (BD 5404, BRS 511, BD 1615), foi retirado uma amostra de 500g do colmo, à parte,

e desta foi extraído o caldo em prensa hidráulica por 1 minuto com 250 kgf/cm. Após a extração, o resíduo úmido (bagaço) foi separado para análises posteriores.

- **Determinação do teor de umidade (TU)**

As amostras úmidas foram pesadas e posteriormente introduzidas em uma estufa com ventilação forçada a $65 \pm 5^\circ\text{C}$ até que atingissem peso constante. Os dados da estufa junto da equação (I) permitiram determinar o teor de umidade.

I)
$$\text{TU} = [(m_1 - m_2) / m_1] \times 100$$
, onde m_1 é a massa inicial da amostra e m_2 é a massa final após passar pela estufa.

- **Processamento das amostras**

Após a determinação do teor de umidade das amostras, procedeu-se à moagem das mesmas para a redução do tamanho das partículas e padronização da superfície específica. O moinho utilizado foi do tipo “Willye” cujas peneiras tinham 1mm de crivo. Posteriormente as amostras foram acondicionadas em embalagens de papel tipo kraft, devidamente identificadas e armazenadas para posteriormente serem utilizadas nas determinações estruturais e energéticas.

- **Composição estrutural**

As análises estruturais foram realizadas no laboratório de Biotecnologia de Melhoria Vegetal, no setor de Fruticultura do Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Viçosa, com as amostras devidamente secas e moídas, seguindo a metodologia de Detmann (2012). Os teores de celulose e hemicelulose foram determinados pelos teores de FDA (Fibra em detergente ácido) e FDN (Fibra em detergente neutro) e a determinação da lignina foi feita pelo método da lignina em detergente ácido.

Para a determinação da fibra em detergente neutro (FDN) pesou-se cerca de 0,8 g de amostra, previamente triturada em moinho com peneira de 1 mm, e acondicionou em sacos de tecido não tecido (TNT, 100 g/m²) devidamente identificados. Os sacos foram acondicionados individualmente em coletores universais autoclaváveis e adicionou-se 100 mL de solução detergente neutro (3 % de Lauril sulfato de sódio, 0,4 % de Fosfato de sódio monobásico, 0,6 % de Borato de sódio deca-hidratado, 1,8 % de EDTA, 1 % de etilenoglicol dissolvidos em água destilada quente). Acrescentou-se 50 µl de amilase, estável ao calor. Os coletores foram colocados em autoclave à temperatura de 105°C por 1 hora. Posteriormente os sacos de TNT foram

lavados com água destilada quente (temperatura >90°C) e com acetona para retirada do detergente e deixar secar por 24 horas em estufa ventilada (60°C) e, sequencialmente, por 2 horas em estufa não ventilada (105°C) e acondicionar em dessecador. Depois pesou e anotou os pesos.

A determinação da fibra em detergente ácido (FDA), é feita de modo sequencial a determinação do FDN, utilizando a mesma amostra. Os sacos de TNT contendo as amostras foram acondicionados novamente em coletores universais autoclaváveis e adicionou-se 100 mL de solução detergente ácido (2 % de CTBA – cetiltrimetil amônio brometo, 2,8 % de ácido sulfúrico, dissolvidos em 1000 mL de água destilada). Os coletores foram colocados em autoclave à temperatura de 105°C por 1 hora. Posteriormente os sacos de TNT foram lavados com água destilada quente (temperatura >90°C) e com acetona para retirada do detergente e foram colocados em estufa ventilada (60°C) para secar por 24 horas e, sequencialmente, por 2 horas em estufa não ventilada (105°C) e posteriormente acondicionados em dessecador. Depois pesou-se os sacos e anotou os pesos.

Para a determinação da lignina, colocou-se os resíduos da fibra em detergente ácido em cadinhos filtrantes dentro de uma bandeja com água. Adicionou-se 30 mL de H₂SO₄ 72% (15 °C) em cada cadinho filtrante, para umedecer o conteúdo. Utilizou-se pequeno bastão de vidro em cada cadinho filtrante, para misturar o conteúdo e o ácido em forma de pasta. Adicionou-se mais 30 mL de ácido e mexeu até quebrar todos os grumos, permitindo que o ácido entrasse em contato com todas as partículas da amostra. Adicionou-se mais ácido até a metade do cadinho filtrante e deixou a temperatura ambiente por uma hora.

Após uma hora encheu-se os cadinhos novamente até a metade. Repetiu-se esta operação por três vezes. Depois os cadinhos foram submetidos à filtração sob vácuo até esgotar a solução ácida e em seguida foram lavados por fora e por dentro com água quente (95 a 100 °C). Repetiu-se a operação até a retirada total do ácido. Os cadinhos com os resíduos, foram secos em estufa por oito horas a 100 °C. Posteriormente as amostras foram colocadas em dessecador até o equilíbrio com o ambiente e registrou-se os pesos. Em seguida os cadinhos foram colocados na mufla a 500 °C por duas horas. Os cadinhos foram removidos da mufla quando a temperatura estava abaixo de 150 °C e resfriados em dessecador até o equilíbrio com o ambiente e, feito isso, registrou-se os pesos.

O teor de lignina foi calculado pela perda de peso após a queima na mufla. O teor de celulose foi estimado pela diferença entre o teor de fibra em detergente ácido menos os teores de lignina e cinzas. A hemicelulose foi determinada pela diferença entre FDN e FDA.

Para a determinação de cinzas, pesou-se 2 g, da amostra no cadinho de porcelana (com o peso já registrado) e estes foram colocados em mufla à temperatura de 575 ± 25 °C por três horas. Resfriou-se o cadinho no dessecador até o equilíbrio com a temperatura ambiente e registrou-se o peso final. O teor de cinzas é igual ao peso final da amostra carbonizada dividido pelo peso da amostra inicial.

- **Poder calorífico superior (PCS)**

As análises para determinação do PCS das amostras, foram realizadas no laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM) do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa. As amostras devidamente secas e moídas foram classificadas em peneiras, com malhas de 40 e 60 Mesh. A fração entre 40 e 60 Mesh foi utilizada para a análise imediata, segundo a norma ABNT NBR8112/86 (Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, 1986). A determinação do PCS de cada amostra foi dada pela combustão de 1g do material em bomba calorimétrica e o PCS foi quantificado em Kcal/Kg.

- **Produção de energia potencial**

Para cada amostra a energia potencial produzida foi obtida através da biomassa seca e do poder calorífico superior. A partir desses valores obtidos para às diferentes partes das plantas, foi estimada a energia potencial para a biomassa seca total. Estimada a energia potencial por tonelada, esta foi extrapolada para uma área de 1 hectare sendo expressa em Giga joules (GJ), através da seguinte formula (III):

I) $EP = PCS \times MST$, onde EP é a energia potencial, PCS é o poder calorífico superior e MST é a massa seca total.

5) **Análise estatística**

Os dados foram submetidos a análise de variância pelo Teste F aos níveis de 1 e 5% de probabilidade e, para as variáveis que apresentaram significância, realizou-se teste de médias (Tukey) ao nível de 5% de probabilidade utilizando-se o programa ASSISTAT Versão 7.7 beta (pt).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

• Caracterização agronômica

Houve variação no ciclo de desenvolvimento das cultivares (Figura 2). As cultivares de sorgo forrageiro e sacarino da Embrapa (BRS 655 e BRS 511, respectivamente) foram as mais precoces tanto no primeiro quanto no segundo ciclo (rebrotas), sendo a maturidade fisiológica dos grãos alcançada aos 114 e aos 100 dias após a semeadura, respectivamente. As cultivares de sorgo forrageiro e sacarino da Ceres (BD 1615 e BD 5405, respectivamente) apresentaram um ciclo de 133 e 105 dias, na safra e na rebrota respectivamente. Já as cultivares de sorgo biomassa, BD 7607 e BRS 716 foram as mais tardias, atingindo a maturidade fisiológica aos 146 dias na primeira safra e aos 139 dias na rebrota após a semeadura, independentemente da origem.

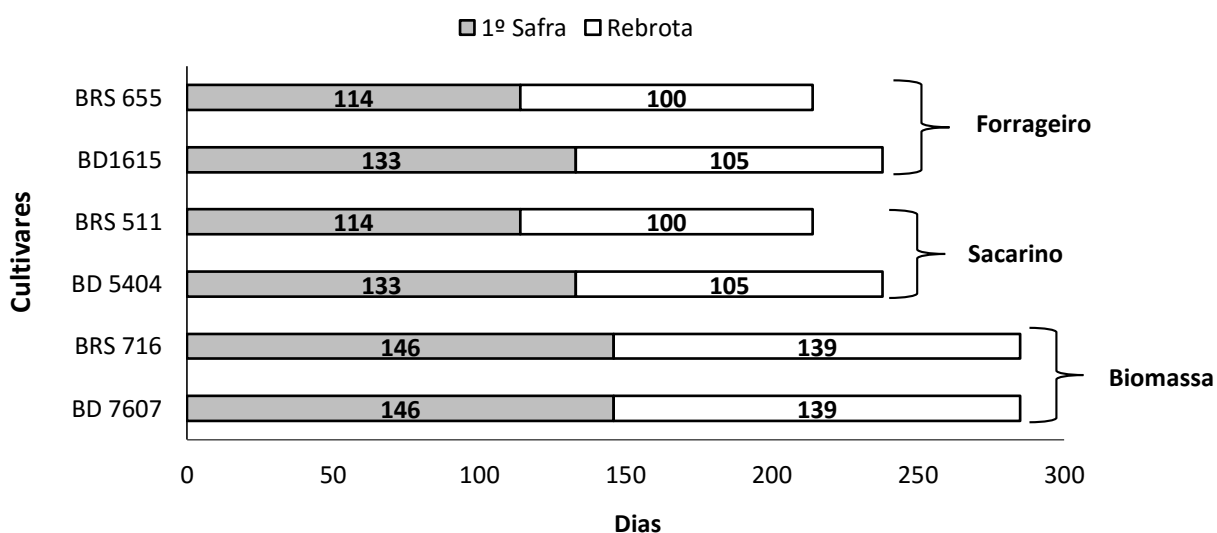


Figura 2. Duração do ciclo da primeira safra e da rebrota, de seis genótipos de sorgo, resultando na duração total dos dois ciclos em dias.

Em condições tropicais, os materiais de sorgo do grupo forrageiro e sacarino possuem ciclo variando de 90 a 120 dias após a germinação, sendo esta fase afetada principalmente pelo fotoperíodo e pela temperatura (Magalhães et al., 2014).

Para cultivares sensíveis ao fotoperíodo como às pertencentes ao grupo do sorgo biomassa (BRS 716 e BD 7607), o florescimento só ocorre após o fotoperíodo indutivo, que é de 12 horas e 20 minutos (Parrella et al., 2010). Nas condições de realização deste trabalho (hemisfério sul), a indução floral destes materiais ocorre a partir de 21 de março e se estende

até setembro. Logo, quando estes materiais são plantados no início do verão (mês de dezembro), o período vegetativo se estende por 4 meses, resultando em elevada produtividade de biomassa.

Por outro lado, quando se faz o plantio, ou utiliza-se a rebrota, no outono (2ª safra), observa-se florescimento precoce, devido ao efeito do fotoperíodo indutivo, resultando em menor produtividade de biomassa, que é agravada pelas condições climáticas limitantes (baixas temperatura e precipitação). Esta situação pode ser observada na redução do ciclo (Figura 2), redução no porte das plantas (Figura 3) e redução da produtividade (Figura 4). Este encurtamento do ciclo é devido ao desenvolvimento da rebrota ter iniciado a partir do mês de março, quando as noites são mais longas. Assim, como o sorgo é uma planta de dias curtos tem a indução do florescimento por noites longas. Estes resultados sugerem que o uso da rebrota é pouco representativo para bioenergia, nestas condições climáticas, visto que a produtividade da mesma foi de no máximo 25% da safra principal (Figura 4).

Observou-se efeito altamente significativo das cultivares (fator 1) e da época de corte (fator 2) para as características: AP, PMF e PMS avaliadas (Tabela 2). Observou-se ainda interação altamente significativa entre os fatores cultivares e cortes, para todas as variáveis estudadas (Tabela 2).

Tabela 2. Resumo da análise de variância dos dados avaliados em duas épocas de corte.

FV	GL	Quadrados Médios		
		AP	PMF	PMS
Blocos	5	3,62 *	1,50 ^{ns}	2,23 ^{ns}
Cultivares	5	126,35 **	71,09 **	47,30 **
Resíduo a	25	16,25	435,93	134,21
Cortes	1	2103,33 **	4334,68 **	2287,56 **
Cultivares x Cortes	5	48,61 **	87,22 **	69,86 **
Resíduo b	30	1,48	662,48	156,39
CV a (%)		5,42	8,85	13,65
CV b (%)		7,77	9,96	13,45

** - Efeito altamente significativo pelo teste F ao nível de 1% de probabilidade; * - Efeito significativo pelo teste F ao nível de 5% de probabilidade; ^{ns} - Não significativo.

Dados: AP: altura de plantas; PMF: produção de massa fresca total; PMS: produção de massa seca total; MS: percentagem de matéria seca.

Pode-se observar que as variedades BD 7607 e BRS 711, pertencentes ao grupo agrônômico do sorgo biomassa apresentaram maior altura na primeira safra, com médias de

5,15 e 4,97 m respectivamente, diferindo significativamente das demais (Figura 3). Já a cultivar de sorgo forrageiro, BRS 655, apresentou a menor altura, com 2,62 m. Essa característica é altamente influenciada pela constituição genética, sendo controlada por genes que atuam de maneira independente sem afetar o número de folhas e a duração do período de crescimento (Magalhães et al., 2014), o que proporcionou a grande variação observada.

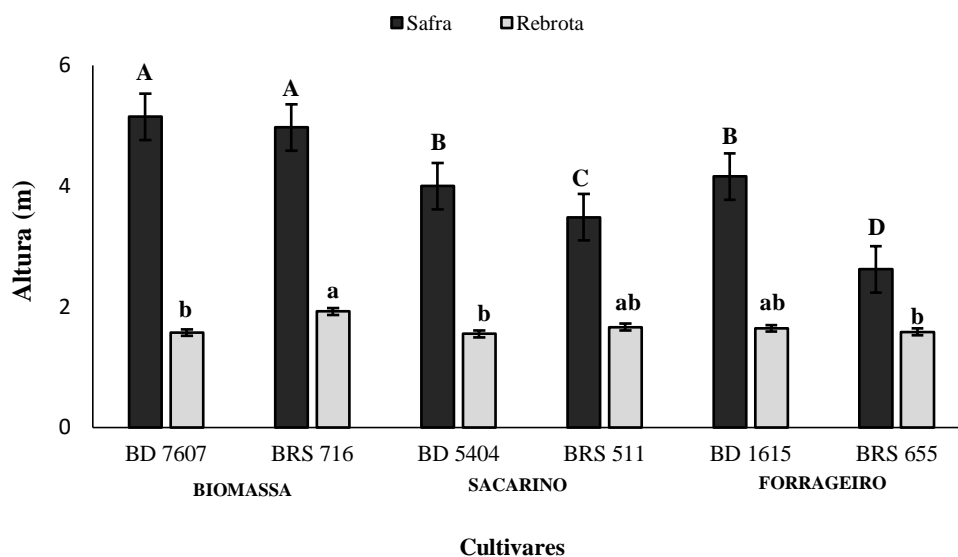


Figura 3. Altura média (m/planta) de seis cultivares de sorgo, em duas épocas de corte (safra e rebrota). Barras seguidas, pela mesma letra maiúscula na safra e mesma letra minúscula na rebrota, não diferem entre si pelo teste de F aos níveis de 1 e 5%. Coimbra –MG, 2015.

Em relação à altura das cultivares no cultivo da rebrota, verificou-se que a cultivar BRS 716 apresentou plantas maiores em relação as demais, com altura média de 1,93 m. Já as demais cultivares não diferiram significativamente entre si alcançando valores de 1,56 a 1,67 m (Figura 3). Botelho et. al., (2010), estudando o comportamento agrônômico de quatro genótipos de sorgo no cultivo da rebrota encontraram valores médios que variaram de 1,77 a 2,35 m, sendo estes valores próximos dos observados neste estudo.

É importante ressaltar que no ciclo da rebrota todas as plantas apresentaram perfilhamento (não avaliado neste trabalho). O sorgo geralmente produz perfilhos em dias curtos e a temperaturas mais baixas (Magalhães et al., 2014). Desta forma, há maior competição pelos fotoassimilados de reserva (carboidratos) e quando estes não são suficientes, há um desenvolvimento limitado da planta.

Os valores da produção de massa fresca total (PMF) das seis cultivares de sorgo, nas duas condições experimentais (safra e rebrota), foram bastante alterados. Em média, observou-se redução de 94% de produção da safra para rebrota em sorgo biomassa, redução de 87% da safra para a rebrota dos sorgos sacarino e forrageiro (BD 5404 e BD 1615, respectivamente) da

Ceres e redução de 75% da safra para a rebrota dos sorgos sacarino e forrageiro (BRS 511 e BRS 655) da Embrapa (Figura 4).

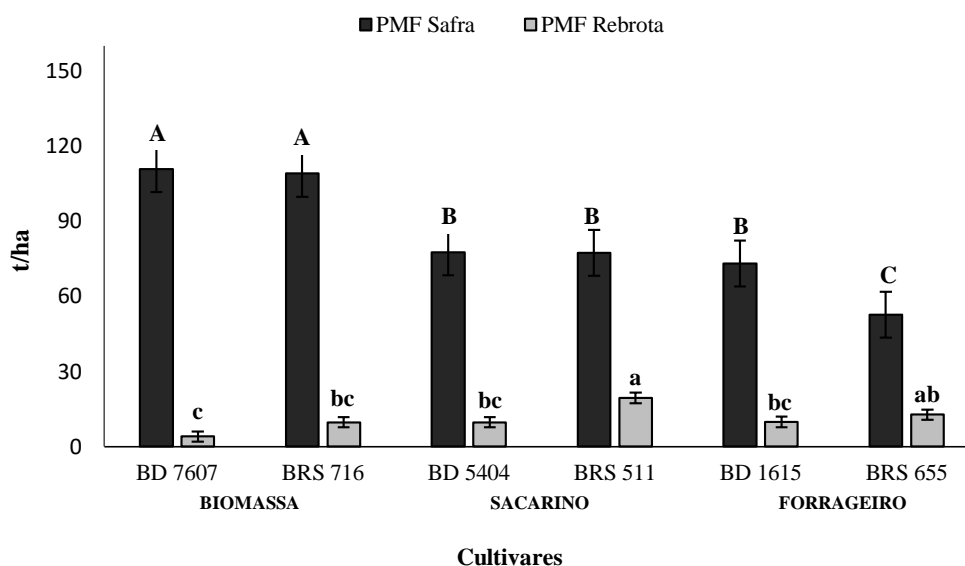


Figura 4. Produção de massa fresca total (t/ha), de seis cultivares de sorgo, em duas épocas de corte (safra e rebrota). Barras seguidas, pela mesma letra maiúscula na safra e mesma letra minúscula na rebrota, não diferem entre si pelo teste de F aos níveis de 1 e 5%. Coimbra –MG, 2015.

Pode-se observar que, na primeira safra, as cultivares BD 7607 e BRS 716 (sorgo biomassa) apresentaram maior produção de massa fresca total (PMV), sendo significativamente superior as demais, com produção média de 110 e 108 t/ha respectivamente. Essas cultivares apresentaram maior ciclo como foi demonstrado (Figura 2), pois são sensíveis ao fotoperíodo. Desta forma, essas cultivares, só iniciaram o desenvolvimento da gema floral quando os dias atingiram o fotoperíodo crítico, ampliando seu ciclo vegetativo e, concomitantemente, maior produção de biomassa por hectare/ciclo em comparação às cultivares insensíveis ao fotoperíodo, que segundo Pereira et al., (2011) possuem ciclo curto florescendo em qualquer época do ano. Já o genótipo BRS 655 (sorgo forrageiro), com o ciclo mais precoce, apresentou a menor produção de massa fresca total, diferindo significativamente das demais, com produtividade média de 52 t/ha.

No cultivo da rebrota, foi verificado uma baixa produção de massa fresca total para todos os cultivares. A baixa produtividade pode estar relacionada à época de cultivo da rebrota, durante o período de outono/inverno, quando as condições climáticas eram limitantes (baixas temperatura e precipitação) influenciando assim o desenvolvimento das plantas. A cultivar com maior produção de massa fresca total na rebrota foi a BRS 511, com 19 t/ha, alcançando apenas 25% da produtividade obtida na primeira safra. Esta cultivar apresentou o menor ciclo de desenvolvimento durante a safra, sendo considerada precoce, desta forma ela iniciou o

desenvolvimento da rebrota em condições climáticas mais favoráveis (maiores temperaturas e precipitação), otimizando o desenvolvimento das plantas. Já a cultivar BD 7607, que apresentou ciclo mais tardio na safra, obteve as menores produções alcançando apenas 3% da produção do primeiro corte, com média de 4t/ha.

Deve-se ressaltar ainda que, no período de abril a setembro de 2015, durante o desenvolvimento das plantas na rebrota, a precipitação total acumulada foi de apenas 205 mm. Isto pode ter afetado o desenvolvimento das plantas de sorgo, resultando em menor produção de biomassa, em relação à safra anterior. Segundo Sans et al. (2003), o consumo de água pela cultura do sorgo varia entre 380 e 600 mm durante seu ciclo e de acordo com seu estágio de desenvolvimento. Desta forma, pode-se afirmar que a deficiência hídrica atenuou a baixa produtividade. Esses resultados corroboram com os encontrados por Rezende et al. (2011), que observaram uma redução no rendimento da biomassa devido à precipitação inferior, relatando que o aproveitamento da rebrota pode ser viável, desde que as condições de temperatura e umidade do solo antes e após o corte sejam satisfatórias para o desenvolvimento vegetativo.

A produção de massa seca total (PMS) também diferiu significativamente entre as cultivares, nas duas condições experimentais (Figura 5).

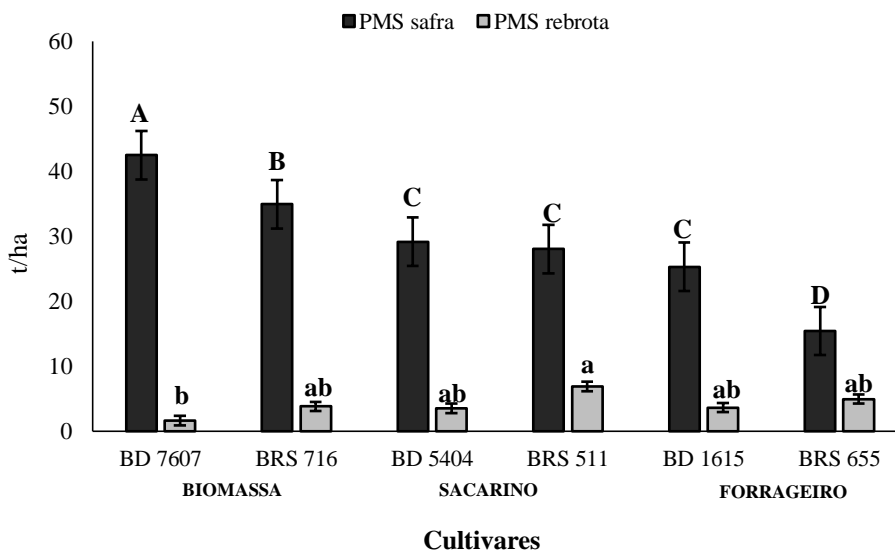


Figura 5. Produção de massa seca total (t/ha), de seis cultivares de sorgo, em duas épocas de corte (safra e rebrota). Barras seguidas, pela mesma letra maiúscula na safra e mesma letra minúscula na rebrota, não diferem entre si pelo teste de F aos níveis de 1 e 5%. Coimbra –MG, 2015.

Foi observado que a produção de massa seca total seguiu a mesma tendência apresentada pela produção de massa fresca total, com as maiores produções observadas para o sorgo da safra, em função principalmente da altura da planta e da duração do ciclo das cultivares. É

importante salientar que a produção de massa seca total depende também do teor de matéria seca da planta no momento do corte.

Na safra, a cultivar BD 7607 (sorgo biomassa) apresentou a maior produção de massa seca total com 43 t/ha sendo significativamente superior às demais. A cultivar BRS 716 (sorgo biomassa) apresentou a segunda maior produção de massa seca total, com 35 t/ha, diferindo significativamente das demais cultivares. A cultivar BRS 655 obteve a menor produção com 16 t/ha (Figura 5). Já na rebrota, a cultivar BRS 511 (sorgo sacarino) apresentou os maiores valores de massa seca total, com 7t/ha.

Quando comparado a outras culturas utilizadas na bioenergia, o sorgo se destaca por possuir ciclo curto e alto potencial de produção de matéria seca. O eucalipto por exemplo, a planta mais comum no Brasil para produzir celulose e carvão vegetal, produz até 20 toneladas de biomassa seca por hectare/ano, em média, porém necessita de cinco anos para alcançar porte adequado para corte (Silva, 2010). Já as cultivares de sorgo biomassa deste estudo, produziram em média 40 t/ha de massa seca em aproximadamente cinco meses, no cultivo da safra.

Diante dos altos níveis de produtividade alcançados, as cultivares de sorgo biomassa apresentam-se como alternativa promissora no fornecimento de matéria prima para o setor bioenergético. Esta biomassa pode ser utilizada para queima direta na geração de vapor (produção de energia) e/ou ainda para produção de ração animal, fabricação de papel, hidrólise para gerar álcool entre outros. Além disto, por serem colhidos entre de março a abril, o sorgo pode complementar a oferta de matéria-prima no período de entressafra da cana-de-açúcar, quando não há mais bagaço de cana para queima e geração de energia nas usinas (Unica, 2012).

Já a rebrota apresentou um baixo rendimento de massa seca, em relação à safra. Desta forma, a rebrota não apresenta potencial produtivo para ser utilizada como matéria prima na produção de bioenergia.

Na produção de biomassa total (somatório das duas safras), foi observado que as cultivares de sorgo biomassa, BD 7607 e BRS 716, apresentaram as maiores produções tanto de massa fresca (115 e 119 t/ha respectivamente) como de massa seca total (44 e 39 t/ha respectivamente), isso se deve principalmente ao desenvolvimento dessas cultivares na primeira safra (Figura 6). Porém, deve-se ressaltar que estes materiais levaram, aproximadamente, 10 meses para alcançar essa produtividade, com média de 0,14 t/ha/dia de matéria seca produzida.

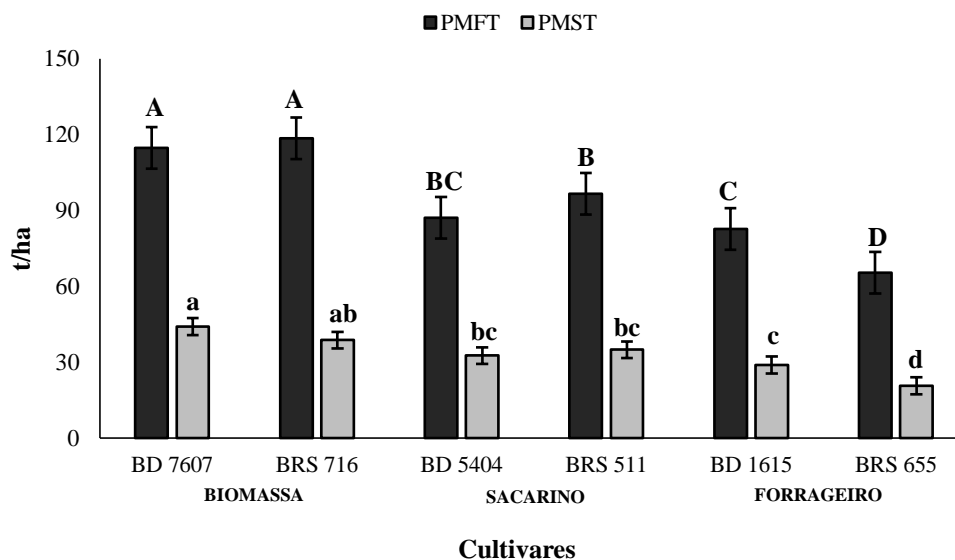


Figura 6. Produção de massa fresca total (PMF) e produção de massa seca total (PMS), avaliando o somatório da safra com a rebrota, de seis cultivares de sorgo. Barras seguidas, pela mesma letra maiúscula na safra e mesma letra minúscula na rebrota, não diferem entre si pelo teste de F aos níveis de 1 e 5%. Coimbra – MG. 2015

Para a cultivar BRS 655 (sorgo forrageiro), foram obtidas as menores produtividades tanto de massa fresca como de massa seca total, sendo significativamente inferior as demais cultivares, alcançando uma produção de 65t/ha e 20 t/ha, respectivamente. A cultivar BRS 655 produziu em média 0,09 t/ha/dia de matéria seca em aproximadamente 7 meses de duração dos dois ciclos. De acordo com estes resultados, pode-se afirmar que a produção da biomassa total das cultivares seguiu o padrão encontrado na safra, devido ao baixo rendimento obtido na rebrota.

Foi observado que as cultivares de sorgo sacarino e forrageiro apresentaram produção média de massa fresca e massa seca total, obtida nos dois ciclos, de 83 e 29 t/ha, respectivamente. Já as cultivares de sorgo biomassa apresentaram produtividade média de massa fresca e massa seca na safra de 109 e 39 t/ha, respectivamente. Assim, pôde-se concluir que os materiais de sorgo biomassa apresentam maior potencial produtivo, produzindo em um ciclo (aproximadamente 5 meses) maior quantidade de biomassa por unidade de área do que os cultivares de sorgo sacarino e forrageiro em dois ciclos consecutivos (aproximadamente 7 e 8 meses). Desta forma o uso da rebrota é pouco vantajoso principalmente para os materiais de ciclo longo (sorgo biomassa), uma vez que, o potencial produtivo total destas cultivares é definido pelo cultivo da safra principal.

Observou-se interação altamente significativa entre a época de corte e os componentes físicos (panícula, folha e colmo) das plantas, para todas as cultivares (Tabela 3).

Tabela 3. Participação percentual dos componentes físicos (panícula, folhas e colmo) na matéria seca da planta de seis cultivares de sorgo, avaliados em duas condições experimentais (safra e rebrota).

		Componentes				
		Panícula (%)	Folha (%)	Colmo (%)	Massa Seca (t/ha)	
Biomassa	BD 7607	Safra	15,80 bB	13,09 bB	72,94 aA	43,63
		Rebrota	25,24 bA	18,82 cA	55,94 aB	1,68
	BRS 716	Safra	5,22 cB	18,27 bA	77,10 aA	41,04
		Rebrota	26,70 bA	16,33 cA	56,97 aB	3,87
Sacarino	BD 5404	Safra	6,14 cB	19,79 bA	74,38 aA	24,36
		Rebrota	22,20 bA	17,73 cB	60,08 aB	3,55
	BRS 511	Safra	0,99 cB	17,78 bB	81,23 aA	26,23
		Rebrota	12,87 cA	21,87 bA	64,26 aB	6,93
Forrageiro	BD 1615	Safra	5,92 cB	14,15 bA	79,94 aA	22,95
		Rebrota	29,56 bA	18,10 cA	54,01 aB	3,66
	BRS 655	Safra	18,87 bB	25,55 bA	53,58 aA	19,8
		Rebrota	42,24 aA	13,64 bB	44,31 aB	5,29

Médias seguidas pela mesma letra, minúscula na linha e maiúscula na coluna, não diferem estatisticamente entre si a 5% de probabilidade, pelo teste F para época de corte e pelo teste Tukey para os componentes físicos da planta.

Pode-se observar que na safra, a participação percentual de panícula na massa seca total foi inferior aos demais componentes da planta para as cultivares: BRS 716, BD 5404, BRS 511 e BD 1615. Já para as cultivares BD 7607 e BRS 655, a participação da panícula não diferiu estatisticamente da folha. Para as cultivares que possuem colmo suculento (BD 5404, BRS 511 e BD 1615), a menor participação da panícula é vantajosa para um bom rendimento do caldo visando a produção de etanol, uma vez que, ao final do ciclo vegetativo do sorgo sacarino ocorre a translocação dos fotoassimilados armazenados no colmo (sacarose) para o enchimento dos grãos presentes na panícula (Ribas, 2014). Neste processo, ocorre competição por fotoassimilados diminuindo assim a quantidade de sacarose presente nos colmos. Segundo May et al (2012), para viabilizar a produção de etanol do sorgo sacarino é necessário a obtenção de níveis

mínimos de produção de açúcar e açúcares redutores totais (ART) no caldo, desta forma para uma conversão eficiente em etanol é importante uma maior concentração de açúcares no caldo.

A participação da panícula variou entre as épocas de corte para todas as cultivares, sendo inferior na safra. Na rebrota a cultivar BRS 655 (sorgo forrageiro) apresentou uma alta participação da panícula, com 42%, não diferindo estatisticamente da participação do colmo sendo ambas superior a folha. Dentre os fatores que afetam a proporção de panícula, o tipo de sorgo é uma das variáveis que deve ser considerada. Os genótipos forrageiros, como é o caso da cultivar BRS 655, conseguem conciliar produção de massa e grãos, justificando essa superioridade na produção de panícula (Botelho et al., 2010). Além disto, a maior porcentagem de panículas contribui para o aumento da qualidade da silagem e tem grande participação na elevação da porcentagem de matéria seca da massa ensilada, em virtude do seu menor conteúdo de água (Corrêa et. al., 1996). Desta forma, esses, materiais poderiam ser melhor explorados no setor bioenergético, a partir da produção de etanol de 2ª geração (biomassa) e também o aproveitamento do grão para etanol a partir de amido do grão.

A participação percentual das folhas na matéria seca das plantas não diferiu estatisticamente entre a safra e a rebrota, apenas para as cultivares BRS 716 e BD 1615. Para as cultivares BD 5404 e BRS 655 houve maior produção na safra, e para as cultivares BD 7607 e BRS 511 houve maior produção de folhas na rebrota.

Foi observado que o colmo foi o componente físico da planta com maior participação percentual para todas as cultivares, tanto na safra como na rebrota, sendo estatisticamente superior aos demais componentes. Quando comparado as duas épocas de corte, pode-se observar que a participação de colmos na safra foi estatisticamente superior a encontrada na rebrota. Este resultado pode ser explicado em função do aumento do estande na rebrota devido ao perfilhamento, o que pode ter ocasionado um aumento na competição por fotoassimilados, reduzindo o desenvolvimento dos colmos e diminuindo a sua proporção nas plantas.

Esses resultados demonstram que o colmo é a porção da planta de sorgo que mais influencia no rendimento produtivo das cultivares, além de ser o componente físico da planta que irá contribuir em maior quantidade na co-geração de biocombustíveis sólidos/líquidos.

- **Caracterização estrutural das partes da planta**

Devido ao rendimento pouco significativo das plantas na rebrota, a caracterização estrutural e energética dos componentes das plantas de sorgo foi realizada apenas para as plantas cultivadas na safra.

Teor de umidade (TU)

O teor de umidade está relacionado ao tipo de amostra e a época que foi colhida. As amostras de sorgo apresentaram teor de umidade variando de 30 a 70 %. Na Tabela 4 estão representados os resultados do teor de umidade médio das amostras analisadas.

Tabela 4. Teor de umidade das partes (panícula, folhas, colmo e bagaço) de seis cultivares de sorgo. Coimbra, MG.

Partes	Cultivar					
	BD 7607	BRS 716	BD 5404	BRS 511	BD 1615	BRS 655
	Umidade (%)					
Panícula	50,90 b	54,69 b	42,15 c	30,71 c	60,65 b	38,95 c
Folha	44,03 b	51,77 b	59,29 b	61,87 a	55,80 c	65,10 b
Colmo	65,38 a	70,57 a	65,85 a	66,95 a	65,10 a	77,43 a
Bagaço	-	-	47 c	56,62 b	46,50 d	-
Média	53,17	59,01	55,76	53,17	57,01	60,49
CV	8,61	7,22	4,19	6,12	3,87	5,43

Médias seguidas pela mesma letra, minúsculas nas colunas, não diferem entre si a 5% de probabilidade, pelo teste Tukey.

Pode-se observar diferença significativa entre as partes avaliadas para uma mesma cultivar. O teor de umidade no componente colmo foi significativamente superior aos demais componentes da planta, para todas as cultivares, variando de 65,10% para a cultivar BD 1615 a 77,43 % para a cultivar BRS 655. Porém a cultivar BRS 511 não apresentou diferença significativa entre o teor de umidade do colmo e da folha e estes foram significativamente superiores as demais partes.

O teor de umidade médio encontrado no bagaço de sorgo para as cultivares BD 1615, BRS 511 e BD 5404 foi de 47%, 56,62% e 46,50 %, respectivamente. Estes valores foram próximos ao encontrado por Silva e Morais (2008) para o bagaço de cana, aproximadamente 50% de umidade.

Segundo Demirbas (2004), um alto teor de umidade gera uma redução na eficiência do processo de conversão da biomassa em combustível, pois a energia necessária para evaporar a água e manter a temperatura de operação se obtém pela alimentação de mais combustível e oxidante. 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 conseqüentemente para a produção de calor (Vieira, 2012). Pela Tabela 4 observa-se que o colmo do sorgo é o resíduo com maior umidade, necessitando antes do início

do processo de combustão uma secagem para que o mesmo libere energia suficiente ao processo de queima.

Teor de hemicelulose

Com exceção da cultivar BD 7607 que apresentou o maior teor de hemicelulose nas folhas, as demais cultivares apresentaram maior teor de hemicelulose na panícula variando de 28 a 45%, sendo superior aos componentes folha e colmo (Tabela 5). Esses resultados diferem dos encontrados por Neumann et al (2002), ao analisar a composição bromatológica de híbridos de sorgo. Segundo estes autores, a panícula foi o componente da planta que apresentou menores teores de hemicelulose, variando de 15 a 24%, quando comparada aos componentes colmo e folhas, caracterizando-se como a porção da planta de maior valor nutritivo sendo destinada principalmente a alimentação animal. A panícula das cultivares em estudo, apresentam maior teor de hemicelulose, desta forma além do uso tradicional (alimentação animal), estes componentes podem ser destinados à extração de hemicelulose.

A hemicelulose é um polímero heterogêneo formado por monômeros (Jenkins et al., 1998). A xilose é a pentose mais abundante na hemicelulose dos materiais lenho celulósicos (Godin et al., 2011). Este açúcar tem sido usado na produção de furfural, um solvente seletivo utilizado em larga escala na purificação de óleos minerais, vegetais e animais (Lange, 2012). Além disto, a xilose pode ser utilizada para outros fins, como para a produção de xilitol (Lange, 2012), um produto de maior valor agregado, muito utilizado na indústria alimentícia como adoçante, por ser tão doce quanto à sacarose, mas cerca de 40% menos calórico (Santos, 2012).

Dentre as cultivares, a BRS 655 (sorgo forrageiro) apresentou um dos maiores valores para a participação de panícula na massa seca total da safra, com 18,87% (Tabela 3), produzindo em média 5,5 t/ha de panícula (Figura 5). Como os teores de hemicelulose encontrados nas panículas desta cultivar foram altos, em média 45 %, foi gerado cerca de 2,5 t/ha de hemicelulose. Assim a panícula desta cultivar pode ser destinada a geração de produtos como furfural e xilitol.

Tabela 5. Médias do teor de hemicelulose, celulose, lignina e cinzas das diferentes partes da planta, de acordo com o cultivar de sorgo.

Tipo de sorgo	Parte	Cultivar BD 7607				
		Hemicelulose (%)	Celulose (%)	Lignina (%)	Cinzas (%)	Extrativos (%)*
Biomassa	Panícula	28,59 b	8,38 b	6,22 b	1,98 b	54,83
	Folha	34,45 a	23,36 a	5,6 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	-
	CV	8,01	19,03	12,26	21,82	-
		Cultivar BRS 716				
	Parte	Hemicelulose (%)	Celulose (%)	Lignina (%)	Cinzas (%)	Extrativos (%)*
Biomassa	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	22,1	7,91	6,50	-
	CV	13,66	24,18	18,86	12,56	-
		Cultivar BD 5404				
	Parte	Hemicelulose (%)	Celulose (%)	Lignina (%)	Cinzas (%)	Extrativos (%)*
Sacarino	Panícula	38,44 a	11 c	4,91 b	7,08 b	38,57
	Folha	35,08 ab	21,93 b	6,15 b	10,47 a	26,37
	Colmo	28,86 b	25,33 b	7,41 b	3,73 c	34,67
	Bagaço	30,46 b	33,74 a	10,08 a	3,67 c	22,05
	Média	32,93	23,12	7,89	6,23	-
	CV	9,68	14,88	19,69	13,03	-
		Cultivar BRS 511				
	Parte	Hemicelulose (%)	Celulose (%)	Lignina (%)	Cinzas (%)	Extrativos (%)*
Sacarino	Panícula	41,19 a	20,31 b	5,06 b	8,63 a	24,81
	Folha	32,98 b	20,04 b	3,50 b	8,41 a	35,07
	Colmo	25,55 c	31,13 a	9,16 a	5,03 b	29,13
	Bagaço	28,14 bc	29,61 a	8,56 a	3,16 b	30,53
	Média	31,96	25,98	6,7	6,31	-
	CV	8,32	9,89	12,7	18,22	-
		Cultivar BD 1615				
	Parte	Hemicelulose (%)	Celulose (%)	Lignina (%)	Cinzas (%)	Extrativos (%)*
Forrageiro	Panícula	37,46 a	19,05 b	5,29 a	2,82 c	35,38
	Folha	34,70 ab	26,43 a	6,86 a	10,68 a	21,33
	Colmo	31,89 b	28,68 a	6,07 a	6,80 b	26,56
	Bagaço	36,85 ab	28,27 a	6,96 a	5,67 b	22,25
	Média	34,61	24,46	6,11	6,49	-
	CV	5,24	10,74	17,32	14,44	-
		Cultivar BRS 655				
	Parte	Hemicelulose (%)	Celulose (%)	Lignina (%)	Cinzas (%)	Extrativos (%)*
Forrageiro	Panícula	45,58 a	7,59 b	6,25 a	5,56 a	35,02
	Folha	33,90 b	27,38 a	5,71 a	7,77 a	25,24
	Colmo	32,62 b	22,44 a	5,43 a	7,59 a	31,92
	Média	37,37	19,13	5,79	6,97	-
	CV	3,29	15,24	15,58	18,12	-

Médias seguidas pela mesma letra, minúsculas nas colunas, não diferem entre si a 5% de probabilidade, pelo teste Tukey. (*) O teor de extrativo não foi avaliado neste trabalho.

Teor de Celulose

Foi observado que a panícula foi o componente que apresentou os menores valores médios de celulose comparada aos demais componentes da planta, variando de 8 a 20% para as cultivares BD 7607 e BRS 511 respectivamente. Já os componentes folha, colmo e bagaço (para as cultivares BD 1615, BRS 511 e BD 5404) apresentaram os maiores teores de celulose, não diferindo estatisticamente entre si (Tabela 5).

A celulose é um polímero biodegradável de grande importância comercial, devido a sua larga aplicação em fios para a indústria de papel, têxtil, filtros, filmes fotográficos transparentes, pigmentados, materiais plásticos, cápsulas para a indústria farmacêutica, entre outros (Braz et al., 2015). Durante o processamento do sorgo pelas indústrias, somente o colmo tem sido utilizado na fabricação de produtos como: o etanol (primeira e segunda geração), a bioeletricidade e a queima direta (Braz et al., 2015). As demais partes (panícula e folhas) têm sido descartados como rejeito agroindustrial, utilizados para a produção de ração animal ou como fonte energética para a própria indústria, na pirólise dos resíduos (Oliveira et al., 2009). Porém, esses materiais podem ser utilizados como fonte alternativa na extração de celulose.

O bagaço, das cultivares em estudo, apresentou bom rendimento de celulose em torno de 30% (Tabela 5). Esse valor é aproximado do teor de celulose encontrado em resíduos agroindustriais como palha de trigo (34%), bagaço de cana (40%), sabugo de milho (32%) e palha de sorgo (34%) estudados por Silva (2010). É um pouco inferior ao teor de celulose encontrado em madeira de *Eucalyptus globulus*, que apresenta em torno de 46% (Silva, 2010).

O bagaço das cultivares BD 5404, BRS 511 e BD 1615 é oriundo do colmo das mesmas, e este foi o componente que apresentou as maiores participações na biomassa total (Tabela 3). Desta forma, o bagaço possui elevada produção por hectare e custos de produção reduzidos, quando comparados à outras culturas podendo ser utilizado para a extração de celulose e geração de biomateriais. A utilização do bagaço de sorgo para este fim implicaria na redução do desgaste ambiental e do desmatamento de grandes áreas vegetais (Quilho, 2011).

Ainda vale destacar a possibilidade de produção de bioetanol de segunda geração a partir do bagaço de sorgo sacarino. O processo ocorre através de hidrólise enzimática ou ácida da celulose, onde o bagaço é submetido ao processo de extração de açúcares com adição de ácido sulfúrico a altas temperaturas ou com uso de enzimas específicas, e então obtém-se os açúcares na forma fermentescível (Gnansounou & Dauriat, 2005).

Teor de Lignina

O teor de lignina apresentou comportamento distinto para as cultivares em estudo (Tabela 5). As cultivares BD 7607 e BRS 716 (sorgo biomassa) apresentaram teor de lignina maior para o colmo diferindo estatisticamente das demais partes. Para as cultivares BD 5404 e BRS 511 (sorgo sacarino), o bagaço e o colmo não diferiram estatisticamente entre si, sendo ambos estatisticamente superiores as outras partes avaliadas.

Já as cultivares BD 5404 e BRS 655 (sorgo dupla aptidão e forrageiro, respectivamente) não apresentaram diferença significativa para o teor de lignina entre as partes da planta avaliadas, sendo todas estatisticamente iguais.

A lignina possui uma estrutura bem mais complexa do que a da celulose e da hemicelulose devido à presença de diversas unidades precursoras (Saidur et al 2011). A lignina não é fermentável e sua estrutura pode influenciar a degradação térmica da biomassa, elevando o seu poder calorífico superior (Jenkins et al 1998). Desta forma, como os componentes colmo e bagaço apresentaram maior teor de lignina dentre os demais, ambos têm potencial para à geração de bioeletricidade e calor através da queima direta.

As cultivares de sorgo biomassa (BD 7607 e BRS 716) apresentaram alto potencial de lignina nos colmos. Além disto, essas cultivares apresentaram uma alta produtividade, cerca de 30t/ha de colmo seco, por isto são melhor indicadas para geração de biocombustíveis sólidos, isto é queima direta para gerar vapor/energia. Já as cultivares de sorgo forrageiro apresentaram menor teor de lignina nos colmos, em relação às demais cultivares, assim este material provavelmente será mais susceptível à hidrólise, e, conseqüentemente gerará mais açúcares para a produção de etanol de segunda geração, sendo indicado para a geração de biocombustíveis líquidos.

Teor de cinzas

Os valores encontrados para o teor de cinzas variaram de 1,98 a 10,68 % (Tabela 5). Esses valores estão próximos aos obtidos por outras culturas energéticas como sabugo de milho e bagaço de cana que apresentaram valores de 1,1 e 11,3 respectivamente (Demirbas, 2004). Pode-se observar que maiores teores de cinzas foram encontrados nas folhas das cultivares (Tabela 5), com valores variando de 5,51 a 10,68 % para as cultivares BD 7607 e BD 1615.

A cinza vegetal, resíduo sólido proveniente da queima de biomassa vegetal, apresenta em sua composição quantidades razoáveis de macro e micronutrientes. Esse resíduo é eficiente na redução da acidez e melhora a fertilidade do solo isto envolve a diminuição do teor de H+Al,

aumento de pH e dos teores de magnésio, fósforo e potássio, tendo assim potencial para serem utilizadas como adubo e corretivo (Bonfim-Silva et al., 2013).

Vale ressaltar que as folhas foram as partições das plantas que apresentaram maior poder calorífico superior (Figura 7). Desta forma, as folhas podem ser utilizadas primeiramente na geração de biocombustíveis sólidos (através da queima direta) e posteriormente suas cinzas podem ser utilizadas como adubo do solo.

A participação das folhas na biomassa total, variou de 13% para a cultivar BD 7607 a 25 % para a cultivar BRS 655 (Tabela 3), produzindo em média 6 a 4t/ha de folhas, respectivamente. Dessa forma, além de usualmente serem utilizadas para silagem animal, as folhas produzidas por essas cultivares podem ser utilizadas na queima direta e posteriormente como adubo.

- **Caracterização energética**

- Poder calorífico superior (PCS)**

O PCS é um fator importante na geração de energia, pois reflete a quantidade de calorias liberadas por um material em sua combustão completa (Quirino, 2011).

Pode-se observar que o PCS das partes das cultivares variou de 4220 a 4590 kcal/kg (Figura 7). Demonstrando que há fatores intrínsecos na composição das partes das plantas que influênciam no poder calorífico superior.

Quando se comparam os valores obtidos nas análises de poder calorífico dos genótipos avaliados com outras culturas energéticas com a mesma finalidade, como os analisados por Paula et al., (2011) bagaço da cana (4274,48 Kcal/kg), caule de milho (4211,88 Kcal/kg) e eucalipto (4774 à 8248 kcal/kg), pode-se inferir que o sorgo possui um alto valor calorífico, podendo ser utilizado como fonte de matéria prima na bioenergia.

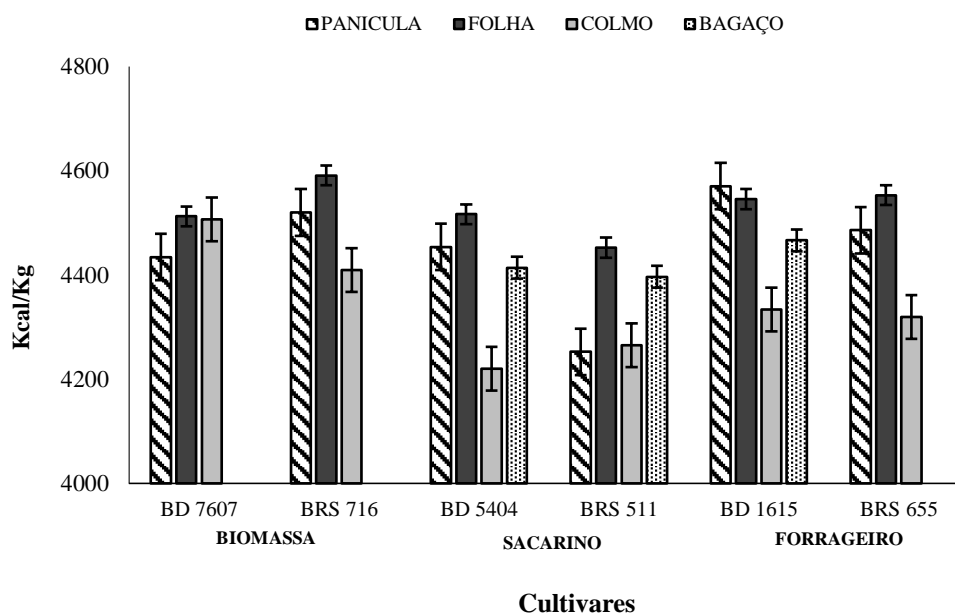


Figura 7. Poder Calorífico Superior (PCS) das partes da planta de seis cultivares de sorgo.

Devido ao seu elevado PCS, alguns pesquisadores asseguram que o sorgo pode ser utilizado em substituição à algumas culturas devido suas características de produção. Quando comparado ao eucalipto, o sorgo possui a vantagem de ser cultivado num curto período de tempo (4 a 8 meses) otimizando a cadeia produtiva. E quando comparado a cana-de-açúcar, o sorgo possui a vantagem de atingir 50% de umidade enquanto ainda está na lavoura, ao invés de necessitar de estocagem e tratamento do bagaço como a cana-de-açúcar (Silva e Morais, 2008).

As folhas foram os componentes que apresentaram maiores valores de poder calorífico superior (Figura 7). Porém vale a pena ressaltar que este componente apresentou o maior teor de cinzas, comparado às demais partes, e este quando em alta concentração pode diminuir o poder calorífico, além de causar perda de energia e afetar também a transferência de calor (Qui-rino et al., 2005).

Este resultado demonstra que o teor de cinzas nas folhas não é tão expressivo a ponto de influenciar negativamente o PCS das folhas. Isto demonstra que, além da composição química determinada na Tabela 4, é necessário realizar a análise elementar para determinação da razão entre as populações de átomos de hidrogênio/carbono e oxigênio/carbono da biomassa. Segundo McKendry (2002), quanto maior a proporção de oxigênio e hidrogênio, em comparação com o carbono, o valor energético de um combustível é reduzido, devido a menor energia contida na ligação entre carbono e oxigênio do que em ligações entre moléculas de carbono.

Para as cultivares que apresentaram o colmo suculento (BD 5404, BRS 511 e BD 1615), foi possível verificar maior valor de PCS no bagaço em relação ao colmo das mesmas. Desta forma, pode-se afirmar que o caldo presente nos colmos diminui o PCS do mesmo, quando se considera a queima direta sem a extração do caldo.

Energia potencial

A energia potencial da biomassa seca de sorgo foi calculada para as cultivares em estudo (Figura 8), obtida pelo produto dos valores da massa seca total/ha e do poder calorífico superior de cada parte (colmo, folha, panícula e bagaço).

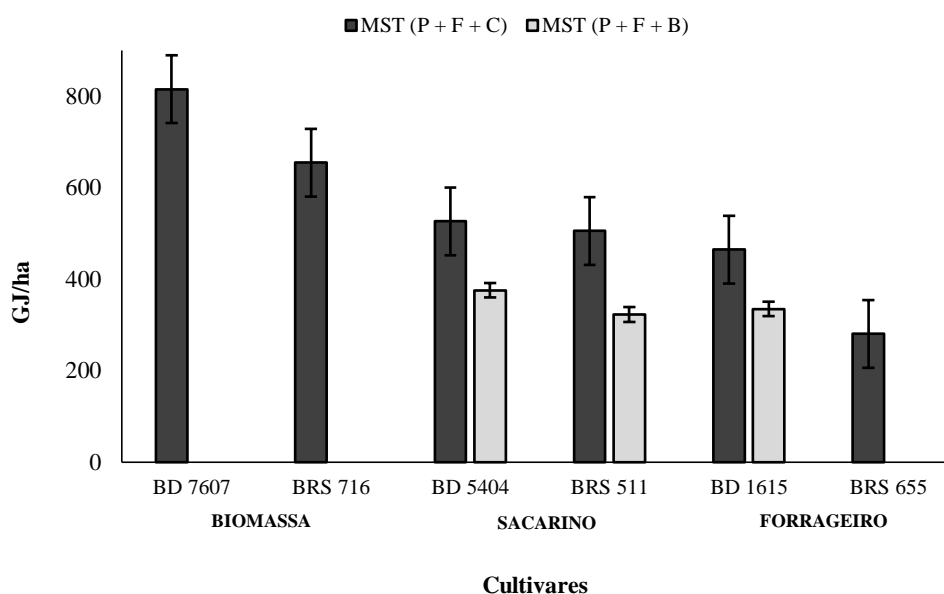


Figura 8. Produção total de energia/ ha/ciclo (GJ) da matéria seca total (P= panícula, F= folha, C= colmo e B= bagaço) de seis cultivares de sorgo. Coimbra- MG, 2015.

A energia potencial total produzida pelas cultivares de sorgo variou de 280 a 815 GJ/ha. As cultivares de sorgo biomassa BD 7607 e BRS 716 apresentaram os maiores valores de produção de energia por hectare com 815 e 654 GJ, respectivamente. Já a cultivar de sorgo forrageiro BRS 655, apresentou a menor produção de energia por hectare com 280 GJ. A cultivar BD 1615 (sorgo forrageiro) e as cultivares BRS 511 e BD 5404 (sorgo sacarino) apresentaram valores de produção de energia aproximados, com 464, 505 e 526 GJ/ha, respectivamente.

Quando foi considerado a proporção do bagaço ao invés do colmo na soma da biomassa total, para as cultivares que apresentaram o colmo suculento, pode-se observar que a produção potencial de energia foi menor com valores variando de 320 a 370 GJ/ha, isso é devido a menor

proporção de massa seca presente no bagaço. Isso demonstra que mesmo apresentado maior PCS, a conversão do bagaço em energia foi menor devido a diminuição da massa do mesmo após a extração do caldo.

As cultivares de sorgo em estudo apresentaram, em média, a produção de 18 GJ de energia por tonelada de matéria seca (GJ/t) a partir da biomassa seca total. Esses resultados estão próximos dos encontrados para o bagaço de cana-de-açúcar, que apresentam valores de 17,89 GJ/t e 17,40 GJ/t (Evaristo et al., 2015 e Lizcano, 2015). Em comparação ao bagaço da cana-de-açúcar, um resíduo amplamente utilizado para a geração de bioeletricidade em parques industriais no Brasil, pode-se afirmar que o sorgo apresenta potencial bioenergético característico para ser amplamente utilizado no setor energético.

Além disto, observou-se que as cultivares mantiveram um padrão de produção da energia total em relação a produção de matéria seca total, ou seja, quanto maior foi a PMS maior foi a produção total de energia por cultivar. Podendo afirmar que há uma relação direta entre a produção de matéria seca total e a produção potencial de energia/ha das cultivares.

CONCLUSÕES

Conclui-se que as cultivares de sorgo apresentaram maior potencial produtivo na safra, sendo as cultivares BD 7607 e BRS 716 pertencentes ao grupo do sorgo biomassa as mais produtivas com características potenciais para serem utilizadas na combustão direta e cogeração de energia. As cultivares de sorgo biomassa apresentaram maiores produções de matéria seca/ha e concomitantemente os maiores valores de produção de energia por hectare considerando a queima direta dos materiais.

Já na rebrota houve uma redução significativa na biomassa total produzida pelas cultivares, principalmente para os materiais de ciclo longo. Observou-se redução de 94% de produção da safra para rebrota em sorgo biomassa, redução de 87% da safra para a rebrota dos sorgos sacarino e forrageiro (BD 5404 e BD 1615, respectivamente) e redução de 75% da safra para a rebrota dos sorgos sacarino e forrageiro (BRS 511 e BRS 655).

Os componentes físicos da planta apresentam diferentes potenciais de uso devido a composição estrutural e sua proporção na biomassa total. O colmo foi a parte com maior participação, cerca de 70%, da biomassa total sendo o mais indicado para fins bioenergéticos. Por fim, verificou-se que o sorgo apresenta diferentes potenciais de uso que podem ser explorados pelo setor bioenergético de acordo com a parte física da planta e, ou, em novos processos, como etanol de 2ª geração e amiláceo a partir do sorgo forrageiro, extração de celulose, dentre outras.

AGRADECIMENTOS

À CAPES, CNPq e FAPEMIG pelas bolsas de estudo concedidas aos estudantes de mestrado e iniciação científica e, à FUNARBE (Programa Funarpec) pelo financiamento do Programa Sorgo da UFV.

REFERÊNCIAS

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (2014) **Boletim anual de preços**.

Bonfim-Silva, E. M.; Cabral, C. E. A.; Silva, T. J. A.; Moreira, J. C. F.; Carvalho, J. C. S. Vegetable ash: productive characteristics and chlorophyll in palisadegrass. **Bioscience Journal**, v. 29, p. 5, 2013.

Botelho, P. R. F.; Pires, D. A. A.; Sales, E. C. J.; Rocha júnior, V. R.; Jayme, D. G.; Reis, S. T. Avaliação de genótipos de sorgo em primeiro corte e rebrota para produção de silagem. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 9, p. 287-297, 2010.

BP - British Petroleum, 2016, **Energy Outlook**. Disponível em: <http://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics.html>; Acesso em 09 de maio de 2016.

Braz, L. M. M.; Ascheri, D. P. R. **Extração e caracterização da celulose do bagaço de sorgo sacarino (Sorghum bicolor L. Moench)**. III Congresso de Ensino Pesquisa e Extensão da UEG. Pirenópolis, GO, 2015.

Calvino, M.; Messing, J. Sweet sorghum as a model system for bioenergy crops. **Current Opinion in Biotechnology**, v. 23, p. 323–329, 2012.

Corrêa, C. E. S.; Rodrigues, J. A. S.; Gonçalves, L. C. **Determinação da produção de matéria seca e das proporções de colmo, folha e panícula de treze híbridos de sorgo**. In: Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Zootecnia. Anais: Fortaleza: Sociedade Brasileira de Zootecnia, v.33, p.374-376, 1996.

Demirbas, A. Combustion characteristics of different biomass fuels. Progress in energy and combustion science. **Turquia: Elsevier**, v. 30, p. 219-230, 2004.

Detmann, E.; Souza, M. A.; Valadares Filho, S. C.; Queiroz, A. C.; Berchielli, T. T.; Saliba, E. O. S.; Cabral, L. S.; Pina, D. S.; Ladeira, M. M.; Azevedo, J. A. G. **Métodos para análise de alimentos**. Visconde do Rio Branco, MG: Ed. Suprema, 2012, 230 p.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. Revista Atual. Rio de Janeiro, v.7, p. 212, 2011.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética, 2015, **Balanco energético nacional: Ano base 2014**.

Evaristo, A. B.; Grossi, J. A. S.; Carneiro, A. C. O.; Pimentel, L. D.; Motoike, A. Y.; Kuki, K. N. Actual and putative potentials of macauba palm as feedstock for solid biofuel production from residues. **Biomass and Bioenergy**, v. 85, p. 18-24, 2015.

Gnansounou, E.; Dauriat, A. Ethanol fuel from biomass: A review. **Journal of Scientific and Industrial Research**, v. 64, p. 809-821, 2005.

Godin, B.; Agneessens, R.; Gerin, P. A.; Delcarte, J. Composition of structural carbohydrates in biomass: Precision of a liquid chromatography method using a neutral detergent extraction and a charged aerosol detector. **Talanta**, v. 85, p.2014 – 2026, 2011.

Goldemberg, J. Biomass and energy. **Química nova**, v. 32, p.582-587, 2009.

Jenkins, B. M.; Baxter, L. L.; Miles Jr, T. R.; Miles, T. R. Combustion properties of biomass. **Fuel Processing Technology**, v. 54, p. 17- 46, 1998.

Lange JP, Heide EVD, Buijtenen JV, Price R (2012) Furfural—a promising platform for ligno-cellulosic biofuels. **ChemSusChem**, 5:150-166.

Lizcano, J. V. **Poder calorífico, energia e cinzas da biomassa de cana-de-açúcar irrigada por gotejamento, para diferentes variedade, lâminas e processos de maturação**. Dissertação (Mestrado em Ciências). 93p. Universidade de São Paulo – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Piracicaba, SP, 2015.

Magalhães, P. C.; Souza, T. C.; May, A.; Lima Filho, O. F.; Santos, F. C.; Moreira, J. A. A.; Leite, C. E. P.; Albuquerque, C. J., Freitas, R. S. Exigências edafoclimáticas e fisiologia da produção. In: Borém A, Pimentel L, Parrella R. **Sorgo: do plantio à colheita**. Editora UFV, 2014, 275p.

May, A.; Campanha, M.; Silva, A.; Coelho, M.; Parrella, R. A.; Schaffert, R. E.; Pereira Filho, I. A. Variedades de sorgo sacarino em diferentes espaçamentos e população de plantas. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.3, p. 18-21, 2012.

May, A.; Silva, D. D.; Santos, F. C. Cultivo do sorgo biomassa para a cogeração de energia elétrica. **Embrapa Milho e Sorgo - Documento 152**. Sete Lagoas, MG, 2013.

May, A.; Souza, V. F.; Gravina, G. A.; Fernandes, P. G. Plant population a row spacing on biomass sorghum yield performance. **Ciência Rural**, v. 46, p. 434-439, 2016.

Mckendry, P. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. **Bioresource Technology**, v. 83, p. 37-46, 2002.

Neumann, M.; Restle, J.; Alves Filho, D. C.; Bernardes, R. A. C.; Arboite, M. Z.; Cerdótes, L.; Peixoto, L. A. O. Avaliação de diferentes híbridos de sorgo (*Sorghum bicolor*, L. Moench) quanto aos componentes da planta e silagens produzidas. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 31, p. 302-312, 2002.

Oliveira, I. K. C. P.; Silva, H.; Silva, F. L. H.; Oliveira, L. S. C. **Caracterização físico-química do bagaço de sorgo sacarino para hidrólise ácida do material lignocelulósico.** In: Congresso Brasileiro de Engenharia Química, Uberlândia. Resumos. Uberlândia: UFU, 2009.

Parrella, R. A. C.; Rodrigues, J. A. S.; Tardin, F. D.; Damasceno, C. M. B.; Schaffert, R. E. **Desenvolvimento de híbridos de sorgo sensíveis ao fotoperíodo visando alta produtividade de biomassa.** Boletim de Pesquisa e desenvolvimento, n.28, Embrapa Milho e Sorgo de Sete Lagoas, MG, 2010.

Paula, L. E. R.; Trugilho, P. F.; Napoli, A.; Bianchi, M.L. Characterization of Residues from Plant Biomass for use in Energy Generation. **Cerne**, v.17, p. 237-246, 2011.

Pereira, G. A.; Parella, R. A. C.; Parella, N. N. L. D.; Sousa, V. F.; Schaffert, R. E.; Costa, R. K. **Desempenho agrônômico de híbridos de sorgo biomassa.** XXIX Congresso Nacional de Milho e Sorgo – Águas de Lindóia, 2011.

Quilho, L. F. T. L. (2011) **Produção de Bioetanol a partir de Materiais Lenho-celulósicos de Sorgo sacarino: Revisão Bibliográfica.** Dissertação (Mestrado em Energia e Bioenergia). 80p. Faculdade de Ciência e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.

Quirino, W. F. **Utilização Energética de Resíduos Vegetais**, 2011. Disponível em: <http://www.mundoflorestal.com.br/arquivos/aproveitamento.pdf>. Acesso em: 12 de maio de 2016.

Quirino, W. F.; Vale, A. T.; Andrade, A. P. A.; Abreu, V. L. S.; AZEVEDO, A. D. S. Poder calorífico da madeira e de materiais ligno-celulósicos. **Revista da Madeira**, v. 89, p. 100-106, 2005.

Rezende, P. M.; Alcantara, H. P.; Passos, A. M. A.; Carvalho, E. R.; Baliza, D. P.; Oliveira, G. T. M. Rendimento forrageiro da rebrota do sorgo em sistema de produção consorciado com soja. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.6, p. 32- 46, 2011.

Ribas, P. M. Origem e importância econômica. In: Borém, A.; Pimentel, L.; Parrella, R.; **Sorgo: do plantio à colheita.** Editora UFV, 2014, 275p.

Rooney, W. L.; Blumenthal, J.; Bean, B.; Mullet, J. E. Designing sorghum as a dedicated bioenergia feedstock. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 1, p. 147-157, 2007.

Saidur, R.; Abdelaziz, E. A.; Dermirbas, A.; Hossain, M. S.; Mekhilef, S. A review on biomass as a fuel for boilers. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, p. 2262–2289, 2011.

Sans, L. M. A.; Morais, A. V. C.; Guimarães, D. P. **Época de plantio de sorgo** (Comunicado Técnico). MAPA. Sete Lagoas, MG, 2003.

Santos, T. N (2012) **Avaliação da biomassa de sorgo sacarino e palma forrageira para produção de etanol em Pernambuco**. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Energéticas e Nucleares). 95p. Universidade Federal de Pernambuco.

Silva, M. B.; Morais, A. S. **Avaliação Energética do Bagaço de Cana em Diferentes Níveis de Umidade e Graus de Compactação**. XXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.

Silva, N. L. C (2010) **Produção de bioetanol de segunda geração a partir de biomassa residual da indústria de celulose**. Dissertação (Mestrado em Ciências). 123p. Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR (UNICA). **Efeito da seca sobre a cana abre perspectiva para híbridos de sorgo na próxima entressafra** (2012). Disponível em:<http://www.unica.com.br/unica-namidia/17729932920315173097/efeito-da-seca-sobre-a-cana-abre-perspectiva-para-hibridos-de-sorgo-naproxima-entressafra/>. Acesso em: 14 de maio de 2014.

Vieira, A. C (2012) **Caracterização da biomassa proveniente de resíduos agrícolas**. Dissertação de mestrado (Energia na Agricultura). 72p. Cascavel, Paraná.

Yuan, J. S.; Tiller, K. H.; Al-ahmad, H.; Stewart, N. R.; Stewart Jr, C. N. Review: Plantas top over: bioenergy to fuel the future. **Trends in Plant Science**, v. 13, p. 20-27, 2008.

CAPÍTULO II: PRODUÇÃO DE AÇÚCARES DO CALDO DE SORGO SACARINO AVALIADAS EM DUAS ÉPOCAS DE CORTE

RESUMO

O sorgo sacarino (*Sorghum bicolor*) é uma fonte alternativa para produção de etanol, principalmente na entressafra da cana-de-açúcar. Esta gramínea apresenta altos teores de açúcares fermentescíveis nos colmos e, além disto, possibilita o uso da rebrota. Porém, não se sabe se os rendimentos e qualidade de açúcares obtidos podem ser influenciados pela época do ano, visto que o sorgo é uma planta sensível ao fotoperiodismo. Objetivou-se com este trabalho avaliar a produção quantitativa e qualitativa dos açúcares produzidos no colmo do sorgo sacarino, em duas épocas de corte (safra principal e rebrota). O experimento foi realizado no Campo Experimental de Coimbra, pertencente ao Departamento de Fitotecnia da UFV. Foram utilizadas três cultivares de sorgo sacarino (BD 5404, BRS 511 e BD1615), sendo conduzidas no delineamento em blocos ao acaso e analisado parcelas subdivididas no tempo, com 6 blocos. Ao final de cada ciclo, foram coletadas 10 plantas da área útil de cada parcela para realizar as avaliações de produtividade do colmo das cultivares e extração do caldo. Posteriormente os açúcares totais (sacarose, glicose e frutose) presentes no caldo foram quantificados em análises realizadas em cromatografia líquida de alta precisão (HPLC). Verificou-se que a cultivar BRS 511 apresentou a maior produtividade de colmos, tanto na safra como na rebrota, com 69 e 14 t/ha, respectivamente. A taxa de extração do caldo diferiu significativamente entre a safra e a rebrota, para todas as cultivares, com médias menores na rebrota. O teor de açúcares totais (g/L) presente no caldo, não diferiu entre as duas safras apresentando em média 94 g/L. Já o teor de sólidos solúveis do caldo (°Brix) diferiu entre as cultivares e entre as duas safras. Para a participação (%) dos açúcares presentes no caldo, foi verificado que apenas a cultivar BRS 511 apresentou a mesma proporção nas duas safras, com maior teor de sacarose produzido. Conclui-se que a produtividade de colmos foi em média 80% menor na rebrota em relação à safra principal e que a quantidade de açúcares produzidos não varia em função do ciclo (teor de açúcares totais não diferiu). Porém, a taxa de extração do caldo e o teor de sólidos solúveis (°Brix) e a qualidade dos açúcares (% sacarose, % glicose e % frutose) variam de acordo com a cultivar e o ciclo.

Palavras chaves: *Sorghum bicolor*, produtividade, açúcares fermentescíveis, HPLC.

SUGAR PRODUCTION IN THE JUICE OF SWEET SORGHUM EVALUATED IN TWO CUTTING TIMES

ABSTRACT

The sweet sorghum (*Sorghum bicolor*) is an alternative source for ethanol production, especially in the off season of sugarcane. This grass has high levels of fermentable sugars in the stalks and, in addition, enables the use of regrowth. However, it is unknown whether the income and quality of sugars obtained can be influenced by the time of year, as the sorghum plant is susceptible to photoperiod. The objective of this study was to evaluate the quantitative and qualitative production of sugar produced in the sweet sorghum stalk, cut in two seasons (main crop and regrowth). The experiment was conducted at the Experimental Station of Coimbra, of the Department of Plant Science of UFV. three varieties of sorghum were used (BD 5404, BRS 511 and BD1615), being conducted in the design of randomized blocks and analyzed split plot, with 6 blocks. At the end of each cycle were collected 10 plants of the useful area of each plot to make the stalk productivity assessments of cultivars and extract the juice. Subsequently total sugars (sucrose, glucose and fructose) present in the broth were quantified in tests conducted in high performance liquid chromatography (HPLC). It was found that BRS 511 showed the highest productivity of stalks, both in the crop and in regrowth, with 69 and 14 t/ha, respectively. The juice extraction rate differed significantly between the harvest and regrowth, for all cultivars with lower averages in regrowth. The total sugar content (g/L) present in the broth, did not differ between the two crops presenting on average 94 g / L. But the soluble solids content of the juice (Brix) differed between cultivars and between the two crops. For participation (%) of the sugars present in the juice, it was found that only BRS 511 showed the same proportion in the two seasons, with higher sucrose content produced. It follows that the productivity of stems was on average 80% lower in regrowth in relation to the main crop and that the amount of sugar produced does not vary as a function of cycle (total sugars did not differ). However, the juice extraction rate and the soluble solids (°Brix) and the quality of sugars (sucrose%, % glucose and% fructose) vary with the cultivar and the cycle.

Key words: *Sorghum bicolor*, productivity, fermentable sugars, HPLC.

INTRODUÇÃO

No Brasil o setor sucroenergético é baseado, predominantemente, na utilização da cana-de-açúcar como matéria-prima para produção do bioetanol, sendo o maior produtor mundial deste biocombustível a partir desta cultura (Masson, 2013). Entretanto a produção de etanol a partir de cana apresenta limitações, especialmente em áreas de baixa pluviosidade e no período de entressafra da cana. Desta forma existe a necessidade da adição de outras matérias-primas para produção de etanol (Luo, 2009).

Dentre as matérias-primas renováveis utilizadas, o sorgo sacarino (*Sorghum bicolor*) se destaca por ser semelhante assemelha à cana-de-açúcar pelo armazenamento de açúcares fermentescíveis (sacarose, glicose e frutose) nos colmos, sendo estes facilmente convertidos em etanol (Kumar et al., 2010). Industrialmente o sorgo sacarino pode ser tratado de forma semelhante à cana-de-açúcar, desde a extração até o uso de levedura comercial para a fermentação do caldo em etanol, podendo utilizar a mesma infraestrutura e maquinário da indústria canavieira (Masson, 2013).

Além disto, no cultivo do sorgo sacarino há o aproveitamento dos resíduos sólidos produzidos (bagaço) na geração de bioeletricidade, produção de etanol de segunda geração, na alimentação animal ou como fertilizante do solo após compostagem com outros resíduos (Monti et al., 2003, Lourenço et al., 2010). Quando comparado à outras culturas produtoras de etanol, como a cana e o milho, o sorgo se destaca por apresentar ciclo curto, menor exigência de fertilizantes, água e nitrogênio. Assim, o custo estimado do cultivo sorgo é mais baixo em relação ao do milho e da cana-de-açúcar (Masson, 2013, Reddy et al., 2007).

Outra característica da cultura do sorgo é a possibilidade do uso da rebrota, uma vez que, após o corte da planta original o sorgo conserva vivo o seu sistema radicular, e havendo possibilidade de rebrota há o seu desenvolvimento. Desta forma, a rebrota também poderá ser utilizada como matéria-prima, sem aumentar muito os custos de produção e além de auxiliar de forma significativa na estabilidade dos preços desse biocombustível durante o ano (Reis, 2014).

Alguns autores relataram que os açúcares solúveis produzidos pelo sorgo sacarino têm o potencial para produzir até 8000 L de etanol por hectare ou cerca de duas vezes o potencial de produção de etanol de grão de milho e 30% da produtividade alcançada pela cana-de-açúcar, que é em média 6000 L/ha (Bennett & Anex, 2009). Porém, para que haja uma produção econômica e sustentável de etanol a partir do sorgo sacarino é necessário um nível mínimo de

açúcares totais no caldo (AT) para que a levedura converta completamente os açúcares presentes em etanol (Fernandes et al., 2014).

Estudos realizados por Fernandes et al (2014), apontam que durante a maturação do sorgo sacarino na safra, há um aumento nas concentrações dos açúcares totais e uma variação no teor dos açúcares (sacarose, glicose e frutose) presentes no caldo, porém após 120 dias de plantio essas concentrações diminuem significativamente sendo necessário monitorar continuamente a maturação de cada tipo de planta nas condições de cultivo ambientais, para encontrar a época em que a concentração de açúcares esteja próxima do nível ideal para conversão em etanol.

Desta forma, para que a rebrota também seja utilizada como matéria-prima na produção de etanol é necessário averiguar se as mudanças no teor de açúcares são somente durante a maturação ou em relação ao ciclo das plantas. Visto que o sorgo é uma planta sensível ao fotoperiodismo, os rendimentos e qualidade de açúcares obtidos podem ser influenciados pela época do ano. Entretanto, existem poucos relatos na literatura sobre o teor e quantidade de açúcar presente no colmo de sorgo sacarino na safra e na rebrota. Diante disto, objetivou-se com este trabalho avaliar a produção quantitativa e qualitativa dos açúcares produzidos no colmo do sorgo sacarino, em duas épocas de corte (primeira safra e rebrota, considerando o ciclo produtivo de verão e outono, respectivamente), afim de viabilizar economicamente o seu cultivo.

MATERIAL E MÉTODOS

1) Matéria- prima e condições de crescimento

O experimento foi instalado no município de Coimbra-MG, situado a 20°51' de latitude Sul e 42°46' de longitude Oeste, localizado a 720 metros de altitude no Campo Experimental de Coimbra, pertencente ao Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Viçosa. Sendo conduzido durante os meses de dezembro/2014 a agosto/2015. As condições ambientais durante a condução do experimento estão descritas na Figura 1.

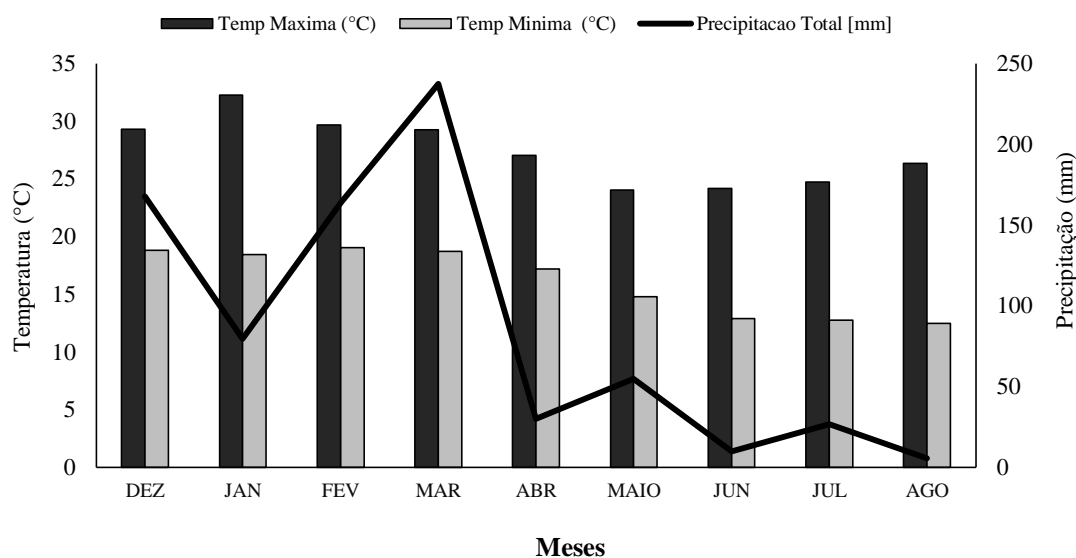


Figura1. Precipitação acumulada (mm) e temperaturas (°C) médias mensais durante o período de condução do experimento.

O solo do local é classificado como Argissolo Vermelho Amarelo distrófico, de textura argilosa (Embrapa, 2011). Os resultados da análise química do solo apresentaram as seguintes características: pH (H₂O) = 5,23; P = 13,4 mg dm⁻³; K⁺ = 172 mg dm⁻³; Ca²⁺ = 2,60 cmolc.dm⁻³; Mg²⁺ = 1,22 mg dm⁻³; Al³⁺ = 0,0 cmolc.dm⁻³; H + Al = 3,6 cmolc.dm⁻³; CTC(t) = 4,26 cmolc.dm⁻³; CTC (T) = 7,86 cmolc.dm⁻³ e V = 54,2%.

2) Implementação e manejo da cultura

O preparo da área experimental consistiu de uma aração seguida de duas gradagens, sendo posteriormente abertos os sulcos com auxílio de um escarificador. A semeadura foi realizada no dia 04/12/2014, adotando o sistema manual numa área plana de 861 m². Foi utilizado sementes de sorgo sacarino disponibilizadas pelas empresas: Embrapa Milho e Sorgo situada em Sete Lagoas - MG (sendo estas iniciadas pelo prefixo BRS) e Ceres Sementes do Brasil (iniciadas pelo prefixo BD). A densidade de semeadura foi de 12 sementes/metro linear. Aos vinte dias após a semeadura foi realizado o desbaste manual, deixando 9 plantas/ metro linear. A formulação de adubo utilizada para o plantio foi a 08:28:16 de NPK, utilizando 300 Kg/ha, e a adubação de cobertura foi de 222 Kg/ha de ureia, aplicados aos 20 dias após a emergência das plantas. As plantas daninhas foram inicialmente controladas com Atrazina, na dose de quatro L/ha e aos 45 dias após o plantio foi realizada uma capina manual com enxada.

As plantas foram colhidas duas vezes, sendo o primeiro corte realizado a uma altura de 10 cm do solo e o segundo, após a rebrota do sorgo, rente ao solo. Na rebrota a adubação de

cobertura utilizada foi de 20-05-20 de NPK utilizando 300 Kg/ha. As plantas foram colhidas quando atingiram a maturidade fisiológica dos grãos (estádio pastoso e farináceo), além de avaliar o °Brix (teor de sólidos solúveis) para tomada de decisão. As datas de colheita estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Época de plantio e colheita, de seis cultivares de sorgo em duas safras consecutivas (safra e rebrota). Coimbra, MG.

Tipo de sorgo/ Cultivar	Safra			Rebrota	
	Plantio	Coleta de amostras	Colheita 1*	Coleta de amostras	
Sacarino	BD 5404	04/12/2014	17/04/2015	05/05/2015	17/09/2015
	BRS 511	04/12/2014	28/03/2015	10/04/2015	07/08/2015
	BD 1615	04/12/2014	17/04/2015	05/05/2015	17/09/2015

*Retirada de todas a plantas da área para permitir a rebrota do 2º ciclo.

3) Delineamento estatístico

O delineamento utilizado, para as avaliações fitotécnicas, foi em blocos ao acaso com seis repetições e analisado em parcelas subdivididas no tempo. Foram avaliados três cultivares de sorgo, pertencentes ao grupos agrônômico de sorgo sacarino (cultivares BD 5404, BRS 511 e BD1615), em duas épocas de corte: safra e rebrota. As parcelas experimentais foram constituídas de quatro linhas de 6 m lineares cada, espaçadas em 0,70 m entre si. Foi acrescentada uma linha de bordadura entre as parcelas para separar os materiais distintos. A área útil utilizada para as avaliações foi composta das duas linhas centrais da parcela, eliminando 1,0 m de cada extremidade.

4) Coleta de dados

Foi utilizado uma amostra compostas de dez plantas retiradas de forma aleatória da área útil de cada parcela, sendo estas colhidas durante a maturidade fisiológica do grão de cada cultivar nas duas épocas de corte (safra e rebrota). Destas amostras coletadas foram seccionados os colmos das plantas de onde foram avaliados:

- Produtividade de colmo (t/ha): determinada em kg/ parcela através da pesagem dos colmos de dez plantas.

Posteriormente, foram retiradas amostras compostas de 1kg de colmo os quais foram passados em picadeira e em seguida colocados em prensa hidráulica por 1 min com 250 kgf/cm, para a retirada do caldo, sendo determinado:

- Taxa de extração do caldo (TE): percentagem (%) do caldo extraído do colmo fresco e a massa de caldo (kg).

Após a extração, foi retirada uma alíquota de 80 μ L do caldo para determinação do teor de sólidos totais ($^{\circ}$ Brix) em refratômetro digital. Uma amostra de 80mL do caldo foi armazenada em freezer a -20° C e posteriormente foi determinado o teor de açúcares totais (sacarose, glicose e frutose) usado em cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC). A concentração de cada açúcar no caldo foi determinada usando as áreas de pico dos cromatogramas e expressa em termos de gramas de açúcares totais por litro de suco.

O preparo da amostra para a análise em HPLC seguiu as seguintes etapas: as amostras de caldo foram retiradas do refrigerador oito horas antes da análise cromatográfica, para aclimação do caldo a temperatura ambiente ($20-23^{\circ}$ C). Depois, as amostras foram diluídas em água deionizada (1:10) e filtradas com auxílio de microfiltros (PTFE 0,45 μ m da MilliPore) e seringas para dentro dos vials e, posteriormente, injetadas no HPLC. Utilizou-se o detector por espalhamento de luz evaporativo (ELSD –LT II, Shimadzu), coluna Aminex HPX-87H (300 x 7,8 mm) e a temperatura do drift tube de 30° C. A fase móvel usada foi água deionizada com fluxo de 0,8 mL min^{-1} e tempo de corrida de oito minutos. O tempo de retenção foram os seguintes: Sacarose, 5,6 min; glicose, 6,6 min; frutose, 7,2 min. Os reagentes utilizados para a preparação da curva analítica foram: D-[+] glicose (Sigma Chemical Company, St. Louis, MO, USA), β -D[-] frutose (Sigma Chemical Company, St. Louis, MO, USA) e D [+] sacarose (Sigma Chemical Company, St. Louis, MO, USA).

Análise estatística

Os dados foram submetidos a análise de variância pelo Teste F aos níveis de 1 e 5% de probabilidade e, para as variáveis que apresentaram significância, realizou-se teste de médias (Tukey) ao nível de 5% de probabilidade utilizando-se o programa ASSISTAT Versão 7.7 beta (pt).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise de variância (ANOVA) revelou diferença significativa entre as cultivares para as características avaliadas, entre as cultivares (Tabela 1). Houve interação significativa entre os níveis do fator cultivares e do fator cortes apenas para a variável taxa de extração do caldo (TE). Observou-se efeito altamente significativo entre as cultivares para as variáveis produção de colmos (COL), teor de sólidos solúveis (°Brix) e teor de açúcares totais (AT). Com relação à época de corte, as variáveis produção de colmos (COL), taxa de extração do caldo (TE), teor de sólidos solúveis (°Brix) e teor de açúcares totais (AT) foram afetadas significativamente.

Tabela 1. Resumo da análise de variância dos dados avaliados para três cultivares de sorgo, em duas épocas de corte.

FV	GL	Quadrados Médios			
		COL	TE	°Brix	AT
Blocos	5	0,34 ^{ns}	4,30*	1,26 ^{ns}	2,62 ^{ns}
Cultivares (Cult)	2	21,37**	1,83 ^{ns}	24,86**	10,19**
Resíduo a	10	106,94	46,63	11,98	4568,71
Cortes (Co)	1	2413,21**	264,61**	27,93**	0,0006*
Cult x Co	2	0,4073 ^{ns}	6,30*	1,74 ^{ns}	1,22 ^{ns}
Resíduo b	15	170,96	79,49	30,20	10534,15
CV a (%)		8,87	3,95	7,99	22,68
CV b (%)		9,16	4,21	10,36	28,12

** - Efeito altamente significativo pelo teste F ao nível de 1% de probabilidade; * - Efeito significativo pelo teste F ao nível de 5% de probabilidade; ^{ns} - Não significativo.

Dados: COL: produção de colmos; TE: taxa de extração do caldo; °Brix: teor de sólidos solúveis; AT: teor de açúcares totais.

Observou-se que a produção média de colmos obtida na safra foi significativamente superior à produtividade obtida na rebrota, com 64,50 t/ha e 9,23 t/ha, respectivamente (Figura 2). Na rebrota, foi verificada uma baixa produção de colmos para todas as cultivares. As plantas da rebrota tiveram uma queda no desenvolvimento vegetativo após o primeiro corte, decorrentes, principalmente, das menores temperaturas observadas após março de 2015 (Figura 1), influenciando o crescimento das plantas, já que o sorgo sacarino é uma espécie C4 que apresenta melhor desenvolvimento sob elevadas temperaturas diurnas e noturnas.

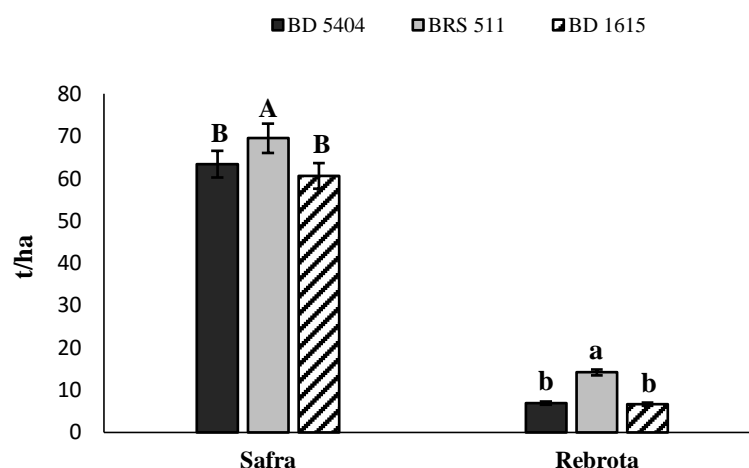


Figura 2. Produção de colmos (t/ha), de três cultivares de sorgo, em duas épocas de corte (safra e rebrota). Barras seguidas, pela mesma letra maiúscula na safra e mesma letra minúscula na rebrota, não diferem entre si pelo teste de F aos níveis de 1 e 5%. Coimbra –MG, 2015.

Foi observado também que, dentre as cultivares em estudo, a cultivar BRS 511 apresentou a maior produtividade de colmos tanto na safra como na rebrota, com uma média de 69,52 t/ha e 14,15t/ha respectivamente. Levando em consideração as duas épocas de corte, a cultivar BRS 511, teve uma produtividade média de colmos de 41,83 t/ha, sendo significativamente superior as demais. Os resultados apresentados corroboram com May et al (2012) que afirmam que a cultivar BRS 511 tem elevado potencial produtivo e alta capacidade competitiva entre as plantas na linha de cultivo, conseguindo se desenvolver melhor que as demais mesmo em condições desfavoráveis.

Para o desdobramento dos fatores cultivares e época de corte, foi observado redução da taxa de extração para todas as cultivares na condição de rebrota (Tabela 2) em relação à safra principal.

Tabela 2. Valores médios da taxa de extração do caldo (%) de três cultivares de sorgo sacarino, em duas épocas de corte.

Cultivar	Taxa de Extração (%)	
	Safra	Rebrota
BD 5404	62,46 aA	47,81 abB
BRS 511	59,53 aA	50,89 aB
BD 1615	60,79 aA	46,63 bB
Média	60,93	48,44
CV (%)	3,95	4,21

Médias seguidas pela mesma letra, minúscula na linha e maiúscula na coluna, não diferem estatisticamente entre si a 5% de probabilidade, pelo teste F para época de corte e pelo teste Tukey para a taxa de extração do caldo.

O caldo do sorgo é composto de aproximadamente 84% de água, sendo este o componente em maior quantidade no sumo extraído (Almodares & Hadi, 2009). Deste modo, é importante ressaltar que, no período de abril a agosto de 2015, durante o desenvolvimento das plantas na rebrota, a precipitação total acumulada na área foi de apenas 127,5 mm.

Sabe-se que a quantidade de água requerida pela cultura que varia entre 380 e 600 mm durante seu ciclo e de acordo com seu estágio de desenvolvimento (Sans et al., 2003). Desta forma, pode-se considerar que a baixa disponibilidade hídrica pode ter afetado negativamente o desenvolvimento das plantas de sorgo na rebrota, resultando numa menor produção de caldo nos colmos em relação à safra anterior.

Foi observado que no cultivo da safra, as cultivares não diferiram estatisticamente em relação à taxa de extração do caldo obtida (Tabela 2). Porém na rebrota a cultivar BRS 511 apresentou o maior rendimento de caldo sendo significativamente superior a cultivar BD 1615, com 50,89% e 46,63%, respectivamente. Já a cultivar BD 5404 não diferiu estatisticamente das demais.

Em relação ao teor de sólidos solúveis totais (°Brix), obtidos em função das cultivares, foi observado que a cultivar BRS 511 apresentou o maior valor de °Brix no caldo, com um valor médio de 15,4%. Porém, foi observado que a cultivar BD 5404 apresentou o maior teor de açúcares totais no caldo, sendo estatisticamente superior as demais (Tabela 3).

Tabela 3. Valores médios do teor de sólidos solúveis totais (°Brix) e do teor de açúcares totais (g/L), de acordo com a cultivar de sorgo adotado.

Cultivar	°Brix (%)	Açúcares totais (g/L)
BD 5404	13,46 b	115,63 a
BRS 511	15,38 a	90,25 b
BD 1615	12,25 b	76,84 b

Médias seguidas pela mesma letra, minúsculas nas colunas, não diferem entre si a 5% de probabilidade, pelo teste Tukey.

A medida dos sólidos solúveis aparentes no caldo do sorgo é denominada °Brix, e estes são classificados em açúcares (sacarose, glicose e frutose, principalmente) e em não açúcares orgânicos (proteína, fenólicos, amido, cera, etc) e não açúcares inorgânicos (K_2O , PO_4^{-3} , MgO , CaO , Na_2O , etc) (Walford, 1996). Como o °Brix expressa o teor de todos os sólidos solúveis presentes no caldo, pode-se concluir que a cultivar BRS 511 apresenta maior concentração de outros sólidos solúveis e menor concentração de açúcares no caldo quando comparada a cultivar

BD 5404. Ou seja, o maior valor de °Brix não está diretamente relacionado com maior teor de açúcares totais.

Porém, vale a pena ressaltar que a cultivar BRS 511 obteve os maiores valores de °Brix e foi também a cultivar com maior concentração de sacarose (%) no caldo (Figura 3), demonstrando que pode haver uma correlação positiva entre o teor de sacarose e o valor do °Brix. Esses resultados corroboram com Kawahigashi et al (2013), que observou que o aumento do °Brix ocorre principalmente pelo aumento na concentração de sacarose no caule. Portanto, em geral, valores mais elevados °Brix são correlacionada com maior teor de sacarose no caldo do colmo de sorgo.

Os valores médios encontrados para os teores de açúcares totais das cultivares analisadas neste estudo (Tabela 3) corroboram com os relatados por Almodares et al (2009) que encontraram valores que variam de 80 a 120 g / L. Porém, segundo Fernandes et al, (2014), para obtenção de uma produção econômica e sustentável de etanol a partir do sorgo sacarino é exigido um nível mínimo de teor de açúcar total no caldo (AT). O AT de 140 g/L é desejável pois desta forma a levedura pode converter completamente está concentração de açúcar em etanol a cerca de 8 h. Em concentrações mais baixas do que 140 g/L pode resultar em ganhos de eficiência inferiores em comparação com cana-de-açúcar e ocasionar um aumento dos custos de produção industrial para a produção de etanol. Desta forma, as cultivares analisadas apresentam um nível de teor de açúcares totais abaixo do nível crítico.

O teor de sólidos solúveis totais (°Brix) obtido diferiu significativamente, sendo superior na safra em relação a rebrota (Tabela 3). Porém, pode-se observar que o teor de açúcares totais não diferiu entre a safra e a rebrota, demonstrando que a produção de açúcares no caldo do sorgo sacarino é uma característica intrínseca de cada cultivar (Tabela 4).

Tabela 4. Valores médios do teor de açúcares totais (g/L) e °Brix (%), de acordo com a época de corte adotada.

Época de corte	°Brix (%)	Açúcares totais (g/L)
Safra	14,94 a	94,35 a
Rebrota	12,44 b	94,13 a

Médias seguidas pela mesma letra minúsculas nas colunas, não diferem entre si aos níveis de 1 e 5% de probabilidade, pelo teste F.

Apesar da produção de açúcares totais não ter deferido da primeira para a segunda safra, a taxa de extração do caldo foi significativamente inferior na segunda safra (rebrota), o que

resultará em menor rendimento industrial, logo o uso da rebrota para este fim é considerado inviável do ponto de vista quantitativo podendo resultar em baixos rendimentos industriais.

A proporção dos componentes de açúcar totais (sacarose, glicose e frutose) presente no caldo das cultivares de sorgo (Figura 3), demonstram variações. Pode-se observar que a cultivar BRS 511, da Embrapa, apresentou concentrações mais elevadas de sacarose, sendo este o principal componente dos açúcares totais, seguido de glicose e frutose, nas duas épocas de corte (Figura 3). Esses resultados corroboram com Fernandes et al (2014), Guigou et al (2011) e Zhao et al (2009) que encontraram a mesma tendência nas concentrações de açúcares presentes no caldo do sorgo sacarino, com maior concentração da sacarose.

Já as cultivares BD 5404 e BD 1615, da Ceres, apresentaram os menores teores de sacarose em relação aos demais açúcares presentes no caldo, nas duas épocas de corte. A cultivar BD 5404 apresentou as maiores concentrações de glicose tanto na safra como na rebrota. Estes resultados corroboram com os relatados por Gomez et al., (2011), que encontrou cultivares de sorgo em que a glicose foi o açúcar mais abundante.

A cultivar BD 1615 apresentou concentrações de açúcares variáveis de acordo com a época de corte. Na safra, as maiores concentrações de açúcares no caldo desta cultivar foram do açúcar frutose. Já na rebrota esta cultivar obteve maiores concentrações de glicose no caldo.

A composição química do caldo de sorgo sacarino difere do caldo da cana-de-açúcar, principalmente na concentração de sacarose. No sorgo, a sacarose representa cerca de 8 a 13% dos açúcares totais, enquanto que na cana a concentração apresentada é maior com valores de 14 a 22%. Entretanto, o sorgo sacarino apresenta uma concentração relativamente alta de açúcares redutores – glicose e frutose maiores do que a cana, portanto tem-se uma concentração semelhante de açúcares totais entre os caldos (Barcelos, 2012).

É importante ressaltar que como em qualquer processo agroindustrial, a composição da matéria-prima influencia diretamente o rendimento da produção de etanol. Nesse caso, o fator mais importante é a quantidade e composição de açúcares (sacarose, glicose e frutose) presentes no caldo (Kawahigashi et al, 2013).

Para produção de açúcar, a presença de glicose e frutose (redutores) no caldo não é desejado, por outro lado, a presença da sacarose é essencial pois é este dissacarídeo é o único açúcar diretamente cristalizável no processo de fabricação. Desta forma, o sorgo sacarino não é utilizado na produção de açúcar pois ele teria um rendimento bem inferior ao da cana, por isso o sorgo não é indicado para esta finalidade.

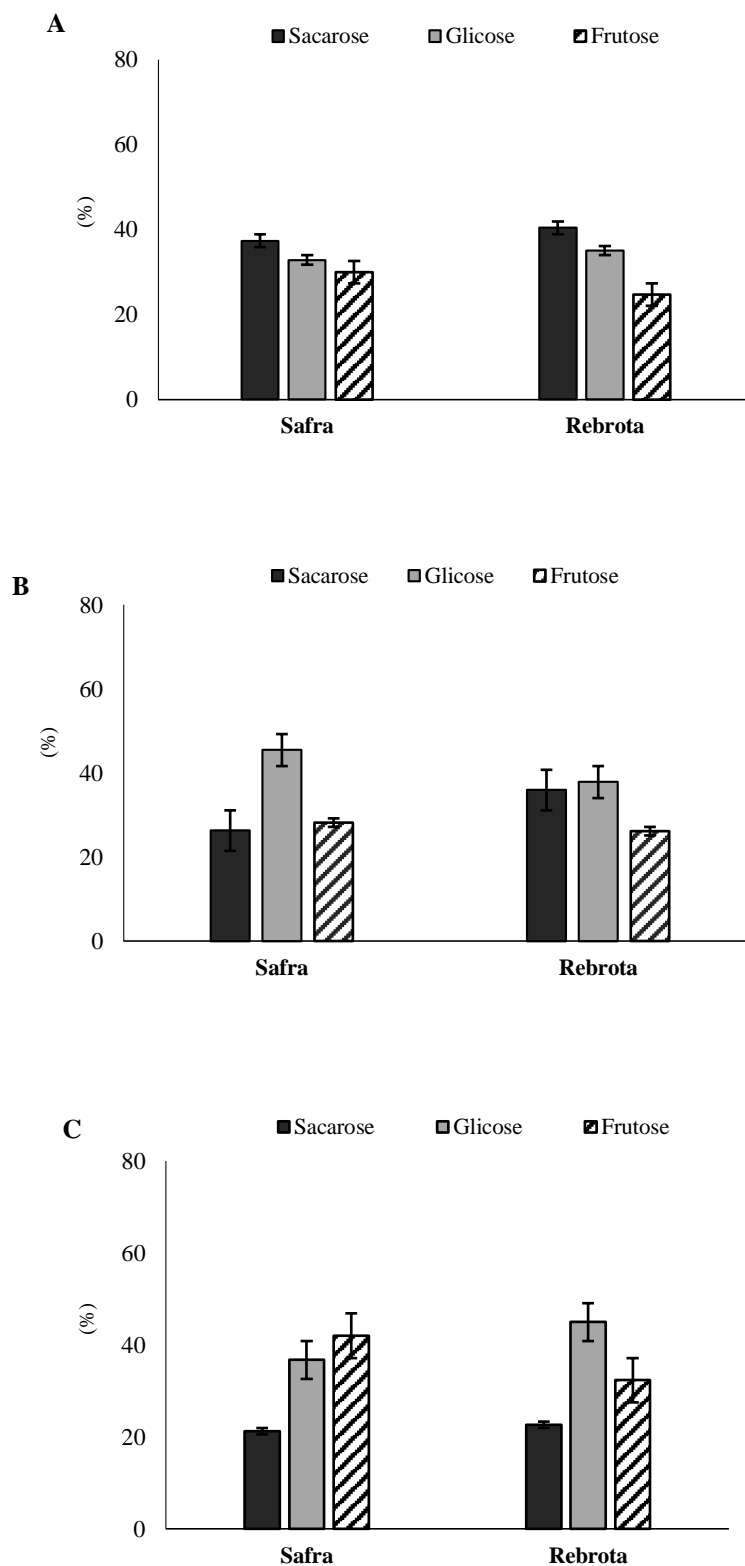


Figura 3. Participação dos açúcares: sacarose, glicose e frutose (%) no caldo do sorgo, em duas épocas de corte: (A) Na cultivar BRS 511, (B) na cultivar BD 5404 e (C) na cultivar BD 1615.

Porém na produção de etanol, os monossacarídeos (glicose e frutose) são benéficos pois são diretamente fermentados através da fermentação alcoólica. Já a sacarose precisa ser desdobrada pelas leveduras em duas moléculas de açúcar invertido para ser transformada em etanol, através do complexo processo bioquímico. Deste modo, para a produção de etanol o efeito repressivo da frutose e da glicose sobre a cadeia respiratória é benéfico (Ravaneli et al., 2006).

Além disto, os açúcares redutores (frutose e glicose) podem ser extraídos do caldo do sorgo e serem utilizados na indústria alimentícia. A frutose, por exemplo, proporciona mais acentuadamente a sensação de doçura que a sacarose e assim como a glicose, oferece uma sensação de frescor ao dissolver na boca. Ambas as características têm os seus valores nas formulações de alguns biscoitos, no preparo de gelatinas, pudins e geleias (Lima, 2012). Desta forma, pode-se afirmar que as características apresentadas pelas cultivares em estudo, são vantajosas tanto para produção de etanol como para utilização dos açúcares na indústria alimentícia.

CONCLUSÕES

Conclui-se que a produtividade de colmos de sorgo foi, em média, 80% menor na rebrota em relação à safra principal devido principalmente as condições climáticas desfavoráveis na rebrota.

A quantidade de açúcares produzidos no colmo de sorgo não varia em função do ciclo (% de açúcares totais não diferiu), porém a taxa de extração do caldo e o teor de sólidos solúveis (°Brix) variam em função da safra. Contudo, a qualidade dos açúcares (% sacarose, % glicose e % frutose) produzidos em ambas as safras variam de acordo com a cultivar.

AGRADECIMENTOS

À CAPES, CNPq e FAPEMIG pelas bolsas de estudo concedidas aos estudantes de mestrado e iniciação científica e, à FUNARBE (Programa Funarpec) pelo financiamento do Programa Sorgo da UFV.

REFERÊNCIAS

- Almodares, A.; Hadi, M. R. Production of bioethanol from sweet sorghum: a review. *African Journal of Agricultural Research*, v. 4, p.772-780, 2009.
- Barcelos, C. A (2012) **Aproveitamento das frações sacarínea, amilácea e lignocelulósica do sorgo sacarino [Sorghum bicolor (L.) Moench] para a produção de bioetanol**. Tese (Doutorado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos). 125p. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, Rio de Janeiro, RJ.
- Bennett, A. S.; Anex RP. Production, transportation and milling costs of sweet sorghum as a feedstock for centralized bioethanol production in the upper Midwest. *Biores Technol* v.100, p.1595 - 1607, 2009.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solo. *Revista Atual*. Rio de Janeiro, v. 2, p. 212, 2011.
- Fernandes, G.; Braga, T. G.; Fischer, J.; Parrella, R. A.; Resende, M. M.; 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.
- Gomez, F. J. D.; Hernandez, C. C.; Carrillo, E. P.; Rooney, W. L.; Serna-Saldivar, S. O. S. Evaluation of bioethanol production from five different varieties of sweet and forage sorghums (*Sorghum bicolor* (L) Moench). *Industrial Crops and Products*, v. 33, p.611-616, 2011.
- Guigou, M.; Lareo, C.; Pérez, L. V. Lluberas, M. E.; Vázquez, D.; Ferrari, M. D. Bioethanol production from sweet sorghum: Evaluation of post-harvest treatments on sugar extraction and fermentation. *Biomass and Bioenergy*, v. 35, p. 3058 – 3062, 2011.
- Kumar, C. G.; Fatima, A.; Rao, P. S.; Reddy, B. V.; Rathore, A.; Rao, R. N.; Kamal, A. Characterization of improved sweet sorghum genotypes for biochemical parameters, sugar yield and its attributes at different phenological stages. *Sugar Tech*, v. 12, p. 322-328, 2010.
- Kawahigashi, H.; Kasuga, S.; Okuizumi, H.; Hiradate, S.; Yonemaru, J. Evaluation of °Brix and sugar content in stem juice from sorghum varieties. *Japanese Society of Grassland Science*, v. 59, p. 11-19, 2013.
- Lima, R. B (2012) **Processo de clarificação de caldo de cana-de-açúcar aplicando elétrons acelerados** (Tese de Doutorado). 90p. Universidade de São Paulo.
- Lourenço, M. E. V.; Massa, V. M. L.; Palma, P. M. M.; Rato, A. E. M. Potencialidades do sorgo sacarino [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] para a produção sustentável de bioetanol no Alentejo. *Revista de Ciências Agrárias*, v. 30, p. 103-110, 2010.

Luo, L.; Van der Voet, E.; Huppel, G. Life cycle assessment and life cycle costing of bioethanol from sugarcane in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.13, p. 1613-1619, 2009.

Masson, I. S (2013) **Produção de bioetanol a partir da fermentação de caldo de sorgo sacarino e cana-de-açúcar**. Dissertação (Mestrado em Microbiologia Agropecuária). 62p. Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp. Jaboticabal – SP.

May, A.; Campanha, M.; Silva, A.; Coelho, M.; Parrella, R. A.; Schaffert, R. E.; Pereira Filho, I. A. Variedades de sorgo sacarino em diferentes espaçamentos e população de plantas. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 4, p.20-25, 2012.

Monti, A.; Venturi, G. Comparison of the energy performance of fibre sorghum, sweet sorghum and wheat monocultures in northern Italy. **Europ J Agron**, v. 19, p. 35-43, 2003.

Ravaneli, G. C.; Madaleno, L. L.; Presotti, L. E.; Mutton, M. A.; Mutton, M. J. R. Spittlebug infestation in sugarcane affects ethanolic fermentation. **Scientia Agricola**, v.63, p. 543-546, 2006.

Reddy, B. V. S.; Kumar, A. A.; Ramesh. S. **Sweet sorghum: A water saving bio-energy crop**. In: International Conference on Linkages between Energy and Water Management for Agriculture in Developing Countries, 2007.

Reis, R. M (2014) **Produtividade e manejo de plantas daninhas no sorgo sacarino cultivado em diferentes arranjos de plantas**. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia). 67p. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG.

Sans, L. M. A.; Moraes, A. V. C.; Guimarães, D. P. **Época de plantio de sorgo** (Comunicado Técnico). MAPA. Sete Lagoas, MG, 2003.

Walford, S. N. Composition of cane juice. Proceedings of the South African. **Sugar Technologists Association, Durban**, v.70, p.265-266, 1996.

Zhao, Y. L.; Abdughani, D.; Yosef, D.; Wang, X.; Amarjan, O.; Xie, G. H. Biomass yield and changes in chemical composition of sweet sorghum cultivars grown for biofuel. **Field Crops Res**, v. 111, p. 55-64, 2009.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este é um trabalho inédito que explora novas possibilidades de uso do sorgo no setor bioenergético. Acredita-se que por falta de conhecimento o sorgo ainda não tenha sido explorado adequadamente no Brasil. Acredita-se que os materiais de sorgo poderão ser produzidos na entressafra da cana-de-açúcar ou em cultivos marginais às áreas que tradicionalmente não são cultivadas com a cana, aumentando a oferta de bioenergia na entressafra da cana. Além disso, pouco se sabe sobre o real potencial da cultura do sorgo no cultivo consecutivo da safra e rebrota.

Nesse sentido, foi avaliado neste trabalho o potencial produtivo e energético de seis cultivares de sorgo, divididos em três grupos agronômicos (biomassa, forrageiro e sacarino) em duas safras consecutivas: safra principal e rebrota. Para isso, foram realizados experimentos em campo e laboratório com o intuito de validar o potencial produtivo do sorgo e para o setor bioenergético.

No primeiro capítulo, foi verificado que as cultivares de sorgo apresentam potencial produtivo na safra. Porém na rebrota a produção de biomassa foi pouco significativa, em relação à safra principal, devido às condições ambientais desfavoráveis, visto que a rebrota se desenvolveu no cultivo de outono/inverno, em condições de sequeiro. Além disso, observou-se que as cultivares de sorgo, apresentam diferentes potenciais de uso devido sua composição estrutural, podendo cada componente físico (panícula, colmo e folha) da planta ser explorado pelo setor bioenergético com finalidades de uso distintas. Foi observado também, que as cultivares de sorgo biomassa (BD 7607 e BRS 716) apresentaram maiores produções de matéria seca/ha e, concomitantemente, os maiores valores de produção de energia por hectare, considerando a queima direta dos materiais.

No segundo capítulo, foi realizada uma avaliação qualitativa e quantitativa apenas das cultivares de sorgo sacarino em duas safras consecutivas (safra principal e rebrota). Como resultado, foi verificado que a produtividade de colmos foi, em média, 80% menor na rebrota em relação à safra principal, devido principalmente as condições climáticas desfavoráveis durante a condução da rebrota. Também, verificou-se que a quantidade de açúcares produzidos não varia em função do ciclo das cultivares, porém o taxa de extração do caldo e o teor de sólidos solúveis (°Brix) variam, o que pode resultar em menores rendimentos industriais por tonelada de matéria prima processada.

Esperava-se maior produtividade da rebrota neste experimento. Porém durante o cultivo da rebrota houve baixa disponibilidade hídrica no local. Por outro lado, pode-se afirmar que mesmo em condições de déficit hídrico as plantas de sorgo conseguiram se desenvolver porém obtiveram baixa produtividade.

Conclui-se que a cultura do sorgo apresenta potencial promissor para ser utilizado como matéria prima do setor bioenergético (queima, etanol de 1ª e 2ª geração) e também como biomateriais (extração de celulose para indústria de papel, por exemplo), tanto pelo seu potencial produtivo como pelo seu amplo potencial de uso. Entretanto, é preciso entender e compatibilizar os fatores de produção agrícola (produtividade, ciclo, possibilidade de uso da rebrota) com as características estruturais (umidade, %lignina, % de celulose e % hemicelulose) destes materiais a fim de propor o melhor aproveitamento industrial.