



MARA JANE DA ROCHA

**CAPACIDADE COMBINATÓRIA DE
LINHAGENS E SELEÇÃO DE HÍBRIDOS DE
SORGO SACARINO**

LAVRAS – MG

2016

MARA JANE DA ROCHA

**CAPACIDADE COMBINATÓRIA DE LINHAGENS E SELEÇÃO DE
HÍBRIDOS DE SORGO SACARINO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Genética e Melhoramento de Plantas, área de concentração em Genética e Melhoramento de plantas, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. José Airton Rodrigues Nunes

Orientador

Prof. Dr. Rafael Augusto da Costa Parrella

Coorientador

LAVRAS - MG

2016

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Rocha, Mara Jane da.

Capacidade combinatória de linhagens e seleção de híbridos de
sorgo sacarino / Mara Jane da Rocha. – Lavras: UFLA, 2016.

74 p.

Dissertação (mestrado acadêmico)–Universidade Federal de
Lavras, 2016.

Orientador: José Airton Rodrigues Nunes.

Bibliografia.

1. *Sorghum bicolor* (L) Moench. 2. Seleção de genitores. 3.
Capacidade geral de combinação. 4. Capacidade específica de
combinação. 5. Heterose. I. Universidade Federal de Lavras. II.
Título.

MARA JANE DA ROCHA

**CAPACIDADE COMBINATÓRIA DE LINHAGENS E SELEÇÃO DE
HÍBRIDOS DE SORGO SACARINO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Genética e Melhoramento de Plantas, área de concentração em Genética e Melhoramento de plantas, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 10 de março de 2016.

Dr. Rafael Augusto da Costa Parrella	EMBRAPA – CNPMS
Prof. Dr. César Augusto Brasil Pereira	UFLA
Prof. Dr. Adriano Teodoro Bruzi	UFLA

Prof. Dr. José Airton Rodrigues Nunes
Orientador

LAVRAS – MG
2016

A Deus por me iluminar durante essa jornada, me dando força para superar os desafios.

Aos meus pais Fátima e Neto e meus irmãos Rodrigo, João, Juliete e Cida por todo o amor e por permanecerem sempre ao meu lado.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus por iluminar o meu caminho nesta conquista.

À minha família, pelo incentivo e apoio durante toda a minha vida.

Ao meu orientador Dr. José Airton, pelos ensinamentos e pela confiança em mim depositada.

Ao coorientador Dr. Rafael Parrella, pelos ensinamentos e disponibilidade durante a condução do trabalho.

Aos professores pelo ensino e incentivo, itens fundamentais para minha formação.

À Universidade Federal de Lavras, em especial ao curso de Pós-Graduação em Genética e Melhoramento de Plantas, pela oportunidade de realização do mestrado.

A CAPES pela concessão da bolsa de estudos.

A todos os colegas do Grupo do Sorgo, pela amizade, convivência e apoio durante a condução dos trabalhos.

Aos parentes e amigos que sempre torceram por mim.

Agradeço à minha família, especialmente a minha mãe Fátima e o meu pai Pedro, pela dedicação e cuidado, durante toda a minha vida.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para essa conquista.

Muito Obrigada!

RESUMO

O sorgo sacarino figura como matéria-prima alternativa para a produção do etanol. O estabelecimento desta cultura na cadeia produtiva brasileira depende do desenvolvimento de cultivares mais produtivas e adaptadas. Este trabalho teve por objetivo avaliar a capacidade geral de combinação de linhagens de sorgo sacarino e a capacidade específica de combinação das combinações híbridas quanto a caracteres agronômicos e tecnológicos. Além disso, identificar híbridos promissores para avaliação em ensaios avançados. Foram utilizadas cinco linhagens restauradoras de fertilidade (R) e quatro linhagens macho-estéreis (A) cruzadas em esquema dialélico parcial, obtendo-se 20 híbridos. Os experimentos foram implantados no delineamento látice retangular 5x6 com três repetições em Lavras-MG e Sete Lagoas - MG. Foram mensurados caracteres agronômicos: florescimento (FLOR, dias), altura de planta (AP, m), produção de massa verde (PMV, t ha⁻¹), matéria seca (MS, %), produção de matéria seca (PMS, t ha⁻¹) e tecnológicos: extração de caldo (EXT, %), sólidos solúveis totais (SST, %caldo), sacarose (POL, %caldo), pureza (PUR, %), açúcares redutores (AR, %caldo), fibra (FIB, %), açúcares redutores totais (ART, %caldo), açúcares totais recuperáveis (ATR, kg de açúcar t⁻¹ de colmo), etanol hidratado (EH, L de etanol t⁻¹ de colmo), tonelada de brix por hectare (TBH, t ha⁻¹) e produção de etanol (ETH, L ha⁻¹). Foram detectadas diferenças entre os locais e genótipos para as características avaliadas. Houve efeito significativo da interação genótipos x locais para a maioria dos caracteres, com exceção da EXT, PUR e AR. Houve efeito significativo da CGC das linhagens A e R para a maioria dos caracteres avaliados. Efeitos significativos de CEC foram verificados para a quase totalidade de características, indicando efeitos não aditivos na expressão fenotípica. Considerando os efeitos da CGC, as linhagens 201402B022-A, BRS 511, CMSXS643 e CMSXS646 foram promissoras para exploração como genitores em programas de melhoramento genético de sorgo sacarino visando elevar a produção de etanol e a qualidade da matéria-prima. Os híbridos 201402B010-A x BRS 511, 201402B010-A x BRS 508, 201402B010-A x CMSXS646, 201402B022-A x BRS 511, 201402B022-A x CMSXS643, 201402B022-A x CMSXS646, 201402B022-A x CMSXS647 foram os mais promissores para ETH.

Palavras-chave: *Sorghum bicolor* (L.) Moench. Seleção de genitores. Capacidade geral de combinação. Capacidade específica de combinação. Heterose.

ABSTRACT

Sweet sorghum figure as an alternative feedstock for ethanol production. The establishment of this culture in Brazilian production chain depends on the development of more productive and adapted cultivars. The aim of this study was to evaluate the general combining ability (GCA) of sweet sorghum lines and specific combining ability (SCA) of hybrid combinations as the agronomic and technological traits, and additionally to identify promising hybrid combinations for evaluation in advanced trials. Five restorer lines (R) and four male-sterile lines (A) were used in a partial cross diallel yielding 20 hybrids. The parental lines, hybrids and one check were evaluated in experiments carried out in a rectangular lattice design 5x6 with three replicates in two locations. The following traits were measured: flowering time, plant height, green mass yield, dry matter percentage, dry matter yield, juice extraction, total soluble solids content, sucrose content, purity, reducing sugars content, fiber content, sugars reducing total content, total recoverable sugars, hydrous ethanol, tons of per hectare, and ethanol production. There were differences between locations and genotypes for the traits. There was a significant effect of the genotype by environment interaction for most characters, except juice extraction, purity and reducing sugars content. There were a significant effect of GCA and SCA for most traits, indicating that additive and non-additive effects affect the phenotypic expression. Considering the effects of the GCA, the A line 201402B022-A, and R lines BRS 511, CMSXS643, and CMSXS646 were considered promising for exploration as parents in breeding programs of sweet sorghum in order to increase the ethanol production and the quality of the feedstock. The hybrids 201402B010-A x BRS 511, 201402B010-A x BRS 508, 201402B010-A x CMSXS646, 201402B022-A x BRS 511, 201402B022-A x CMSXS643, 201402B022-A x CMSXS646, 201402B022-A x CMSXS647 were the most promising for ethanol yield.

Keywords: *Sorghum bicolor* (L.) Moench. Parental selection. General combining ability. Specific combining ability. Heterosis.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	REFERENCIAL TEÓRICO	11
2.1	Melhoramento genético do sorgo sacarino	11
2.2	Caracteres alvo do melhoramento do sorgo sacarino	16
2.3	Emprego de cruzamentos dialélicos	20
2.4	Heterose e capacidade combinatória em sorgo sacarino	24
3	MATERIAL E MÉTODOS	27
3.1	Locais de condução experimental	27
3.2	Linhagens utilizadas e obtenção das sementes híbridas	28
3.3	Plano experimental e condução	28
3.4	Características avaliadas	29
3.5	Análises estatístico-genéticas	32
3.5.1	Análises de variância	32
3.5.2	Análises dialélicas	34
3.5.3	Heterose e heterobeltiose	35
4	RESULTADOS	37
4.1	Análises de variâncias geral e dialélica	37
4.2	Capacidade geral de combinação	40
4.3	Capacidade específica de combinação	44
4.4	Seleção das combinações híbridas	50
5	DISCUSSÃO	59
6	CONCLUSÕES	65
	REFERÊNCIAS	66
	APÊNDICE A - estimativa da heterose na média dos parentais (H) e hebeltiose (HB) para os caracteres agronômicos florescimento (FLOR, dias) altura de plantas (AP, m), produção de massa verde (PMV, t ha⁻¹) obtidos na avaliação do cruzamento dialélico parcial envolvendo quatro linhagens a e cinco linhagens r de sorgo sacarino. Lavras: MG; Sete Lagoas: MG, 2014/2015	73
	APÊNDICE B - Estimativa da heterose na média dos parentais (H) e heterobeltiose (HB) para os caracteres tecnológicos teor de sólidos solúveis totais (SST, %caldo), sacarose (POL, % caldo), pureza (PUR, %), açúcares redutores (AR, %caldo), açúcares redutores totais (ART, %caldo), açúcares totais recuperáveis (ATR, Kg de açúcar t⁻¹ de colmo), etanol hidratado (EH, l de etanol t⁻¹ de colmo), brix por hectare (TBH, t ha⁻¹) e produção de etanol (ETH, l ha⁻¹) avaliados em dois locais. Lavras: MG; Sete Lagoas: MG, 2016	74

1 INTRODUÇÃO

O sorgo sacarino é uma potencial matéria-prima a ser utilizada na cadeia produtiva do etanol de modo a complementar a cana-de-açúcar. O ciclo curto (quatro meses) e a possibilidade de serem utilizados basicamente os mesmos equipamentos da colheita, moagem e processamento da cana-de-açúcar tornam o sorgo sacarino uma eficiente fonte de matéria-prima para o funcionamento das usinas de etanol durante o período de entressafra da cana-de-açúcar elevando significativamente os ganhos neste período (SANTOS et al., 2015).

O desenvolvimento de novas cultivares mais produtivas e adaptadas é essencial para o estabelecimento deste tipo de sorgo na cadeia produtiva do etanol no Brasil. Estudos mostram que o sorgo sacarino apresenta ampla diversidade genética, (ELANGO VAN et al., 2014; WANG et al., 2009; WANG et al., 2013) justificando o potencial do melhoramento desta cultura.

Ao iniciar um programa de melhoramento, a definição do tipo de cultivar a ser obtida é de suma importância. Em sorgo sacarino, a existência de heterose quanto a caracteres agrônômicos e tecnológicos foi verificada em diversos estudos (BAHADURE et al., 2015; BUNPHAN et al., 2015). Estes trabalhos sugerem a produção de híbridos no melhoramento do sorgo sacarino.

A escolha das linhagens que serão cruzadas é uma etapa bastante crítica do programa de melhoramento. Sua realização eficiente determina o sucesso em obter novas linhagens com performances superiores. Além disso, pode otimizar os gastos com recursos humanos e materiais nas etapas de condução das populações segregantes (SANDEEP et al., 2010).

Uma estratégia bastante útil à avaliação e seleção de linhagens para compor a população base de um programa de melhoramento é o emprego de dialelos, estes possibilitam obter informações a respeito do comportamento de um grupo de genitores *per se* e em combinações híbridas (CRUZ; VENCOVSKY, 1989). A metodologia de análise dialélica proposta por Griffing

(1956) é uma das mais largamente empregadas e informa acerca da ação gênica relacionada com a expressão dos caracteres mediante estimação das capacidades geral e específica de combinação definidas por Sprague e Tatum (1942).

A capacidade geral de combinação é utilizada para designar o comportamento médio de um genitor numa série de combinações híbridas e está associada aos efeitos aditivos dos alelos e as ações epistáticas do tipo aditivo. Por sua vez, a capacidade específica de combinação são os casos nos quais certas combinações híbridas são relativamente superiores ou inferiores ao esperado com base na capacidade geral de combinação, e está associada aos efeitos dos desvios de dominância dos genes, e epistases envolvendo dominância (CRUZ; VENCOVSKY, 1989).

Portanto, objetivou-se avaliar a capacidade geral de combinação de linhagens de sorgo sacarino e a capacidade específica de combinação das combinações híbridas quanto a caracteres agronômicos e tecnológicos. Além disso, identificar híbridos promissores para avaliação em ensaios avançados.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Melhoramento genético do sorgo sacarino

O sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) é uma planta anual da família das poáceas. É o quinto cereal mais importante do mundo (BILLOT et al., 2013), destaca-se dentre as culturas pela diversidade de possibilidades de usos como a produção de ração animal (sorgo granífero), forragem para alimentação de ruminantes (sorgo forrageiro), vassoura (sorgo-vassoura), biocombustíveis (sorgo sacarino e sorgo biomassa) e a alimentação humana (QUEIROZ et al., 2014).

Originou-se no Sudão e Etiópia (KIMBER; DAHLBERG; STEPHEN, 2013). Na natureza é sensível ao fotoperíodo, sendo considerada uma planta de dias curtos. Contudo, germoplasmas elite, têm sido desenvolvidos com insensibilidade ao fotoperíodo, baseadas na manipulação de vários genes de maturação (KIMBER; DAHLBERG; STEPHEN, 2013). É uma espécie adaptada a condições de clima tropical e subtropical apresentando altas taxas fotossintéticas e metabolismo C_4 de fixação de carbono (PEREIRA FILHO et al., 2013).

É uma espécie diplóide ($2n = 2x = 20$) (KUMAR et al., 2011), essencialmente de autopolinização com uma frequência de cruzamento baixa, mas mensurável (PEDERSEN; TOY; JOHNSON, 1998). Apresenta flores andróginas e sua inflorescência é tipo panícula, ereta, situada no ápice da planta. A panícula apresenta numerosas espiguetas sustentadas frequentemente por uma única haste, que se encontram aos pares (DURÃES, 2014).

A variabilidade do sorgo é conservada em bancos de germoplasma em todo o mundo em países como a Etiópia, Sudão, China, Brasil. As duas maiores coleções e que correspondem a maior parte da diversidade do sorgo são mantidas no Centro Nacional para Preservação de Recursos Genéticos,

localizado em Fort Collins, Colorado, EUA, com mais de 43.000 acessos e no Instituto Internacional de Pesquisa Agrícola para o Semi-Árido dos Trópicos (ICRISAT), localizado no estado de Andhra Pradesh, na Índia com mais de 36.000 acessos (KIMBER; DAHLBERG; STEPHEN, 2013). O Brasil possui o banco ativo de germoplasma de sorgo (BAG) desde 1975, na Embrapa Milho e Sorgo, localizada em Sete Lagoas, MG, com mais de 7.000 acessos conservados.

Nos bancos de germoplasma também são realizadas atividades de caracterização, avaliação, regeneração e documentação dos acessos (NETTO, 2010), de modo a melhor disponibilizar os genótipos de sorgo para os programas de melhoramento.

Os programas de melhoramento de sorgo, inicialmente, eram voltados para a obtenção de linhagens. O desenvolvimento de híbridos e, conseqüente aproveitamento da heterose resultante de cruzamentos, foi possível após à descoberta da macho-esterilidade genético-citoplasmática viável. Resultante da combinação de citoplasma Milo e genes kafir. A macho-esterilidade genético-citoplasmática é uma característica que envolve genes mitocondriais, herdados maternamente, e restauradores da fertilidade de natureza nuclear, constituindo um sistema binário. Desse modo, a F_1 de plantas de citoplasma Milo (macho-estéreis) cruzadas com plantas com genes kafir (restauradoras de fertilidade) é totalmente fértil (RAMESH; ORTIZ, 2005; STEPHENS; HOLLAND, 1954; REDDY). Atualmente, as variedades híbridas são usadas extensivamente em sorgo (BUNPHAN; JAISIL; SANITCHON, 2012; REDDY, 2007).

A produção de sementes híbridas de sorgo requer uma linhagem restauradora de fertilidade (R), uma linhagem macho-estéril (A) e uma linhagem mantenedora de esterilidade (B). As linhagens A (feminina) e R (masculina, polinizadora) são cruzadas para produzir um híbrido F_1 macho-fértil. A linhagem macho-estéril (A) é mantida e multiplicada por cruzamento com a linhagem mantenedora (B). As sementes produzidas pelo cruzamento entre as

linhagens A e B resultaram em planta A (macho-estéril) devido ao citoplasma estéril herdado da linhagem A, ou seja, a linhagem B não restaura a fertilidade da linhagem A. Estas linhagens (A e B) são isogênicas, porém diferem na fertilidade do pólen (BUNPHAN et al., 2015; REDDY; RAMESH; ORTIZ, 2005).

Os híbridos quando comparados às variedades, manifestam melhor desempenho para caracteres de importância em cultivares de sorgo como rendimento, florescem mais cedo e são menos sensíveis ao fotoperíodo (REDDY; KUMAR; REDDY, 2010). Este sistema tem sido usado por décadas em sorgo forrageiro e granífero e, recentemente, vem sendo aplicado a sorgo sacarino (BUNPHAN et al., 2015). Diversos trabalhos têm demonstrado a existência de heterose para caracteres de interesse em sorgo sacarino relacionados com o rendimento de etanol (MAKANDA; TONGOONA; DERERA, 2009; PFEIFFER et al., 2010; UMAKANTH et al., 2012). Estes trabalhos sugerem a exploração da heterose pela produção de híbridos no melhoramento do sorgo sacarino.

De modo geral, os programas de melhoramento visando à obtenção de híbridos de sorgo sacarino envolvem as seguintes etapas: escolha da população base, desenvolvimento das linhagens com alta capacidade de combinação para rendimento de açúcar no colmo, cruzamentos e avaliação dos híbridos obtidos.

A primeira etapa do melhoramento do sorgo sacarino visando à obtenção de linhagens é a escolha da população base. A população base escolhida para a extração de linhagens deve apresentar, sobretudo, alta média com elevada proporção de alelos favoráveis já fixados, associados à alta variabilidade genética (RAMALHO et al., 2012). Na maioria dos programas de melhoramento do sorgo sacarino, as populações de melhoramento têm sido geradas a partir de cruzamentos biparentais envolvendo linhagens-elite ou cultivares.

A análise dos efeitos da capacidade de combinação geral e específica de linhagens tem sido largamente empregada em sorgo sacarino com o objetivo de selecionar linhagens superiores (INDHUBALA; GANESAMURTHY; PUNITHA, 2010; MAKANDA; TONGOONA; DERERA, 2009; PFEIFFER et al., 2010; UMAKANTH et al., 2012). Estas informações são úteis na determinação dos parentais e combinações híbridas que devem ser levados para as próximas etapas do melhoramento (PATERNIANI; CAMPOS, 1999).

Após a escolha da população base, são realizados os cruzamentos com objetivo de gerar variabilidade. Posteriormente são conduzidas as gerações de autofecundação até a completa homozigose. Os métodos de condução das gerações de autofecundação frequentemente utilizados são: método da população ('Bulk'), descendente de uma única semente (SSD) e genealógico (RAMALHO et al., 2012). Para o sorgo sacarino, o método de condução mais utilizado no desenvolvimento de linhagens com alta capacidade de combinação para produção de híbridos é o genealógico no ICRISAT (SANDEEP et al., 2010; SRINIVASA et al., 2009) e na Embrapa Milho e Sorgo.

A seleção recorrente também pode ser empregada para o desenvolvimento das linhagens restauradoras e mantenedoras (DOGGETT; EBEHART, 1968; SRINIVASA et al., 2009). O uso da seleção recorrente para caracteres quantitativos, a exemplo do rendimento em litros de etanol é vantajoso devido ao aumento da frequência de alelos favoráveis para o caráter de interesse mediante os ciclos sucessivos de melhoramento (BERNARDO, 2010; RAMALHO et al., 2012). Outra vantagem da seleção recorrente é a facilidade para incorporação de germoplasma exótico e/ou cultivares comerciais na população (RAMALHO et al., 2012). A etapa de recombinação é realizada com o auxílio de uma fonte de macho-esterilidade genética nuclear considerando o gene "Ms₃", conforme Doggett e Eberhart (1968). Este gene na sua forma recessiva condiciona a macho-esterilidade.

O desempenho fenotípico do sorgo sacarino para a maioria dos caracteres de interesse é influenciado pelas interações genótipos x ambientes, que levam ao comportamento diferencial dos genótipos nos diversos ambientes. Com isto, para a seleção e recomendação é necessário realizar avaliações das performances dos híbridos em vários ambientes (RAMALHO et al., 2012). É importante avaliar as interações genótipos x locais, genótipos x anos, entre outras. Este entendimento possibilita um melhor planejamento das estratégias de melhoramento e recomendação de cultivares (VENCOVSKY; BARRIGA, 1992).

Como alternativa para amenizar os efeitos da interação e identificar cultivares com comportamento previsível e responsivas às melhorias do ambiente, observa-se conjuntamente a adaptabilidade e a estabilidade. Existem vários métodos de análise de adaptabilidade e estabilidade de genótipos quando cultivados em diferentes ambientes. Souza et al. (2013) utilizando o método de Annicchiarico, selecionaram genótipos de sorgo sacarino estáveis e adaptados para ambientes favoráveis e desfavoráveis em experimentos conduzidos em cinco locais. Os métodos de análise GGE biplot e Toler mostraram ser complementares e eficientes na avaliação e identificação de genótipos adaptados e estáveis de sorgo sacarino (FIGUEIREDO et al., 2015).

A implantação de seleção assistida por marcadores moleculares nos programas de melhoramento do sorgo sacarino deverá acelerar o desenvolvimento de novas cultivares. O sequenciamento completo do genoma do sorgo (PATERSON et al., 2009) possibilita sua utilização para acelerar a descoberta de genes de interesse agrônomico.

Na literatura são encontrados trabalhos que identificaram vários QTLs que controlam características como a arquitetura da planta (folhas, raízes e caule), teor de açúcares, produção de massa verde, tempo de floração, eficiência da bioconversão, tolerância a estresses, bióticos e abióticos, indicando que estas

características são controladas por vários genes, com interações complexas, discutidos por Anami et al. (2015a; 2015b).

No Brasil, o desenvolvimento de novas variedades e híbridos de sorgo sacarino tem sido realizado pela Embrapa Milho e Sorgo e por empresas privadas (e.g. Nexsteppe), estes programas visam à seleção de genótipos de sorgo sacarino de alto desempenho para uso na produção de etanol durante o período da entressafra da cana de açúcar, em diferentes regiões do Brasil (DURÃES, 2014).

2.2 Caracteres alvo do melhoramento do sorgo sacarino

Para o sorgo sacarino, o principal objetivo dos programas de melhoramento é o desenvolvimento de cultivares com elevada produtividade de etanol ($L\ ha^{-1}$). Com isso, vários outros caracteres agrônômicos e tecnológicos relacionados necessitam ser observados conjuntamente. Dentre estes caracteres, pode-se destacar com respectivas intenções de melhoramento: maior produtividade de colmos industrializáveis, maior rendimento de caldo, maior diâmetro do colmo, altura de planta, menor tamanho de panícula, resistência a insetos e doenças, resistência ao acamamento, diferentes grupos de maturação e tolerância a estresses abióticos (e.g. falta de água, salinidade, acidez), elevado teor de açúcares totais, menor teor de fibra e longo período de utilização industrial (LOMBARDI et al., 2015).

São os açúcares presentes no caldo extraído do colmo que são fermentados e convertidos em etanol pelo fungo *Saccharomyces cerevisiae* (ALMODARES; HADI, 2009). Com isto, os programas de melhoramento do sorgo sacarino buscam principalmente desenvolver genótipos com elevado rendimento de caldo, ricos em açúcares. O caldo acumula o máximo de açúcares quando os grãos atingem a maturidade fisiológica (SANDEEP et al., 2010).

Próximo da maturidade das sementes, o caldo pode conter entre 10-25% de açúcares (principalmente sacarose, glicose e frutose) (WANG et al., 2009).

O controle genético da presença de caldo no colmo e o conteúdo de açúcar no caldo em sorgo foram estudados por Nan, Best e Carvalho Neto (1994). Foram realizadas hibridações entre cultivares de sorgo ganífero de colmo seco e baixo teor de açúcar com a cultivar Roma de sorgo sacarino. As plantas F_1 apresentaram colmo seco, e a segregação observada na F_2 foram 3 plantas com colmo seco para 1 com caldo (231:69), seguindo o padrão de herança monogênica com dominância do alelo que condiciona ausência de caldo no colmo. As 69 plantas F_2 que apresentaram caldo no colmo foram fenotipadas para o conteúdo de açúcar. Verificou-se que o Brix variou entre 6° a 18,5°, mostrando uma segregação contínua do teor de açúcar, o que sugere que esta característica é controlada por vários genes, com padrão de herança quantitativa.

Genótipos que atendam às características tecnológicas demandadas pelo mercado é o principal ponto no melhoramento do sorgo sacarino. Estes devem apresentar boa qualidade da matéria-prima para um melhor rendimento no processamento industrial. A boa qualidade da matéria-prima está diretamente relacionada a uma elevada extração do caldo, maior teor de sólidos solúveis, sacarose e pureza, menor teor de fibra e açúcares redutores, elevada produção de açúcares totais e etanol por tonelada de colmo.

O programa de melhoramento da Embrapa Milho e Sorgo estabeleceu as seguintes metas de produtividade e qualidade em variedades e/ou híbridos de sorgo sacarino: produtividade mínima de biomassa de 60 t ha⁻¹ extração mínima de açúcar total de 120 kg t⁻¹ de colmo, considerando a eficiência de extração de 90-95%; conteúdo mínimo de açúcar total no caldo de 14%; produção mínima de etanol de 60 L t⁻¹ de colmo; período de utilização industrial (PUI) mínimo de 30 dias com extração mínima de açúcar total de 100 kg t⁻¹ de colmo (PARRELA, 2011).

Entre os fatores que podem interferir na produtividade do etanol do sorgo sacarino estão as doenças, uma vez que os patógenos podem atacar partes da planta como colmo e folhas, causando redução na área foliar fotossintetizante, podridão e danos nos colmos, com conseqüente redução na quantidade e qualidade de açúcares, seca precoce das plantas e acamamento. No Brasil, as principais doenças do sorgo são a antracnose (*Colletotrichum sublineolum*), míldio (*Peronosclerospora sorghi*), helmintosporiose (*Exserohilum turcicum*), ferrugem (*Puccinia purpurea*), ergot ou doença açucarada (*Claviceps africana*) e a podridão seca (*Macrophomina phaseolina*) (CASELA et al., 2007).

Nessa cultura, resistência/tolerância a insetos também é importante, segundo May et al. (2012a), o baixo aporte de inseticidas disponíveis para utilização nas lavouras de sorgo no Brasil impulsiona o setor produtivo a buscar estratégias de controle viáveis e sustentáveis, dentre elas, a utilização de cultivares resistentes/tolerantes. As pragas da cultura do sorgo são divididas em dois grupos: pragas iniciais que compreendem um grupo de insetos que atacam desde as sementes até as plântulas, dentre elas cita-se a peludinha (*Astylus variegatus*); larva-aramé (*Conoderus scalaris*) entre outras, e pragas da parte vegetativa que atacam folhas e colmos como a lagarta-do-cartucho [*Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith)], broca da cana-de-açúcar (*Diatraea* spp.) e a lagarta-elasma (*Elasmopalpus lignosellus*); tais pragas causam diversos danos diretos e indiretos em lavouras de sorgo. Neste contexto, atenção especial tem sido dada à broca-da-cana (*Diatraea* spp.), buscando selecionar cultivares com maiores níveis de resistência (PARRELA, 2011).

A tolerância a estresses abióticos como a toxicidade ao alumínio e solos ácidos/salinidade do mesmo modo são características pretendidas em programas de melhoramento de sorgo sacarino. Além disso, novas cultivares ou híbridos

com diferentes períodos de maturidade são necessárias para o melhoramento, de forma a determinar um período total de colheita mais longo.

Outra característica importante é o acamamento, uma vez que, as plantas de sorgo sacarino são de porte alto (3 a 5 m de altura) e possuem panícula com grãos no ápice, fazendo com que as cultivares sejam mais propensas ao acamamento (PARRELA, 2011). Assim, nos programas de melhoramento, busca-se associar menor tamanho de panícula e maior diâmetro do colmo.

Com relação aos caracteres agronômicos, outra característica visada é a insensibilidade ao fotoperíodo. O sorgo sensível é uma planta de dias curtos, ou seja, floresce em períodos do ano com noites longas. De maneira que, a gema apical permanece vegetativa até que os dias encurtem o bastante para haver a sua diferenciação em gema floral, e isso é o que se chama fotoperíodo crítico (PARRELA et al., 2010). Para o sorgo sacarino, tal característica é indesejável, já que as plantas demorariam mais tempo para florescer, e, conseqüentemente, ocorreria o acúmulo de carboidratos no colmo, sendo que a maioria das cultivares são insensíveis ao fotoperíodo. Contudo, a sensibilidade ao fotoperíodo tem sido aproveitada em alguns programas de melhoramento do sorgo sacarino buscando plantas que demoram mais para a maturação e conseqüentemente acumulam maior quantidade de matéria-verde e açúcares.

A seleção eficiente de um caráter pode ser aumentada com a utilização de caracteres agronômicos correlacionados (RAMALHO et al., 2012). A associação entre caracteres de interesse no melhoramento do sorgo sacarino tem sido estudada. Bunphanet et al. (2015), avaliou híbridos de sorgo sacarino e observou que o rendimento de açúcares foi positivamente correlacionado com o teor de sólidos solúveis do caldo, altura de plantas, diâmetro do colmo, rendimento de biomassa, rendimento de colmo e rendimento de caldo. Por sua vez, o rendimento de grãos foi negativamente correlacionado com o rendimento de açúcar.

O estudo das correlações fenotípicas mediante a análise de trilha (LOMBARDI et al., 2015), demonstrou que o caráter toneladas de brix por hectare (TBH) apresentou elevado efeito direto e correlação alta e positiva com o rendimento de etanol por área. Logo, podem-se obter ganhos para o rendimento de etanol a partir da avaliação do TBH. Esta evidência é bastante interessante, haja vista, a maior praticidade para avaliação de ensaios, aliado ao fato de que o caráter TBH associa a extração do caldo, teor de sólidos solúveis e a produção de matéria verde, se apresentando como um índice de seleção bastante prático e eficiente.

2.3 Emprego de cruzamentos dialélicos

A escolha dos genitores que irão constituir a população base é considerada uma das etapas mais importantes e difíceis nos programas de melhoramento. O consenso é que a população ideal para iniciar um programa de melhoramento deve apresentar elevada média e ampla variabilidade (BERNARDO, 2010).

O melhorista dispõe de vários métodos de seleção de parentais com destaque para os cruzamentos dialélicos (RAMALHO; SANTOS; ZIMMERMANN, 1993). O termo dialélico tem sido utilizado para expressar o conjunto de $p(p-1)/2$ híbridos resultante do acasalamento entre p genitores (linhagens, variedades, clones etc), podendo incluir além dos genitores, gerações relacionadas (CRUZ; REGAZZI; CARNEIRO, 2012). Seu uso se mostra bastante vantajoso, dando informações do desempenho da população *per se* e em combinações híbridas. Além disso, permite obter estimativas de parâmetros genéticos úteis na seleção dos genitores para hibridação e no entendimento da natureza, e magnitude dos efeitos genéticos envolvidos na determinação dos caracteres (CRUZ; REGAZZI; CARNEIRO, 2012).

Os cruzamentos dialéticos são divididos em quatro tipos: completos ou balanceados, parciais, circulantes e os incompletos ou desbalanceados. a) dialelos balanceados: incluem os híbridos F_1 's entre todos os pares de combinações dos genitores; b) dialelos parciais: envolvem dois grupos de genitores e seus respectivos cruzamentos; c) dialelos circulantes: os genitores são representados por um mesmo número de cruzamentos, porém inferior a $p-1$, sendo p o número de genitores; d) dialelos desbalanceados: todas as combinações híbridas e também as demais gerações estão representadas, porém em frequência variável, em virtude do número desigual de repetições por tratamento (CRUZ; REGAZZI; CARNEIRO, 2012).

Encontram-se disponíveis na literatura vários métodos de análise dos cruzamentos dialéticos, como a proposta por Griffing (1956), pela qual são estimados os efeitos da capacidade geral e específica de combinação; a metodologia proposta por Gardner e Eberhart (1966), na qual são avaliados os efeitos de variedades e heterose varietal; e a proposta por Hayman (1954) que dá informações sobre mecanismo básico de herança do caráter em estudo e dos valores genéticos dos progenitores.

A análise da capacidade combinatória proposto por Griffing (1956) é considerada alternativa bastante viável para seleção de genitores (HALLAUER; MIRANDA FILHO; CARENA, 2010). Os conceitos de capacidade geral e capacidade específica de combinação foram propostos por Sprague e Tatum (1942). De acordo com estes autores, a capacidade geral de combinação (CGC) é o desempenho médio de uma linhagem em combinações híbridas e a capacidade específica de combinação (CEC) o comportamento que leva certas combinações a serem superiores ou inferiores em relação ao esperado pelo desempenho médio das linhagens parentais. Estes autores também enfatizam que as estimativas de CGC e CEC são relativas e dependem do conjunto de linhagens incluídas nos híbridos sob teste. A CGC é associada principalmente aos efeitos aditivos dos

alelos, enquanto CEC é determinada por efeitos de dominância dos alelos (SPRAGUE; TATUM, 1942). Cruz e Vencovsky (1989) comentam que a CGC é influenciada também pelos efeitos de dominância, apenas nos casos onde a frequência alélica média dos testadores é 0,5 ou não há efeito de dominância a CGC depende apenas das ações gênicas aditivas.

O método proposto por Griffing (1956) pode ser analisado em diferentes esquemas de cruzamentos dialélicos, sendo classificado em: Método 1: parentais, híbridos e recíprocos (todas as p^2 combinações); Método 2: parentais e híbridos ($p(p+1)/2$); Método 3: híbridos e recíprocos ($p(p-1)$ combinações); Método 4: híbridos, sem os genitores e recíprocos ($p(p-1)/2$).

Geraldi e Miranda Filho (1988) propuseram um modelo para o estudo da capacidade geral e específica em dialelos parciais envolvendo os genitores e F_1 's, que se constitui numa adaptação do modelo de Griffing (1956). O uso do dialélio parcial apresenta a vantagem de se maximizar as informações sobre os grupos estudados com um número menor de cruzamentos (CRUZ; REGAZZI; CARNEIRO, 2012). Adicionalmente, quando nem todas as combinações entre os parentais são interessantes, é possível separar os genitores em dois grupos e realizar apenas os cruzamentos mais desejáveis (RAMALHO; SANTOS; ZIMMERMANN, 1993). Os procedimentos mecânicos para o desenvolvimento dos cruzamentos e os princípios de análise de dados são semelhantes aos do dialelo completo. Desse modo, o esquema de cruzamento dialélico parcial é mais apropriado na maioria dos casos do que o dialelo completo, porque um número maior de genitores pode ser incluído utilizando os mesmos recursos disponíveis (HALLAUER; MIRANDA FILHO; CARENA, 2010).

A inclusão dos genitores na análise dialélica é bastante interessante, uma vez que gera estimativas de efeitos com menor erro-padrão, também proporciona estimativas adicionais de efeitos da capacidade de combinação e possibilita uma

avaliação do desempenho dos progenitores “*per se*” (CRUZ; REGAZZI; CARNEIRO, 2012).

A análise dialélica também permite estudar o padrão heterótico dos cruzamentos, quando populações divergentes são usadas para o desenvolvimento de novos híbridos (FALCONER; MACKAY, 1996).

O termo heterose foi proposto por Shull, em 1908, e é o fenômeno decorrente da superioridade da geração F_1 (híbrido) em relação à média dos seus genitores. O vigor híbrido se manifesta nos descendentes de linhagens com elevada CEC (HALLAUER; MIRANDA FILHO; CARENA, 2010). A heterose é expressa quando os parentais de um híbrido têm diferentes alelos nos locus e há algum nível de dominância entre eles (parcial, completa ou sobredominância) (FALCONER; MACKAY, 1996). A presença e a magnitude da heterose evidenciam a perspectiva para a produção de híbridos.

Apesar da importância da heterose para a agricultura, a base genética ainda não é bem compreendida (PATERNIANI; CAMPOS, 1999). As principais hipóteses que explicam a heterose são a dominância e a sobredominância. O princípio da hipótese de dominância é que o valor do heterozigoto em um loco simples não supera o homozigoto, no entanto, quando existem dois ou mais locos no controle do caráter, a F_1 terá alelos favoráveis em todos os locos em heterozigose, de modo que, o desempenho da F_1 será superior (BERNARDO, 2010). Outra teoria difundida é a de sobredominância, que consiste na superioridade do locus heterozigoto sobre qualquer dos homozigotos na determinação do caráter por ele controlado (PATERNIANI; CAMPOS, 1999). De acordo com o mesmo autor, as interações inter-alélicas (epistasia) também podem explicar a heterose em alguns cruzamentos.

Na literatura há vários relatos da eficiência da utilização da análise dialélica na avaliação da CGC e CEC de linhagens e na determinação do padrão

heterótico de cruzamentos híbridos (DURÃES, 2014; KRAUSE; RODRIGUES; LEAL, 2012; PFEIFFER et al., 2010).

2.4 Heterose e capacidade combinatória em sorgo sacarino

Para o sorgo sacarino, estimativas da capacidade de combinação têm sido úteis na seleção de linhagens para hibridação e na determinação do tipo de ação gênica predominante na expressão fenotípica de características associadas à produção de etanol. De modo geral, genes com ação gênica aditiva e não-aditiva (e.g. dominância) têm se mostrado importantes na expressão fenotípica de caracteres como rendimento de etanol, florescimento, produção de massa verde, altura e teor de açúcar. Combinações híbridas apresentam manifestação heterótica tanto para caracteres agronômicos quanto para os caracteres tecnológicos (DURÃES, 2014).

No trabalho desenvolvido por Makanda, Togoona e Derera (2009) com objetivo de selecionar linhagens e cruzamentos para recomendação e uso nos programas de melhoramento do sorgo sacarino para ambientes de várzea tropical, gerou-se 64 híbridos a partir de 16 linhagens de sorgo sacarino utilizadas na Carolina do Norte - EUA. Estes híbridos foram cultivados e avaliados na África (Moçambique e África do Sul). Ambas as ações gênicas aditivas como não-aditivas tiveram importância no controle dos sólidos solúveis totais, dias para o florescimento, altura de plantas e biomassa do colmo. Apenas o diâmetro do colmo apresentou predominância da ação gênica aditiva. Duas linhagens masculinas, ZLR1 e ICSVP3046, mostraram efeitos significativos e positivos de CGC para o teor de sólidos solúveis, enquanto 13 combinações híbridas mostraram efeitos significativos e positivos para a CEC. Em geral os híbridos apresentaram maior biomassa do que as linhagens, contribuindo para uma maior produção de açúcar.

Um trabalho bastante interessante foi desenvolvido por Pfeiffer et al. (2010). O experimento foi conduzido em 2004 e 2005, na Universidade de Kentucky, Lexington, KY, EUA. Quatro variedades de sorgo sacarino foram esterilizadas utilizando o citoplasma macho-estéril A3. As versões macho-estéreis foram cruzadas em todas as combinações com as mesmas linhagens macho-férteis. As linhagens utilizadas não restauraram a fertilidade neste tipo de macho-esterilidade citoplasmática A3, ou seja, são mantenedoras deste tipo de macho-esterilidade de modo que os híbridos produzidos eram macho-estéreis. Os resultados mostraram que as linhagens masculinas e os híbridos macho-estéreis apresentaram maior teor de Brix. Os híbridos apresentaram maior diâmetro de colmo e altura de plantas e conseqüentemente maior rendimento de colmo.

Indhubala et al. (2010) na Índia, avaliou a CGC de 12 genitores e a CEC de 35 híbridos. Pelos resultados obtidos, ações gênicas não-aditivas foram mais importantes na expressão fenotípica de todos os caracteres estudados: altura de plantas, dias para 50% das plantas florescerem, rendimento de grãos, rendimento total de biomassa, rendimento de colmo verde, rendimento de caldo, extração de caldo, açúcares redutores, sólidos solúveis e etanol. Pelos efeitos das CGC foi possível selecionar as linhagens macho-estéreis BJ 3A, CK 60A e AKMS 22A e as linhagens restauradoras de fertilidade RSSV 9, SSV 84 e ASV 9401 com elevado potencial para uso em programas de melhoramento genético de sorgo sacarino. Também foram selecionadas combinações híbridas promissoras: AKMS 22A x RSSV 9, BJ 3A x VMS 98001, BJ 3A x RSSV 9, AKMS14A x RSSV 9 e CK 60 A x VMS 98001.

No trabalho desenvolvido na Índia por Umakanth et al. (2012), utilizando as estimativas da CGC e CEC foram selecionadas as linhagens macho-estéreis DMS28A para as características rendimento colmo verde, caldo e de grãos e a DMS 25A para o conteúdo de SST. A linhagem Rio utilizada

como restauradora foi selecionada para as características rendimento de colmo, açúcar, etanol e grão. Foram selecionadas as combinações híbridas DMS 13A x Rio e DMS 23A x RS 647, recomendadas para exploração na produção de etanol.

No estudo desenvolvido por Bunphan et al. (2015), na Tailândia, foram gerados quinze híbridos de cinco linhagens restaurados e três macho-estéreis com o objetivo de avaliar a CGC, CEC e heterose de híbridos de sorgo sacarino. Observou que houve heterose positiva para o rendimento de biomassa, rendimento de caldo e rendimento de grãos. A CGC foi significativa para a maioria das características, porém os efeitos da CEC foram mais importantes. As combinações híbridas KKA-11 × BJ248, kka-11 ×KKU40, KKA-139 × BJ248, KKA-14 × KKU40 e KKA-53 × Theis tiveram maiores efeitos de CEC para a produção de açúcar. Dois híbridos (KKA-11 × BJ248 e KKA-139 × BJ248) produziram aproximadamente 4.600 L ha⁻¹ de etanol, utilizando açúcares e grãos.

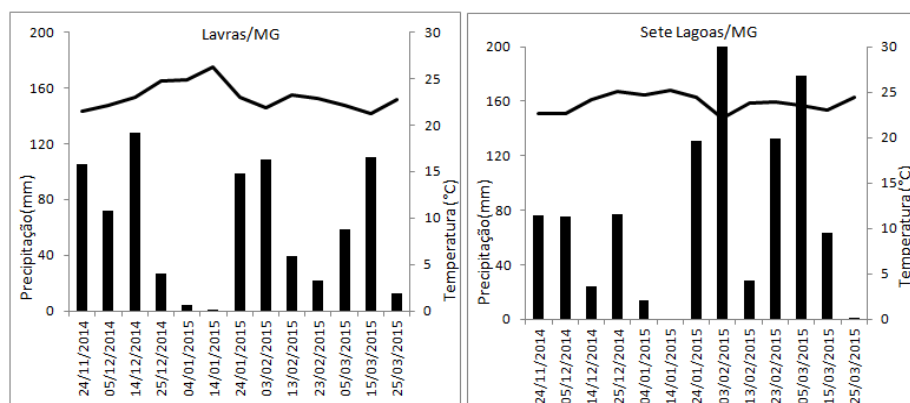
3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Locais de condução experimental

Os experimentos foram conduzidos em dois locais no estado de Minas Gerais na safra 2014/2015 (Figura 1):

- Área experimental da Embrapa Milho e Sorgo no município de Sete Lagoas, região central do estado a 767 m de altitude, 19° 27' 57" de latitude sul e 44° 14' 49" de longitude oeste;
- Área experimental situada no Centro de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Agropecuária – Muquém da Universidade Federal de Lavras-UFLA localizada na cidade de Lavras a uma altitude de 918 m, 21° 14' de latitude sul e 45° 00' de longitude oeste.

Figura 1 - Representação gráfica da precipitação (mm) acumulada e temperatura (°C) média, descendiais, medidas em Lavras e Sete Lagoas entre 24/11/2014 e 01/04/2015 (Instituto Nacional de Meteorologia - INMET, 2016).



3.2 Linhagens utilizadas e obtenção das sementes híbridas

Foram utilizadas cinco linhagens restauradoras de fertilidade (R): BRS 511, BRS 508, CMSXS643, CMSXS646, CMSXS647 e quatro linhagens macho-estéreis (A): 201402B010-A, 201402B013-A, 201402B007-A, 201402B022-A pertencentes ao programa de melhoramento da Embrapa Milho e Sorgo, situado em Sete Lagoas – MG. As quatro linhagens A e cinco linhagens R foram cruzadas em esquema dialélico parcial obtendo-se 20 híbridos. Utilizou-se como testemunha a cultivar CV 198.

O plantio das linhagens foi realizado no primeiro semestre de 2014, em campo, na área experimental da Embrapa Milho e Sorgo. A obtenção das sementes híbridas foi realizada mediante cruzamento manual.

3.3 Plano experimental e condução

Os experimentos foram implantados no delineamento látice retangular 5x6 com três repetições em cada local. As parcelas experimentais se constituíram de duas linhas de 5,0 m de comprimento e espaçadas por 0,70 m entre fileiras.

O plantio manual dos experimentos ocorreu em novembro de 2014 coincidindo com o período chuvoso na região sudeste. Previamente, foi realizado o preparo da área com aplicação do herbicida glifosato 3 L ha⁻¹ e adubação de fundação com 450 kg ha⁻¹ da formulação 08:28:16 de NPK nos sulcos de plantio. Após 15 dias de emergência foi realizado o desbaste permitindo a manutenção de estande de 120.000 plantas por hectare.

Os experimentos foram conduzidos em condições de sequeiro. O controle das plantas daninhas foi realizado mediante aplicação de herbicida químico pós-emergente à base de Atrazina, na dosagem de 3 kg ha⁻¹ do ingrediente ativo, e com complementação por meio de controle mecânico. Em cada experimento foi feita a adubação de cobertura em torno de 30 dias após o

plântio mediante aplicação de 200 kg ha⁻¹ de ureia. Os demais tratos culturais foram realizados conforme recomendado para a cultura.

A colheita foi realizada em março de 2015 quando os grãos se apresentaram no estágio pastoso/duro, 120 dias após a semeadura em Lavras e 110 dias após a semeadura em Sete Lagoas.

3.4 Características avaliadas

Foram avaliados dezesseis caracteres, sendo estes divididos em agrônômicos, avaliados por ocasião da colheita e tecnológicos, mensurados no Laboratório de Análises Tecnológicas da Embrapa Milho e Sorgo.

Caracteres agrônômicos:

1. Florescimento (FLOR, dias) – Foi anotado o número de dias decorridos do plântio até o ponto em que 50% das plantas da parcela florescerem.
2. Altura de planta (AP, m) – A partir da altura média (m) de cinco plantas tomadas aleatoriamente da parcela, sendo medidas da superfície do solo ao ápice da panícula.
3. Produção de massa verde (PMV, t ha⁻¹) – Foram cortadas as plantas da parcela a 5,0 cm da superfície do solo. Em seguida foram pesadas (planta inteira sem panículas) por meio de uma balança de suspensão digital, em kg. Os dados foram expressos em t ha⁻¹.
4. Matéria seca (MS, %) – Amostras de cada tratamento foram pesadas determinando-se o Peso Verde (PV), posteriormente foram acondicionadas em sacos de papel e levadas para estufa de ventilação de ar forçado (65°),

por cerca de 48 horas. Após a secagem, as amostras foram pesadas novamente e determinou-se o Peso Seco (PS). Posteriormente, a MS foi determinada pela seguinte expressão:

$$MS = PS/PV \times 100$$

5. Produção de matéria seca (PMS, t ha⁻¹) – Determinada a partir da seguinte expressão:

$$PMS = MS \times PMV$$

Caracteres tecnológicos:

6. Extração de caldo (EXT, %) – Foram amostradas aleatoriamente seis plantas inteiras por parcela, sem panículas. Em seguida as plantas foram desintegradas em desfibrador e homogeneizadas. Posteriormente, foi retirada uma subamostra de 500 ± 0,5 g para extração do caldo em prensa hidráulica, com pressão mínima e constante de 250 kgf/cm² sobre a amostra, durante o tempo de 1 minuto. A partir do caldo extraído anota-se o peso do caldo (g) da subamostra. A partir dos valores obtidos foi mensurada a extração através das formulas:

$$EXT = \text{Peso do caldo}/500 \times 100$$

7. Sólidos solúveis totais (SST, %caldo) – Determinados em caldo filtrado em papel por meio de um refratômetro digital de leitura automática, com correção automática da temperatura e resolução máxima de 0,1°Brix, de acordo com método proposto pela *Association of Official Analytical Chemists* - AOAC (1990).

- 8.** Sacarose (POL, %caldo) – Pol do caldo (teor de sacarose aparente por cento, em peso de caldo) foi calculada pela seguinte equação (CONSECANA, 2006):

$$POL = (1,00621 \times LAI + 0,05117) \times (0,2605 - 0,0009882 \times SST),$$

em que:

LAI= Leitura sacarimétrica

- 9.** Pureza (PUR, %) – Porcentagem de pol em relação ao SST, foi calculada pela seguinte equação (CONSECANA, 2006):

$$PUR = 100 \times POL/SST$$

- 10.** Açúcares redutores do caldo (AR, %caldo) – O teor de açúcares redutores, por cento, em peso de caldo foi calculado pela seguinte equação (CONSECANA, 2006):

$$AR = 3,641 - 0,0343 \times PUR$$

- 11.** Fibra (FIB, %) – Foi calculada pela seguinte equação (CONSECANA, 2006):

$$F = [(100 \times PBS) - (PBU \times SST)]/[5 \times (100 - SST)],$$

em que:

PBS= Peso do bagaço seco;

PBU= Peso do bagaço úmido.

- 12.** Açúcares redutores totais (ART, %caldo) – corresponde ao teor de açúcares redutores totais, em %caldo determinado pela seguinte equação (CONSECANA, 2006):

$$ART = AR \times (1 - 0,01 \times FIB) \times C,$$

em que:

$$C = 1,0313 - 0,00575 \times \text{FIB}$$

- 13.** Açúcares totais recuperáveis (ATR, kg de açúcar t⁻¹ de colmo) – representa todos os açúcares contidos no caldo do sorgo na forma reduzida ou açúcar invertido. O ATR (kg de açúcares por tonelada de sorgo) foi calculado pela seguinte equação (CONSECANA, 2006):

$$\text{ATR} = 9,5263 \times \text{POL} + 9,05 \times \text{AR}$$

- 14.** Etanol hidratado (EH, L de etanol t⁻¹ de colmo) – Corresponde a produção de etanol hidratado, em litros por tonelada de sorgo. Foi estimado mediante a seguinte equação (CONSECANA, 2006):

$$\text{EH} = \text{ART} \times 10 \times 0,6475 \times 0,85$$

- 15.** Tonelada de brix por hectare (TBH, t ha⁻¹) – Determinado a partir da equação seguinte:

$$\text{TBH} = \text{PMV} \times \text{EXT} \times \text{SST}$$

- 16.** Produção de etanol (ETH, L ha⁻¹) – Foi estimado mediante seguinte equação:

$$\text{ETH} = \text{EH} \times \text{PMV}$$

3.5 Análises estatístico-genéticas

3.5.1 Análises de variância

Primeiramente foram realizadas as análises de variância individuais com recuperação da informação interblocos (por local) dos dados dos caracteres avaliados de acordo com o seguinte modelo estatístico:

$$y_{ijk} = \mu + r_i + b_{(i)j} + g_k + e_{ijk},$$

Em que: y_{ijk} é a observação da parcela do bloco j dentro da repetição i que recebeu o genótipo k ; μ é uma constante associada às observações; r_i é o efeito da repetição i , $r_i \sim N(0, \sigma_r^2)$; $b_{(i)j}$ é o efeito do bloco j dentro da repetição i , $b_{(i)j} \sim N(0, \sigma_b^2)$; g_k é o efeito do genótipo (linhagem ou híbrido) k ; e_{ijk} é o erro experimental associado à y_{ijk} , $e_{ijk} \sim N(0, \sigma_e^2)$. Os parâmetros σ_r^2 , σ_b^2 e σ_e^2 referem-se às variâncias associadas aos efeitos aleatórios das repetições, blocos dentro de repetições e ao erro.

Para a validade dos resultados obtidos nas análises de variância, foram verificados previamente os pressupostos. Foram empregados o teste de Shapiro-Wilk e o método gráfico Q-Q plot para verificar a normalidade dos erros, conforme apresentado em Ramalho et al. (2012) e Ferreira (2005).

Para proceder à análise multilocais, foi previamente verificada a homogeneidade das variâncias residuais por meio do teste de Bartlett. Esta análise conjunta seguiu o seguinte modelo estatístico:

$$y_{ijkl} = \mu + a_l + r_{i(l)} + b_{(il)j} + t_k + ta_{ki} + e_{ijkl},$$

Em que: y_{ijkl} é a observação da parcela do bloco j dentro da repetição i no local l que recebeu o genótipo k ; μ é uma constante associada às observações; a_l é o efeito do local l ; $r_{i(l)}$ é o efeito da repetição i dentro do local l , $r_{i(l)} \sim N(0, \sigma_r^2)$; $b_{(il)j}$ é o efeito do bloco j dentro da repetição i no local l , $b_{(il)j} \sim N(0, \sigma_b^2)$; t_k é o efeito do genótipo k ; ta_{ki} é o efeito da interação do genótipo k com o local l ; e e_{ijkl} é o erro experimental associado à y_{ijkl} , $e_{ijkl} \sim N(0, \sigma_e^2)$.

A precisão experimental foi aferida pela estimação do coeficiente de variação ambiental (CV) (PIMENTEL-GOMES; GARCIA, 2002) e acurácia seletiva (r_{gg}) (RESENDE; DUARTE, 2007).

Procedeu-se o agrupamento das médias fenotípicas ajustadas dos genótipos pelo teste Scott-Knott a 5% de probabilidade (SCOTT; KNOTT, 1974).

Com objetivo de selecionar as combinações híbridas, foram construídos gráficos tipo radar com os desempenhos médios padronizados dos híbridos que apresentaram médias superiores de produção de etanol ($L ha^{-1}$) e da testemunha (CV 198) para cada característica, conforme Mendes et al. (2009).

As análises estatísticas foram realizadas por meio do programa R (R CORE TEAM, 2015).

3.5.2 Análises dialélicas

Foi feito o desdobramento do efeito de genótipos e da interação genótipos x ambiente de acordo com a estrutura de delineamento de cruzamento dialelo parcial a partir das médias fenotípicas ajustadas dos genótipos. Para isso, adotou-se o seguinte modelo proposto por Geraldi e Miranda Filho (1988), que se constitui numa adaptação do modelo de Griffing (1956) para o estudo da capacidade geral e específica em dialelos parciais envolvendo os genitores e F_1 's (CRUZ; REGAZZI; CARNEIRO, 2012):

$$y_{kk'} = \mu + \frac{1}{2}(d1 + d2) + g_k + g_{k'} + s_{kk'} + e_{kk'}$$

Em que: $\bar{y}_{kk'}$ é o valor médio da combinação híbrida entre a k-ésima linhagem do A, e k'-ésima linhagem R; μ é a média geral; d1, d2 são os contrastes envolvendo médias das linhagens R e A e a média geral; g_k é o efeito

da capacidade geral de combinação da k-ésima linhagem A; $g_{k'}$ é o efeito da capacidade geral de combinação da k'-ésima linhagem R; $s_{kk'}$ é o efeito da capacidade específica de combinação entre as linhagens k e k'; $\bar{e}_{kk'}$: erro experimental médio.

A significância dos efeitos presentes no modelo dialélico foi verificada pelo teste t-Student a 5% de probabilidade. As análises dialélicas foram realizadas com auxílio do programa GENES (CRUZ, 2013).

Posteriormente, foram gerados gráficos do tipo radar a partir dos efeitos g_k e $g_{k'}$ estudentizados para cada característica m ($t_{k(m)}$) avaliada, mediante a fórmula seguinte:

$$t_{k(m)} = g_{k(m)} / \hat{\sigma}_{g_{k(m)}}^2$$

Em que: $\hat{\sigma}_{g_{k(m)}}^2$ é o erro-padrão do efeito da CGC, da linhagem k, para a característica m.

Os valores estudentizados foram somados a uma constante de modo a tornar as estimativas sempre positivas.

3.5.3 Heterose e heterobeltiose

Para cada caráter avaliado foi calculada a heterose na média dos parentais (H), pela seguinte expressão:

$$H = \{F_1 - [(P_1 + P_2)/2]\} / F_1 \times 100$$

Em que:

F_1 : média do híbrido F_1 ; P_1 : média do pai 1 (linhagem macho-estéril); P_2 : média do pai 2 (linhagem restauradora).

Determinou-se também a heterose na média do parental de melhor desempenho (linhagem restauradora de fertilidade), heterobeltiose (HB), pela expressão seguinte:

$$HB = (F_1 - P_2) / F_1 \times 100$$

4 RESULTADOS

4.1 Análises de variâncias geral e dialélica

A precisão experimental foi avaliada por meio das estimativas das acurácias seletivas (r_{gg}) e dos coeficientes de variação ambiental (CV), calculados a partir das análises individuais nos dois locais para os caracteres estudados (Tabelas 1 e 2). Em Lavras, a r_{gg} variou entre 60,41% para a característica EXT e 98,73% para a característica AP. O CV variou entre 2,06% para a característica FLOR e 14,31% para a característica POL. Em Sete Lagoas, a r_{gg} variou entre 36,43% para a característica PUR e 94,06% para a característica ALT. O CV variou entre 3,82% para a característica EXT e 26,05% para a característica POL. A precisão experimental obtida para a quase totalidade de caracteres avaliados foi classificada como moderada, alta e muito alta conforme Resende e Duarte (2007), indicando boa precisão experimental.

Foram detectadas diferenças entre os locais para todas as características avaliadas (Tabelas 1 e 2). Verificou-se que, de modo geral, os rendimentos dos genótipos para os caracteres estudados foram superiores nas avaliações conduzidas na cidade de Lavras.

Houve diferenças significativas entre os genótipos quanto a todas as variáveis analisadas, indicando que os genótipos estudados apresentam elevada variação genética (Tabelas 1 e 2). Houve efeito significativo da interação genótipos x locais para a maioria dos caracteres, com exceção apenas das características EXT, PUR e AR. Este resultado mostra a importância de se realizar, em sorgo sacarino, avaliações em multi-ambientes, quantificação e entendimento da interação genótipo \times ambiente e conduzir análises de estabilidade para selecionar materiais de qualidade superior.

Tabela 1 - Resumo da análise de variância e dialélica do caractere agrônômico florescimento (FLOR, dias) mensurado em Lavras e dos caracteres agrônômicos altura de plantas (AP, m), produção de massa verde (PMV, t ha⁻¹), matéria seca (MS, %) e produção de matéria seca (PMS, t ha⁻¹) avaliados em linhagens e híbridos de sorgo sacarino em dois locais. Lavras:MG; Sete Lagoas:MG, 2016

Fontes de variação	Estatística F						
	GL	Flor	GL	AP	PMV	MS	PMS
Local (L)	-	-	1	9,62**	9,42*	87,30**	39,41**
Genótipos (G)	29	14,36**	29	27,57*	15,94**	5,01**	14,87**
CGC A	3	2,56 ^{ns}	3	2,51 ^{ns}	7,05*	5,00*	7,87*
CGC R	4	17,84*	4	0,40 ^{ns}	7,97*	18,04*	0,94 ^{ns}
CEC	20	4,84*	20	17,78*	11,03*	3,56*	10,68*
G x L			29	1,80*	2,23**	2,65**	2,78**
CGC A x L			3	2,44 ^{ns}	1,31 ^{ns}	2,24 ^{ns}	3,02*
CGC R x L			4	2,09 ^{ns}	4,21*	3,82*	4,64*
CEC x L			20	10,31*	2,57*	2,21*	2,54*
Média/LA		85,61		2,92a	61,87a	25,51a	15,91a
Média/SL				2,78b	54,68b	21,03b	11,53b
Média /A		81,70b		1,70b	31,60b	21,48b	6,87b
Média/R		92,85a		3,05a	62,29a	23,21a	14,68a
Média/Hfb.		84,51		2,82	57,57	23,6	14,73
Média/Test.		87,09		3,27	66,81	23,95	16,09
r _{gg} LA (%)		96,46		98,73	96,52	91,4	96,74
CV LA (%)		2,06		4,37	8,56	4,97	9,33
r _{gg} SL (%)				94,06	92,27	76,21	90,06
CV SL (%)				9,85	15,26	6,56	18,04

**Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F; *Significativo a 5% de probabilidade pelo teste F; Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste F; LA: Lavras; SL: Sete Lagoas.

Tabela 2 - Resumo da análise de variância e dialélica dos caracteres tecnológicos extração de caldo (EXT, %), teor de sólidos solúveis totais (SST, %caldo), sacarose (POL, %caldo), pureza (PUR, %), açúcares redutores (AR, %caldo), fibra (FIB, %), açúcares redutores totais (ART, %caldo), açúcares totais recuperáveis (ATR, kg de açúcar t⁻¹ de colmo), etanol hidratado (EH, L de etanol t⁻¹ de colmo), tonelada de brix por hectare (TBH, t ha⁻¹) e produção de etanol (ETH, L ha⁻¹) avaliados em linhagens e híbridos de sorgo sacarino em dois locais. Lavras:MG; Sete Lagoas:MG, 2016.

Fontes de Variação	Estatística F											
	GL	EXT	SST	POL	PUR	AR	FIB	ART	ATR	EH	TBH	ETH
Local (L)	1	18,94*	263,43**	230,19**	132,24**	165,22**	130,11**	279,40**	247,25**	279,35**	110,98**	174,7**
Genótipos (G)	29	1,83*	7,15**	4,33**	1,69*	1,69*	5,93**	4,77**	4,11**	4,77**	16,03**	9,78**
CGC A	3	0,46 ^{ns}	5,69*	4,48*	1,17 ^{ns}	1,62 ^{ns}	2,09 ^{ns}	4,24*	3,63*	4,24 *	10,55 *	6,70*
CGC R	4	6,84*	19,52*	11,49*	4,95*	4,36*	19,76*	14,28*	11,35*	14,28*	2,74*	1,57 ^{ns}
CEC	20	1,56 ^{ns}	6,04*	3,48*	1,18 ^{ns}	1,22 ^{ns}	1,54 ^{ns}	4,61*	3,93*	4,60*	13,77*	9,75*
G x L	29	1,52 ^{ns}	3,45**	2,51**	1,05 ^{ns}	1,09 ^{ns}	2,28**	2,56**	2,34**	2,56**	3,54**	3,43**
CCG A x L	3	1,31 ^{ns}	11,40*	7,57*	2,55 ^{ns}	4,34*	3,59*	8,91*	8,13*	8,90*	9,08*	8,26*
CCG R x L	4	2,20 ^{ns}	3,72*	2,95*	1,43 ^{ns}	3,52*	0 ^{ns}	4,32*	3,26*	4,32*	4,62*	3,72*
CEC x L	20	1,72*	2,47*	1,98*	0,77 ^{ns}	1,73*	2,69*	2,02*	2,06*	2,02*	2,59*	2,90*
Média/LA		67,92b	14,23a	8,81a	61,78a	1,53b	13,33a	10,86a	81,31a	59,78a	6,07a	3758,13a
Média/SL		70,02a	10,11b	4,747b	45,88b	2,06a	11,19b	7,06b	54,82b	38,88b	3,870b	2133,03b
Média / A		68,92a	10,35b	5,31b	52,34a	1,84a	11,7b	7,75b	59,64b	42,65b	2,28b	1383,53b
Média/ R		69,23a	12,07a	6,4a	51,84a	1,86a	12,27a	8,66a	65,7a	47,68a	5,23a	3013,87a
Média/Híb.		69,00	12,62	7,22	55,05	1,75	12,24	9,33	70,93	51,4	5,44	3242,19
Média/Test.		67,33	10,78	5,51	46,01	2,06	14,65	7,8	56,67	42,92	4,92	2936,23
r _{gg} LA (%)		60,41	93,18	89,74	71,41	74,13	86,3	89,01	86,3	89,01	96,86	94,19
CV LA (%)		2,35	6,88	14,31	8,96	11,59	5,03	9,56	10,2	9,56	10,07	13,78
r _{gg} SL (%)		63,33	84,62	72,73	36,43	75,84	87,67	77,15	75,84	77,15	89,54	86,55
CV SL (%)		3,82	9,43	26,05	21,04	16,02	5,96	14,14	13,91	14,14	18,50	23,07

**Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F; *Significativo a 5% de probabilidade pelo teste F; Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste F; LA: Lavras; SL: Sete Lagoas.

De modo geral, houve diferença significativa pelo teste F, a 5% de probabilidade, entre as médias das linhagens A e as linhagens R sob teste, quanto aos caracteres agrônômicos e tecnológicos (Tabelas 1 e 2). As linhagens A se caracterizaram por apresentar maior precocidade e desempenho inferior com relação às linhagens R para a quase totalidade de características estudadas, com exceção apenas das características EXT, PUR e AR. Resultados semelhantes foram observados por Durães (2014) investigando a heterose em sorgo sacarino.

A partir do desdobramento do efeito de genótipos de acordo com o esquema dialélico, observa-se que houve efeito significativo da CGC das linhagens A quanto à maioria das características estudadas com exceção dos caracteres FLOR, AP, EXT, PUR, AR e FIB (Tabelas 1 e 2). Para as linhagens R, também foram observados efeitos significativos da CGC quanto maior a parte dos caracteres, com exceção do AP, PMS e ETH. Efeitos significativos de CEC foram verificados para a quase totalidade de características agrônômicas e tecnológicas avaliadas, com exceção da EXT, PUR, AR e FIB. Não foram verificados efeitos da interação CGC A x Local apenas quanto aos caracteres AP, PMV, MS, EXT e PUR. Os efeitos da interação CGC R x Local foram significativos para a maioria dos caracteres estudados com exceção da AP, EXT, PUR e FIB. Houve efeitos significativos da interação CEC x Local quanto a todos os caracteres estudados, com exceção apenas da característica PUR. Estes resultados sugerem que os efeitos da CGC e CEC foram influenciados pelo ambiente.

4.2 Capacidade geral de combinação

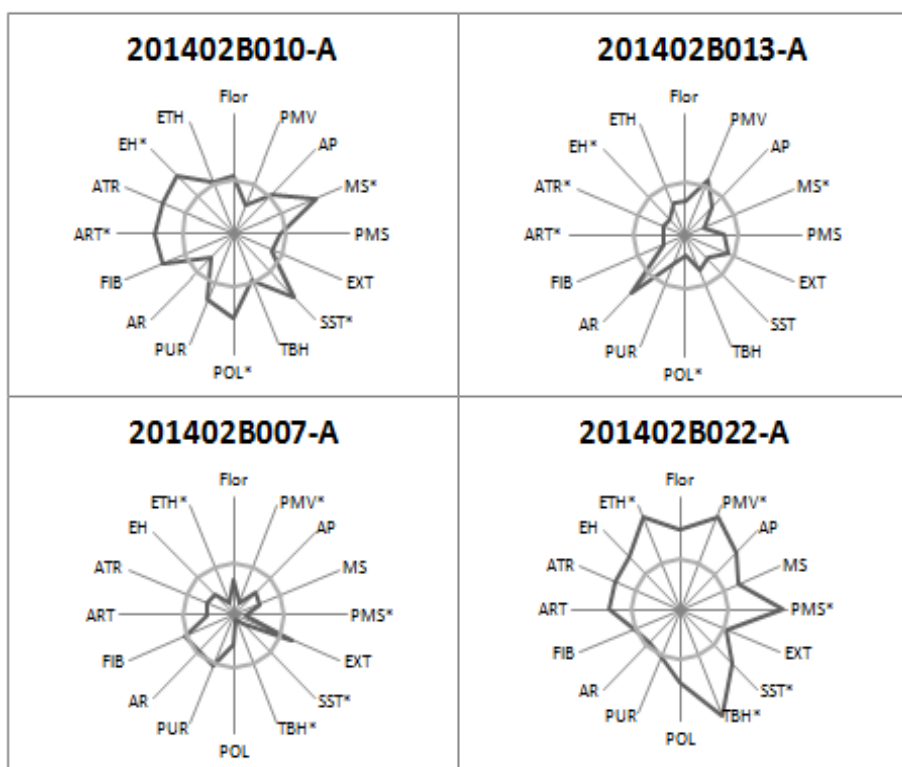
Um dos objetivos do presente estudo é identificar genitores com boa capacidade de combinação quanto a caracteres de interesse em sorgo sacarino.

No que concerne às linhagens A, a linhagem 201402B010-A apresentou efeitos significativos e positivos para as características MS(0,4774), SST(0,2945), POL(0,3446), ART(0,26), e EH(1,4309) (Figura 2). A linhagem 201402B013-A apresentou efeitos negativos e significativos para as características MS(-0,3919), POL(-0,3771), ART(-0,2722), ATR(-1,9852) e EH(-1,498). A linhagem 201402B007-A apresentou efeitos negativos e significativos para as características PMV(-2,3992), PMS(-0,6656), SST(-0,3403), TBH(-0,2902), ETH(-173,225). A linhagem 201402B022-A apresentou efeitos significativos e positivos para as características PMV(3,3595), PMS(0,9678), SST(0,2376), TBH(0,4086) e ETH(240,9733). Para as linhagens R, a linhagem BRS 511 apresentou efeito significativo e negativo de CGC para o caráter FLOR(-0.825) e efeitos significativos e positivos quanto aos caracteres SST(0,2511) e FIB(0,1718) (Figura 3). A linhagem BRS 508 apresentou efeitos positivos e significativos para os caracteres MS(1,0892), SST(0,6198), POL(0,8714), PUR(4,0794), FIB(0,4774), ART(0,6975), ATR(4,7164), EH(3,8398) e negativos e significativos para os caracteres PMV(-4,4654), EXT(-0,9842), TBH(-0,1936). A linhagem CMSXS643 apresentou efeitos significativos e positivos para FLOR(2,5996), EXT(0,7552) e TBH(0,1845) e negativos e significativos para os caracteres MS(-0.573) e FIB(-0.6031). A linhagem CMSXS646 apresentou efeito significativo e negativo para o FLOR(-1,2922) e significativo e positivo para a FIB(0,2148). A linhagem CMSXS647 apresentou efeitos positivos e significativos para os caracteres PMV(3,4308), EXT(0,9809) e negativos e significativos para os caracteres SST(-1,0251), POL(-0,8616), PUR(-2,3133), ART(-0,8223), ATR(-5,8734), EH(-4,5261).

Considerando os efeitos da CGC em conjunto, a linhagem A, 201402B022-A e as linhagens R, BRS 511, CMSXS643 e CMSXS646, apresentam melhores desempenhos para a maioria dos caracteres estudados (Figuras 2 e 3), sendo consideradas promissoras para utilização como genitores

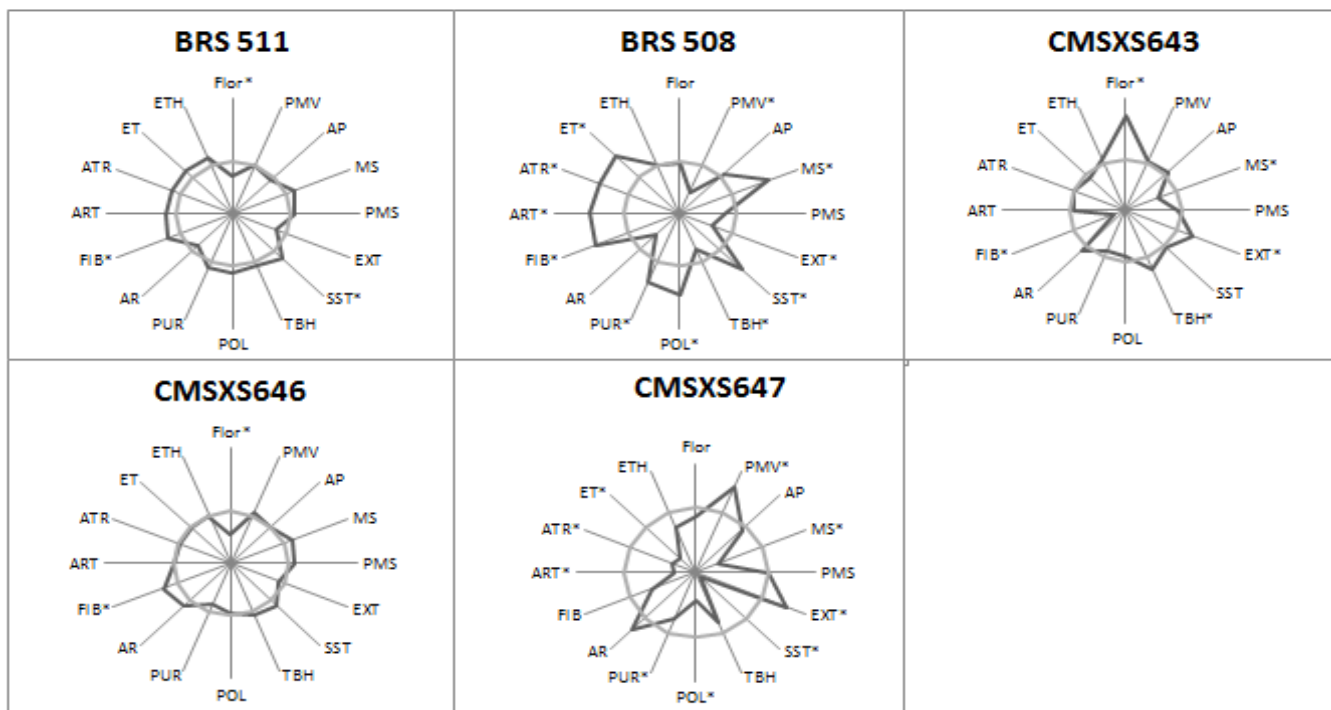
em programas de melhoramento de sorgo sacarino, visando elevar a produção de etanol e a qualidade da matéria-prima.

Figura 2 - Representação gráfica dos efeitos da capacidade geral de combinação estudentizados das linhagens A de sorgo sacarino para os caracteres agrônômicos e tecnológicos. Lavras:MG; Sete Lagoas:MG, 2016.



*Significativo a 5% de probabilidade pelo teste t.

Figura 3 - Representação gráfica dos efeitos da capacidade geral de combinação estudatizados das linhagens R de sorgo sacarino para os caracteres agrônômicos e tecnológicos. Lavras:MG; Sete Lagoas:MG, 2016.



*Significativo a 5% de probabilidade pelo teste t.

4.3 Capacidade específica de combinação

Os efeitos da CEC têm utilidade para investigar a participação dos efeitos não-aditivos na expressão fenotípica dos caracteres.

A CEC das linhagens parentais é utilizada como indicador da existência de dominância unidirecional. Os valores de CEC serão negativos quando os desvios da dominância forem predominantemente positivos e serão positivos em caso contrário (CRUZ; VENCOVSKY, 1989). Pela Tabela 3, observa-se que para a característica FLOR a maioria das linhagens apresentou valores positivos de CEC, indicando que a dominância está no sentido de reduzir o número de dias para o florescimento. Por sua vez, para a ALT, PMV, MS e PMS as linhagens avaliadas apresentaram valores negativos de CEC, sugerindo que a dominância é no sentido de aumentar a expressão destas características. Reforçando estes resultados, a maioria dos híbridos avaliados apresentou heterose na média dos parentais positiva quanto a estes caracteres (APÊNDICE A).

Para o FLOR, os híbridos 201402B010-A x BRS 508, 201402B013-A x CMSXS643, 201402B013-A x CMSXS647, 201402B007-A x BRS 508, 201402B007-A x CMSXS646 e 201402B022-A x CMSXS643 apresentaram negativas e significativas estimativas de CEC (Tabela 3). Dezoito híbridos apresentaram heterose negativa em relação a média dos pais, contribuindo para reduzir o número de dias para o florescimento, variando entre -0,01% e -7,49% (APÊNDICE A). Os híbridos foram mais precoces do que as linhagens restauradoras, com heterobeltiose variando entre -18,38% e -2,72%.

Tabela 3 - Estimativas dos efeitos médios da capacidade específica de combinação CEC das linhagens A (s_{kk}), linhagens R ($s_{k'kr}$) e híbridos ($s_{kk'}$) de sorgo sacarino para os caracteres agrônômicos florescimento (FLOR, dias), altura de plantas (AP, m), produção de massa verde (PMV, t ha⁻¹), matéria seca (MS, %) e produção de matéria seca (PMS, t ha⁻¹). Lavras:MG; Sete Lagoas:MG, 2016

Linhagens/Híbridos	Características Avaliadas				
	FLOR	AP	PMV	MS	PMS
201402B010-A	3,07*	-0,37*	-10,04*	-1,12*	-2,86*
201402B013-A	3,09*	-0,48*	-11,48*	-0,54	-2,62*
201402B007-A	1,25	-0,45*	-10,94*	-1,02*	-2,75*
201402B022-A	1,08	-0,65*	-14,42*	-1,19*	-3,98*
BRS 511	-1,22	-0,41*	-8,80*	-0,5	-2,10*
BRS 508	1,49*	-0,52*	-7,73*	-0,94*	-2,13*
CMSXS643	3,88*	-0,41*	-12,83*	-0,64	-2,98*
CMSXS646	3,23*	-0,31*	-10,70*	-1,09*	-2,96*
CMSXS647	1,12	-0,29*	-6,82*	-0,7	-2,03*
201402B010-A x BRS 511	-0,48	0,17*	3,8	1,95*	1,90*
201402B010-A x BRS 508	-2,04*	0,20*	7,78*	0,78	2,22*
201402B010-A x CMSXS643	-1,48	0,20*	3,82	-0,04	0,67
201402B010-A x CMSXS646	-1,67	0,11	4,25	-0,28	0,87
201402B010-A x CMSXS647	-0,45	0,07	0,44	-0,17	0,06
201402B013-A x BRS 511	0,84	0,22*	1,86	-0,53	0,11
201402B013-A x BRS 508	0,22	0,20*	3,54	0,8	1
201402B013-A x CMSXS643	-2,84*	0,23*	4,23	0,77	1,27
201402B013-A x CMSXS646	-1,77	0,1	3,5	-0,17	0,55
201402B013-A x CMSXS647	-2,65*	0,20*	9,81*	0,22	2,30*
201402B007-A x BRS 511	1,41	0,14	3,22	0,48	0,85
201402B007-A x BRS 508	-1,96*	0,23*	8,25*	-0,79	1,55*
201402B007-A x CMSXS643	-1,31	0,29*	4,95	0,06	0,89
201402B007-A x CMSXS646	-1,81*	0,15*	1,8	1,84*	1,23
201402B007-A x CMSXS647	1,17	0,1	3,68	0,45	0,98
201402B022-A x BRS 511	0,68	0,29*	8,72*	-0,9	1,35*
201402B022-A x BRS 508	0,79	0,43*	-4,13	1,10*	-0,51
201402B022-A x CMSXS643	-2,13*	0,11	12,67*	0,49	3,13*
201402B022-A x CMSXS646	-1,2	0,26*	11,87*	0,8	3,27*
201402B022-A x CMSXS647	-0,31	0,22*	-0,29	0,9	0,72
Desvio padrão (s_{kk})	0,73	0,06	2,03	0,39	0,53
Desvio padrão ($s_{k'kr}$)	0,69	0,06	1,93	0,37	0,5
Desvio padrão ($s_{kk'}$)	0,9	0,08	2,52	0,49	0,65

*Significativo a 5% de probabilidade pelo teste t.

Pela Tabela 3 verifica-se que 70% das combinações híbridas avaliadas apresentaram estimativas positivas e significativas de CEC para a AP. A heterose variou entre 14,26% e 30,66% (APÊNDICE A). Sete híbridos apresentaram heterobeltiose positiva. Teve destaque a combinação híbrida 201402B022-A x BRS 508, que superou a linhagem restauradora BRS 508 em 11,12%.

Quanto à característica PMV, seis híbridos apresentaram significativas e positivas estimativas de CEC, 201402B010-A x BRS 508, 201402B013-A x CMSXS647, 201402B007-A x BRS 508, 201402B022-A x BRS 511, 201402B022-A x CMSXS643 e 201402B022-A x CMSXS646 (Tabela 3). A heterose variou entre 13,30% e 35,56% (APÊNDICE A). Oito híbridos apresentaram heterobeltiose positiva, com destaque para o cruzamento 201402B022-A x CMSXS643, que superou a linhagem restauradora CMSXS643 em 19,25%.

Em relação à variável MS, as combinações híbridas 201402B010-A x CMSXS643, 201402B010-A x CMSXS646, 201402B010-A x CMSXS647, 201402B013-A x BRS 511, 201402B013-A x CMSXS646, 201402B007-A x BRS 508 e 201402B022-A x BRS 511 apresentaram efeitos negativos de CEC, sendo consideradas promissoras para reduzir a MS (Tabela 3). Dois híbridos apresentaram heterose negativa em relação à média dos genitores: 201402B013-A x BRS 511 e 201402B022-A x BRS 511. Foram obtidas seis combinações híbridas que apresentaram heterobeltiose negativa, contribuindo para reduzir a MS (APÊNDICE A).

Para a característica PMS, a combinação híbrida 201402B022-A x BRS 508 apresentou efeitos negativos de CEC (Tabela 3). Este híbrido exibiu heterose de 18,67% e heterobeltiose de -4,70% (APÊNDICE A).

Pela Tabela 4, observa-se que as linhagens avaliadas apresentaram estimativas de CEC negativas para a quase totalidade de caracteres tecnológicos

avaliados, indicando que a dominância está no sentido de aumentar a expressão destas características. Corroborando com estes resultados, a maioria dos híbridos estudados apresentou heterose positiva na média dos parentais (APÊNDICE B).

No que concerne à característica SST, as combinações híbridas 201402B010-A x BRS 511, 201402B010-A x BRS 508, 201402B007-A x CMSXS646, 201402B022-A x BRS 508 e 201402B022-A x CMSXS643 apresentaram efeitos positivos e significativos de CEC (Tabela 4). A heterose variou entre 4,20% e 20,84% (APÊNDICE B). Quinze híbridos apresentaram heterobeltiose positiva, com destaque para o cruzamento 201402B022-A x CMSXS647, que superou a linhagem restauradora CMSXS647 em 16,20%.

Com relação à característica POL, apresentaram efeitos positivos e significativos de CEC às combinações híbridas 201402B010-A x BRS 511, 201402B007-A x CMSXS646 e 201402B010-A x BRS 508 (Tabela 4). A heterose variou entre 3,13% e 35,46% (APÊNDICE B). Quinze híbridos apresentaram heterobeltiose positiva, com destaque para o cruzamento 201402B022-A x CMSXS647, que superou a linhagem restauradora CMSXS647 em 29,25%.

Tabela 4 - Estimativas dos efeitos médios da capacidade específica de combinação CEC das linhagens A (s_{kk}), linhagens R ($s_{k'rk'}$) e híbridos ($s_{kk'}$) de sorgo sacarino para os caracteres tecnológicos extração de caldo (EXT, %), teor de sólidos solúveis totais (SST, %caldo), sacarose (POL, %caldo), pureza (PUR, %), açúcares redutores (AR, %caldo), fibra (FIB, %), açúcares redutores totais (ART, %caldo), açúcares totais recuperáveis (ATR, kg de açúcar t^{-1} de colmo), etanol hidratado (EH, L de etanol t^{-1} de colmo), tonelada de brix por hectare (TBH, $t\ ha^{-1}$) e produção de etanol (ETH, $L\ ha^{-1}$). Lavras:MG; Sete Lagoas:MG, 2016.

Linhagens/Híbridos	Características avaliadas						
	SST	POL	ART	ATR	ET	TBH	ETH
201402B010-A	-1,46*	-1,44*	-1,42*	-10,16*	-7,82*	-1,30*	-907,82*
201402B013-A	-0,51	-0,32	0,14	0,93	0,79	-1,01*	-422,9
201402B007-A	-1,41*	-1,58*	-1,29*	-9,34*	-7,11*	-1,21*	-793,32*
201402B022-A	-0,95*	-0,77*	-0,92	-6,79*	-50,48	-1,67*	-1086,71
BRS 511	-0,71*	-0,6	-0,4841	-3,94	-2,664	-0,86*	-515,7*
BRS 508	-1,19*	-1,25*	-1,03*	-7,23*	-5,67*	-1,08*	-696,66*
CMSXS643	-0,64*	-0,52	-0,44	-3,48	-24,24	-1,24*	-669,40*
CMSXS646	-0,94*	-1,09*	-0,94*	-6,82*	-5,19*	-1,10*	-791,54*
CMSXS647	-0,85*	-0,63	-0,59*	-3,96	-3,23*	-0,90*	-537,45*
201402B010-A x BRS 511	1,55*	1,68*	1,55*	11,23*	8,51*	0,61*	609,46*
201402B010-A x BRS 508	1,01*	1,01*	0,99*	7,06*	5,47*	1,20*	674,21*
201402B010-A x CMSXS643	-0,29	-0,39	-0,42	-2,67	-2,3	0,15	-23,92
201402B010-A x CMSXS646	0,19	0,83	0,77*	5,55	4,24*	0,44	498,61*
201402B010-A x CMSXS647	0,46	-0,26	-0,05	-0,85	-0,29	0,3	57,26
201402B013-A x BRS 511	-0,09	-0,26	-0,27	-1,86	-14,88	0,06	-57,06
201402B013-A x BRS 508	0,38	0,58	-0,08	-0,48	-0,47	0,48*	200,11
201402B013-A x CMSXS643	0,27	0,18	0,07	0,58	0,37	0,3	135,12
201402B013-A x CMSXS646	0,19	-0,03	-0,06	-0,38	-0,31	0,33	128,07
201402B013-A x CMSXS647	0,27	0,16	0,05	0,28	0,32	0,84*	439,56*
201402B007-A x BRS 511	0,26	0,22	0,09	0,79	0,47	0,33	139,66
201402B007-A x BRS 508	-0,1	0,15	0,25	1,76	1,37	0,71*	531,37*
201402B007-A x CMSXS643	0,61	0,66	0,59	4,37	32,35	0,51*	306,61
201402B007-A x CMSXS646	1,67*	1,49*	1,29*	9,59*	7,13*	0,57*	394,08*
201402B007-A x CMSXS647	0,38	0,62	0,36	2,26	2,01	0,29	214,94
201402B022-A x BRS 511	-0,31	-0,44	-0,39	-2,28	-21,63	0,71*	339,34
201402B022-A x BRS 508	1,09*	0,75	0,90*	6,10*	4,98*	-0,12	-12,37
201402B022-A x CMSXS643	0,70*	0,59	0,64	4,66	35,42	1,52*	920,99*
201402B022-A x CMSXS646	-0,17	-0,11	-0,12	-1,12	-0,68	0,86*	562,33*
201402B022-A x CMSXS647	0,58	0,73	0,80*	6,23*	4,42*	0,36	363,13
Desvio padrão ()	0,28	0,38	0,29	2,32	1,63	0,19	147,56
Desvio padrão ()	0,27	0,36	0,28	2,2	1,55	0,18	139,99
Desvio padrão ()	0,35	0,46	0,37	2,86	2,01	0,24	182,23

*Significativo a 5% de probabilidade pelo teste t.

Para as características ART e ET, as combinações híbridas 201402B010-A x BRS 511, 201402B010-A x BRS 508, 201402B007-A x CMSXS646, 201402B022-A x BRS 508, 201402B022-A x CMSXS647 e 201402B010-A x CMSXS646 apresentaram efeitos positivos e significativos de CEC (Tabela 5). Para estes caracteres, dezenove híbridos apresentam heterose positiva, variando entre 2,50% e 24,00% (APÊNDICE B). Treze híbridos apresentaram heterobeltiose positiva, com destaque para o cruzamento 201402B022-A x CMSXS647, que superou a linhagem restauradora CMSXS647 em 22,5%.

Quanto ao caráter ATR, as combinações híbridas 201402B010-A x BRS 511, 201402B010-A x BRS 508, 201402B007-A x CMSXS646, 201402B022-A x BRS 508 e 201402B022-A x CMSXS647 apresentaram efeitos positivos e significativos de CEC (Tabela 5). Para este caráter, dezenove híbridos apresentaram heterose positiva, variando entre 2,78% e 23,30% (APÊNDICE B). Quinze híbridos apresentaram heterobeltiose positiva, com destaque para o cruzamento 201402B022-A x CMSXS647, que superou a linhagem restauradora CMSXS647 em 21,86%.

Para o índice de seleção TBH, as combinações híbridas 201402B010-A x BRS 511, 201402B010-A x BRS 508, 201402B013-A x BRS 508, 201402B013-A x CMSXS647, 201402B007-A x BRS 508, 201402B007-A x CMSXS643, 201402B007-A x CMSXS646, 201402B022-A x BRS 511, 201402B022-A x CMSXS643 e 201402B022-A x CMSXS646 apresentaram efeitos positivos e significativos de CEC (Tabela 4). A heterose variou entre 19,92% e 42,20% (APÊNDICE B). Onze híbridos apresentaram heterobeltiose positiva, com destaque para o cruzamento 201402B022-A x CMSXS643, que superou a média da linhagem restauradora CMSXS643 em 23,30%.

Para o ETH, as combinações híbridas 201402B010-A x BRS 511, 201402B010-A x BRS 508, 201402B010-A x CMSXS646, 201402B013-A x CMSXS647, 201402B007-A x BRS 508, 201402B007-A x CMSXS646,

201402B022-A x CMSXS643 e 201402B022-A x CMSXS646 apresentaram efeitos positivos e significativos de CEC (Tabela 4). A heterose em relação aos parentais variou entre 14,35% e 43,51% (APÊNDICE B). Quinze híbridos mostraram heterobeltiose positiva, com destaque para o cruzamento 201402B022-A x CMSXS643, que superou a linhagem restauradora CMSXS643 em 25,26%, contribuindo para elevar o rendimento de ETH.

4.4 Seleção das combinações híbridas

Um dos objetivos do presente estudo é identificar combinações híbridas promissoras para avaliação em ensaios avançados. As médias de FLOR variaram entre 80,05 e 100,24 dias sendo separadas em quatro grupos pelo teste de Scott e Knott (1974). A linhagem CMSXS643 apresentou florescimento mais tardio, enquanto os híbridos foram em média (85 dias), mais precoces do que as linhagens R (93 dias) (Tabela 5).

Com relação ao caráter AP, as médias observadas variaram entre 1,65 m e 3,33 m (Tabela 5). Verificou-se que as linhagens R e híbridos não diferiram quanto a esta característica.

Tabela 5 - Valores médios das quatro linhagens A, cinco linhagens R, vinte híbridos e da testemunha (CV 198) para os caracteres agrônômicos florescimento (FLOR, dias), altura de plantas (AP, m), produção de massa verde (PMV, t ha⁻¹), matéria seca (MS, %), produção de matéria seca (PMS, t ha⁻¹) avaliados em dois locais. Lavras:MG; Sete Lagoas:MG, 2016.

Genótipos	FLOR	AP	PMV	MS	PMS
201402B010-A	82,85d	1,82b	30,58c	22,29c	6,87d
201402B013-A	81,79d	1,65b	32,63c	21,12d	6,89d
201402B007-A	80,05d	1,66b	27,59c	20,85d	5,83d
201402B022-A	82,12d	1,66b	35,62c	21,66d	7,88d
BRS 511	88,27c	2,99a	62,85b	23,97b	15,38b
BRS 508	92,43b	2,96a	55,02b	25,23a	14,24c
CMSXS643	100,24a	3,06a	59,72b	22,21c	13,91c
CMSXS646	91,79b	3,13a	62,19b	23,46c	14,67c
CMSXS647	91,52b	3,11a	71,71a	21,21d	15,18b
201402B010-A x BRS 511	84,15c	2,98a	59,93b	25,89a	15,51b
201402B010-A x BRS 508	83,31d	3,04a	59,46b	25,57a	15,27b
201402B010-A x CMSXS643	86,58c	3,04a	60,40b	23,09c	13,98c
201402B010-A x CMSXS646	82,49d	2,92a	61,00b	23,69b	14,56c
201402B010-A x CMSXS647	84,63c	2,87a	60,01b	22,49c	13,52c
201402B013-A x BRS 511	84,94c	2,99a	59,74b	22,54c	13,60c
201402B013-A x BRS 508	85,04c	3,01a	56,97b	24,72a	13,94c
201402B013-Ax CMSXS643	84,68c	3,04a	62,56b	23,02c	14,47c
201402B013-A x CMSXS646	81,86d	2,89a	62,00b	22,93c	14,13c
201402B013-A x CMSXS647	81,89d	2,97a	71,13a	22,01d	15,65b
201402B007-A x BRS 511	85,56c	2,90a	58,31b	23,66b	13,88c
201402B007-A x BRS 508	82,89d	3,03a	58,89b	23,23c	14,04c
201402B007-A x CMSXS643	86,25c	3,08a	60,49b	22,42c	13,62c
201402B007-A x CMSXS646	81,86d	2,93a	57,47b	25,05a	14,34c
201402B007-A x CMSXS647	85,77c	2,85a	62,21b	22,35c	13,88c
201402B022-A x BRS 511	85,94c	3,15a	69,57a	22,76c	16,02b
201402B022-A x BRS 508	86,77c	3,33a	52,26b	25,61a	13,60c
201402B022-A x CMSXS643	86,56c	3,01a	73,97a	23,34c	17,50a
201402B022-A x CMSXS646	83,60d	3,14a	73,33a	24,50b	18,02a
201402B022-A x CMSXS647	85,40c	3,08a	64,00b	23,28c	15,25b
CV 198	87,10c	3,28a	66,81a	23,95b	16,09b

*médias seguidas da mesma letra pertencem ao mesmo agrupamento pelo teste de Scott-Knott (P < 0,05)

Para o PMV, as médias variaram entre 27,59 t ha⁻¹ e 73,97 t ha⁻¹ e foram divididas em três grupos. Os híbridos 201402B013-A x CMSXS647, 201402B022-A x BRS 511, 201402B022-A x CMSXS643, 201402B022-A x CMSXS646 e se destacaram, com médias variando entre 69,57 t ha⁻¹ e 73,97 t ha⁻¹, não diferindo estatisticamente da linhagem CMSXS647 e da testemunha CV 198 (Tabela 5). A produtividade mínima de massa verde preconizada pelo programa de melhoramento da Embrapa em genótipos de sorgo sacarino é acima de 60,00 t ha⁻¹ (SCHAFFERT et al., 2011).

O programa de melhoramento do sorgo sacarino, objetiva selecionar cultivares que associem elevada produção de caldo e teor de açúcares, conseqüentemente, menor MS. Para este caráter, as médias variaram entre 20,85% e 25,89%, sendo separadas em quatro grupos, destacando-se o híbrido 201402B007-A x BRS 511, que apresentou média inferior, não diferindo das linhagens macho-estéreis 201402B013-A, 201402B007-A, 201402B022-A e da linhagem restauradora CMSXS647 (Tabela 5). O caráter PMS relaciona porcentagem de matéria seca do genótipo com a produção de massa verde. Para o PMS, as médias variaram entre 5,83 t ha⁻¹ e 18,02 t ha⁻¹ separadas em quatro grupos, sendo que, as linhagens macho-estéreis apresentaram os menores desempenhos quanto a esta característica, especialmente, devido à baixa produção de massa verde destas linhagens.

Quanto ao caráter EXT, os genótipos foram separados em dois grupos e as médias variaram entre 65,78% e 71,32%. Vale ressaltar que a EXT depende do equipamento utilizado (Tabela 6).

Tabela 6 - Valores médios das quatro linhagens A, cinco linhagens R, vinte híbridos e da testemunha para os caracteres tecnológicos extração de caldo (EXT, %), teor de sólidos solúveis totais (SST, %caldo), sacarose (POL, %caldo), pureza (PUR, %), açúcares redutores (AR, %caldo), fibra (FIB, %), açúcares redutores totais (ART, %caldo), açúcares totais recuperáveis (ATR, kg de açúcar t⁻¹ de colmo), etanol hidratado (EH, L de etanol t⁻¹ de colmo), tonelada de brix por hectare (TBH, t ha⁻¹) e produção de etanol (ETH, L ha⁻¹) avaliados em dois locais. Lavras:MG; Sete Lagoas:MG, 2016.

(Continua)

Genótipos	EXT	SST	POL	PUR	AR	FIB	ART
201402B010-A	69,40a	10,57c	5,58c	52,26b	1,85a	11,70c	7,74d
201402B013-A	67,67b	10,55c	5,26c	53,29b	1,81a	11,55c	8,22c
201402B007-A	69,73a	9,35d	4,24c	49,50b	1,94a	11,72c	6,89d
201402B022-A	68,88a	10,97c	6,15c	54,30b	1,78a	11,86c	8,16c
BRS 511	68,18b	12,74b	7,12b	54,67b	1,76a	13,04b	9,34b
BRS 508	66,27b	13,00b	7,78b	58,69a	1,63b	13,05b	9,73b
CMSXS643	70,54a	12,31b	6,45c	50,58b	1,90a	11,22c	8,75c
CMSXS646	69,85a	12,31b	6,05c	46,65b	2,04a	12,58b	8,38c
CMSXS647	71,32a	10,05d	4,93c	48,66b	1,97a	11,48c	7,13d
201402B010-A x BRS 511	65,78b	14,29a	9,05a	63,16a	1,47b	12,98b	11,03a
201402B010-A x BRS 508	67,40b	14,11a	9,04a	62,89a	1,48b	13,01b	10,94a
201402B010-A x CMSXS643	70,16a	12,20b	6,61c	52,26b	1,85a	11,55c	8,75c
201402B010-A x CMSXS646	68,81a	12,83b	7,93b	59,45a	1,60b	12,73b	10,00b
201402B010-A x CMSXS647	70,04a	11,92b	6,04c	49,08b	1,95a	12,30c	8,38c
201402B013-A x BRS 511	69,54a	12,16b	6,39c	50,90b	1,89a	11,78c	8,68c
201402B013-A x BRS 508	69,48a	13,00b	7,89b	58,56a	1,76a	12,61b	9,33b
201402B013-A x CMSXS643	69,08a	12,27b	6,45c	50,57b	1,90a	11,59c	8,70c
201402B013-A x CMSXS646	69,05a	12,34b	6,33c	49,15b	1,96a	12,05c	8,64c
201402B013-A x CMSXS647	69,45a	11,24c	5,74c	49,75b	1,93a	11,91c	7,95d
201402B007-A x BRS 511	69,21a	12,37b	6,99b	55,14a	1,75a	12,27c	9,09b
201402B007-A x BRS 508	69,15a	12,37b	7,58b	58,64a	1,63b	12,67b	9,72b
201402B007-A x CMSXS643	70,86a	12,46b	7,06b	55,47a	1,74a	11,51c	9,28b
201402B007-A x CMSXS646	67,35b	13,68a	7,98b	57,56a	1,67b	12,45b	10,05b
201402B007-A x CMSXS647	69,23a	11,20c	6,32c	55,23a	1,75a	12,40b	8,32c
201402B022-A x BRS 511	69,73a	12,37b	6,87b	53,39b	1,81a	11,77c	9,06b
201402B022-A x BRS 508	68,04b	14,14a	8,72a	59,06a	1,61b	12,94b	10,82a
201402B022-A x CMSXS643	69,35a	13,13b	7,54b	53,88b	1,79a	11,60c	9,78b
201402B022-A x CMSXS646	67,43b	12,41b	6,91b	52,84b	1,83a	12,82b	9,08b
201402B022-A x CMSXS647	70,98a	11,79b	6,97b	54,00b	1,79a	11,84c	9,20b
CV 198	67,33b	10,78c	5,51c	46,02b	2,06a	14,64a	7,80d

Tabela 6 - Valores médios das quatro linhagens A, cinco linhagens R, vinte híbridos e da testemunha para os caracteres tecnológicos extração de caldo (EXT, %), teor de sólidos solúveis totais (SST, %caldo), sacarose (POL, %caldo), pureza (PUR, %), açúcares redutores (AR, %caldo), fibra (FIB, %), açúcares redutores totais (ART, %caldo), açúcares totais recuperáveis (ATR, kg de açúcar t⁻¹ de colmo), etanol hidratado (EH, L de etanol t⁻¹ de colmo), tonelada de brix por hectare (TBH, t ha⁻¹) e produção de etanol (ETH, L ha⁻¹) avaliados em dois locais. Lavras:MG; Sete Lagoas:MG, 2016.

(Conclusão)

Genótipo	ATR	EH	TBH	ETH
201402B010-A	59,46d	42,50d	2,24d	1305,46c
201402B013-A	62,95c	45,24c	2,38d	1600,75c
201402B007-A	53,46d	37,94d	1,80d	1046,44c
201402B022-A	62,68c	44,94c	2,73d	1581,46c
BRS 511	70,07b	51,40b	5,57c	3320,11a
BRS 508	72,99b	53,53b	4,80c	2977,48b
CMSXS643	67,34c	48,17c	5,39c	3090,25b
CMSXS646	63,03c	46,09c	5,31c	2863,42b
CMSXS647	55,08d	39,24d	5,09c	2818,10b
201402B010-A x BRS 511	83,04a	60,69a	5,59c	3634,01a
201402B010-A x BRS 508	81,97a	60,22a	5,80c	3617,92a
201402B010-A x CMSXS643	67,54c	48,16c	5,23c	2962,55b
201402B010-A x CMSXS646	75,28b	55,04b	5,41c	3432,74a
201402B010-A x CMSXS647	63,47c	46,10c	5,06c	2841,68b
201402B013-A x BRS 511	66,15c	47,77c	4,97c	2872,67b
201402B013-A x BRS 508	70,64b	51,36b	5,12c	3049,00b
201402B013-A x CMSXS643	67,00c	47,89c	5,32c	3026,77b
201402B013-A x CMSXS646	65,56c	47,56c	5,23c	2967,37b
201402B013-A x CMSXS647	60,82c	43,78d	5,53c	3129,17b
201402B007-A x BRS 511	69,22b	50,03b	5,05c	2977,44b
201402B007-A x BRS 508	73,31b	53,50b	5,15c	3288,32b
201402B007-A x CMSXS643	71,21b	51,06b	5,33c	3106,32b
201402B007-A x CMSXS646	75,95b	55,29b	5,27c	3141,44b
201402B007-A x CMSXS647	63,21c	45,77c	4,79c	2812,60b
201402B022-A x BRS 511	69,46b	49,86b	6,12c	3591,33a
201402B022-A x BRS 508	80,95a	59,57a	5,02c	3158,77b
201402B022-A x CMSXS643	74,81b	53,83b	7,04a	4134,90a
201402B022-A x CMSXS646	68,55b	49,96b	6,26b	3723,89a
201402B022-A x CMSXS647	70,48b	50,64b	5,56c	3374,98a
CV 198	56,67d	42,93d	4,92c	2936,23b

*médias seguidas da mesma letra pertencem ao mesmo agrupamento pelo teste de Scott-Knott (P < 0,05).

Com relação ao fator de variação SST, as médias variaram entre 9,35% e 14,29%, sendo agrupadas em quatro grupos. Os híbridos 201402B010-A x BRS 511, 201402B022-A x BRS 508, 201402B010-A x BRS 508 e 201402B007-A x CMSXS646 apresentaram desempenhos superiores quanto a esta característica, com médias variando entre 13,68% e 14,29% (Tabela 6). O teor mínimo de SST em genótipos de sorgo sacarino preconizado pela Embrapa é de 12,5%, sendo desejável o maior valor possível (SCHAFFERT et al., 2011).

O caráter POL foi separado em quatro grupos pelo teste de Scott Knott ($P < 0,05$), as médias variaram entre 4,24% e 9,05% (Tabela 6). Os híbridos 201402B010-A x BRS 511, 201402B010-A x BRS 508 e 201402B022-A x BRS 508 se destacaram com maiores médias para esta característica.

Para a característica PUR, foi observada a formação de dois grupos, com médias variando de 46,02% e 63,16% (Tabela 6). Verificou-se que os híbridos 201402B010-A x BRS 511, 201402B010-A x BRS 508, 201402B010-A x CMSXS646, 201402B022-A x BRS 508, 201402B007-A x BRS 508, 201402B013-A x BRS 508, 201402B007-A x CMSXS646, 201402B007-A x CMSXS643, 201402B007-A x CMSXS647 e 201402B007-A x BRS 511 foram promissores, apresentando porcentagens de pureza superiores, não diferindo da linhagem BRS 508.

Com relação à característica AR, as médias variaram entre 1,47% e 2,06%, sendo separadas em dois grupos distintos (Tabela 6). Quanto a esta característica, interessa genótipos com menores médias, desse modo, os híbridos 201402B007-A x CMSXS646, 201402B007-A x BRS 508, 201402B022-A x BRS 508, 201402B010-A x CMSXS646, 201402B010-A x BRS 508 e 201402B010-A x BRS 511 se destacaram com médias inferiores de AR, não diferindo da linhagem BRS 508.

Para a característica FIB, as médias variaram entre 11,22% e 14,64%, separadas em 3 grupos distintos (Tabela 6), sendo que, 55% dos híbridos

avaliados apresentaram menores teores de fibra, não diferindo das linhagens macho-estéreis e das linhagens restauradoras CMSXS643 e CMSXS647.

Uma característica bastante importante para um bom rendimento industrial é o ART (açúcares redutores totais), que representa a somatória dos açúcares redutores e da sacarose invertida por hidrólise ácida ou enzimática pela invertase. Um ART mínimo de 12,5% é desejável para que a levedura converta completamente este nível de açúcar em etanol dentro de 6 a 10 horas, sendo que, menores concentrações de ART podem determinar menor eficiência de utilização dos tanques de fermentação. As médias variaram entre 6,89% e 11,03%, sendo separadas em três grupos (Tabela 6). Os híbridos 201402B010-A x BRS 511, 201402B010-A x BRS 508 e 201402B022-A x BRS 508 apresentaram os melhores desempenhos quanto a esta característica.

Para a característica ATR, as médias variaram entre 53,46 kg de açúcar t^{-1} de colmo e 83,04 kg de açúcar t^{-1} de colmo, sendo separadas em quatro grupos distintos (Tabela 6). Verifica-se que os híbridos 201402B010-A x BRS 511, 201402B010-A x BRS 508 e 201402B022-A x BRS 508 apresentaram as maiores médias, variando entre 80,95 e 83,04 kg de açúcar t^{-1} de colmo. O limiar mínimo de extração de açúcar total em genótipos de sorgo sacarino preconizados pelo programa de melhoramento da Embrapa é de 80,00 kg de açúcar t^{-1} de colmo (SCHAFFERT et al., 2011).

Quanto ao EH, as médias variaram entre 37,94 L de etanol t^{-1} de colmo a 60,69 L de etanol t^{-1} de colmo, sendo separados 4 grupos (Tabela 6). Os híbridos 201402B010-A x BRS 511 (60,69L de etanol ton^{-1} de colmo), 201402B010-A x BRS 508 (60,22 L de etanol t^{-1} de colmo) e 201402B022-A x BRS 508 (59,57 L de etanol t^{-1} de colmo) apresentaram médias superiores, sendo considerados promissores quanto a esta característica. Genótipos que superem uma produção mínima de 60,00 L de etanol ton^{-1} de colmo são buscados pelos programas de melhoramento de sorgo sacarino (SCHAFFERT et al., 2011).

O índice multiplicativo TBH (tonelada de brix/sólidos solúveis hectare) abrange os caracteres PMV, EXT e SST que influenciam diretamente na produção de etanol por hectare. Para este caráter, as médias foram separadas em quatro grupos e variaram entre 1,8 t ha⁻¹ a 7,04 t ha⁻¹ (Tabela 6). O desempenho médio do híbrido 201402B022-A x CMSXS643 superou a todos os demais genótipos avaliados para a esta característica, correspondendo a 7,04 t de brix ha⁻¹.

O principal objetivo do melhoramento do sorgo sacarino é desenvolver cultivares com maior rendimento de etanol em L ha⁻¹(ETH). Para esta característica, as médias variaram entre 1.046,44 L ha⁻¹ e 4.134,90 L ha⁻¹ (Tabela 6). Os híbridos 201402B010-A x BRS 511, 201402B010-A x BRS 508, 201402B010-A x CMSXS646, 201402B022-A x BRS 511, 201402B022-A x CMSXS643, 201402B022-A x CMSXS646 e 201402B022-A x CMSXS647 foram os mais produtivos, com médias variando entre 3.288,32 L ha⁻¹ e 4.134,90 L ha⁻¹, não diferindo estatisticamente da linhagem BRS 511 (3.320,11 L ha⁻¹). Estes híbridos apresentam potencial para exploração comercial, pois, superam o limiar de viabilidade econômica de 3.000,00 L ha⁻¹ (MAY et al., 2012b). Além disso, os híbridos selecionados superaram o desempenho da testemunha a cultivar CV 198 (Figura 4).

Cultivares que apresentem maior teor de açúcares (matéria-prima de melhor qualidade) podem produzir alta quantidade de etanol utilizando uma menor quantidade de massa verde. Pelas tabelas 5 e 6 e figura 4, verifica-se que dentre os híbridos selecionados com base no ETH, as combinações 201402B022-A x BRS 511, 201402B022-A x CMSXS643 e 201402B022-A x CMSXS646 apresentaram superioridade quanto à produção de massa verde, enquanto os híbridos 201402B010-A x BRS 511 e 201402B010-A x CMSXS508 mostraram superioridade em relação à qualidade da matéria-prima relacionada com os caracteres SST, POL, PUR, ART, ATR e ET.

5 DISCUSSÃO

Foi observada boa concordância entre as estimativas de CV e r_{gg} para a maioria das características estudadas, com exceção do caractere EXT. De acordo com Cargnelutti Filho e Storck (2009), a r_{gg} alta depende de existir baixa variância residual e maior variância genotípica. Desse modo, quando o caráter apresenta menor variância genotípica, a exemplo da EXT, a acurácia se torna menos informativa da qualidade experimental, sendo neste caso, o CV mais adequado para avaliar a precisão experimental.

É possível que a colheita antecipada em Sete Lagoas, realizada aos 110 dias após o plantio, tenha sido uma das causas para o rendimento inferior observado nesta localidade. Estas diferenças também podem ser atribuídas a variações nas condições macroambientais, especialmente a precipitação observada durante o período do experimento (Figura 1), em que, a elevada concentração de chuvas em Sete Lagoas no final do ciclo da cultura, levou ao encharcamento do solo, e conseqüente acamamento de grande número de plantas, além disso, também pode ter levado à diluição dos sólidos solúveis do colmo. Outro fator importante são as diferenças edáficas relativas às duas localidades. Quanto à temperatura média, não foram observadas diferenças marcantes entre as duas cidades, variando entre 23,04 °C na cidade de Lavras e 23,80 °C em Sete Lagoas.

O sucesso do melhoramento de qualquer cultura está condicionado à existência de variabilidade, uma vez que possibilita a seleção de genótipos superiores. Neste estudo, foram observadas variações entre genótipos para todos os caracteres estudados, evidenciando a possibilidade de se obter cultivares de alto desempenho pelo melhoramento do sorgo sacarino. Vários trabalhos têm indicado existência de ampla variabilidade em genótipos de sorgo sacarino, Elangovan et al. (2014), Regassa e Wortmann (2014) e Umakanth et al. (2012) encontraram variações no teor de sólidos solúveis totais (9,35-24,00%), açúcares

redutores (0,11-3,74%), pureza (49,33-80,72%), volume de caldo/5 plantas (142-1.667 ml), peso colmos frescos / 5 plantas (1.667-6.250 g) e peso de colmo seco/ 5 plantas (833-5,000g), concentração de sacarose (7,2-15,5%), produção de açúcar (acima de 12 t ha⁻¹), produção de biomassa (36-140 t ha⁻¹).

Diversos estudos em sorgo sacarino têm demonstrado a forte presença da interação Genótipo × Ambiente para características relacionadas com o rendimento de etanol (BAHADURE et al., 2015; BUNPHAN et al., 2015; DURÃES, 2014; FIGUEIREDO et al., 2015; ELANGO VAN et al., 2014; UMAKANTH et al., 2012). No presente estudo, o desempenho dos genótipos não foi consistente nos diferentes locais indicado pelos efeitos significativos das interações Genótipo x Local para a maioria das características estudadas.

A existência de interação demonstra uma inconsistência dos efeitos aditivos e não-aditivos quando obtidos em ambientes diferentes. Essa interação pode reduzir a correlação entre o fenótipo e o seu genótipo, limitando a validade das inferências sobre a herança de caracteres quantitativos (LOCATELLI et al., 2002). Embora, os efeitos da CGC e CEC não tenham sido consistentes nos diferentes ambientes, os efeitos da CGC e CEC restritos aos dois ambientes em estudo não são o interesse em si do programa de melhoramento, desta forma, foram considerados para fins de seleção das linhagens e combinações híbridas o efeito médio da CGC e CEC nos ambientes.

A estimativa dos efeitos da CGC é considerada um critério informativo e mais eficiente para seleção de genitores (CRUZ; VENCOVSKY, 1989). Nesse trabalho a apresentação gráfica permitiu a análise do desempenho dos genitores quanto aos caracteres em conjunto, facilitando a seleção.

A análise dialélica de Griffing (1956) apresenta utilidade na seleção de genitores e também na determinação dos efeitos gênicos predominantes na expressão fenotípica dos caracteres de importância, intrínsecos aos genótipos avaliados, mediante a estimação dos efeitos das CGC e CEC.

Pela fórmula teórica da CGC em testecrosses apresentada por Vencovsky e Barriga (1992), tem-se que a CGC de uma linhagem restauradora i pode ser expressa por: $CGC_i = (p_i - \bar{p})[a + (1 - 2\bar{r})d]$, em que: p_i é a frequência do alelo favorável na i -ésima linhagem R , \bar{p} é a frequência alélica média das linhagens R , \bar{r} é a frequência alélica média das linhagens testadoras ou macho-estéreis A , a é o desvio dos homozigotos em relação à média, d é o desvio do heterozigoto em relação à média. Por sua vez, para expressar a fórmula da CGC das linhagens macho-estéreis, tem-se que as linhagens testadoras são as restauradoras. Evidencia-se, ainda, que tanto os efeitos aditivos quanto dominantes podem contribuir com a estimativa da CGC. Somente quando a frequência alélica média dos testadores for igual a 0,5 ou não há efeito de dominância, existe predomínio da ação aditiva na expressão dos caracteres. Nesse trabalho foi possível selecionar linhagens com elevada CGC, ou seja, pela fórmula da CGC, estes genitores apresentam melhor desempenho em combinações híbridas devido à elevada frequência de alelos favoráveis.

A fórmula teórica da CEC em cruzamentos dialélicos parciais corresponde a: $CEC_{ij} = -2[(p_i - \bar{p})(r_j - \bar{r})d]$, em que: r_j é a frequência alélica da linhagem macho-estéril j . Os demais termos foram especificados anteriormente. Portanto, a CEC depende da existência de dominância ($d \neq 0$) e que as linhagens parentais restauradora e macho-estéril apresentem divergência genética ($y \neq 0$). Logo, evidencia-se que a CEC guarda uma relação estreita com a heterose ($h = dy^2$), de modo que híbridos com elevada CEC apresentam maior heterose. No presente estudo, a significância dos efeitos da CEC para a maioria dos caracteres avaliados, evidencia a importância da ação gênica dominante na expressão fenotípica e que as linhagens avaliadas são divergentes.

Genes com ação gênica aditiva e não-aditiva (e.g. dominância) participam da expressão fenotípica da quase totalidade dos caracteres estudados. Isto implica que a melhoria destas características e aumento dos ganhos

genéticos podem ser conseguidos por meio de seleção e hibridação. Estes resultados corroboram com o estudo desenvolvido por Bunphan et al. (2015) em que efeitos aditivos e não-aditivos tiveram participação na expressão fenotípica dos caracteres teor de sólidos solúveis, rendimento de biomassa e rendimento de caldo. Resultado divergente foi encontrado por Bahadure et al. (2015) em que efeitos não-aditivos não foram importantes na expressão do caráter sólidos solúveis, por sua vez, efeitos aditivos e não-aditivos foram importantes para outras características como o rendimento de caldo e colmo.

Para o caráter AP, provavelmente devido à similaridade das linhagens dentro dos grupos A e R, efeitos aditivos não tiveram participação na expressão fenotípica, apresentando predominância de efeitos não-aditivos. Em contrapartida, nos trabalhos desenvolvidos por Bunphan et al. (2015) e Durães (2014) os efeitos aditivos e não-aditivos tiveram participação na expressão fenotípica deste caráter. No presente trabalho, apenas efeitos aditivos tiveram participação na expressão fenotípica dos caracteres PUR, EXT AR e FIB. Este resultado indica que os genitores estudados não apresentam complementação uns com os outros, em relação à frequência alélica nos locos com alguma dominância (VENCOVSKY; BARRIGA 1992).

A importância dos efeitos não-aditivos na expressão fenotípica de vários caracteres relacionados com a produção de etanol também foi observada nos trabalhos desenvolvidos por Makanda, Tongoona e Derera (2009), Audilakshmi et al. (2010), Pfeiffer et al. (2010). Umakanth et al. (2012), Durães (2014), indicando o uso da heterose pela produção de híbridos para aumentar o rendimento destas características.

A heterose média dos híbridos para os caracteres avaliados neste trabalho foi de FLOR (-3,30%), AP (21,04%), PMV (24,17%), MS (5,22%), PMS (26,54%), SST (10,95%), TBH (30,54%), POL (17,76%), ART (11,65%), ATR (11,22%), ET (11,65%), TBH (30,26%), ETH (31,59%). Do ponto de vista

aplicado, o cálculo da heterobeltiose é mais importante para o sorgo sacarino. Nesse trabalho foram obtidos alguns híbridos que superaram a média das linhagens restauradoras para os caracteres avaliados.

Apesar dos benefícios que a exploração da heterose pelo uso comercial de híbridos pode trazer para a produção do sorgo sacarino, no Brasil ainda é limitado o número de híbridos disponíveis no mercado, sendo um grande desafio para os programas de melhoramento é desenvolver híbridos que superem o desempenho das linhagens. Isto se deve, especialmente, ao emprego nos cruzamentos híbridos de linhagens macho-estéreis que apresentam teores de açúcares muito inferiores aos das variedades, devido serem oriundas de programas de melhoramento voltados para a produção de híbridos graníferos e forrageiros. Nesse contexto, atualmente, trabalhos têm sido desenvolvidos com o objetivo de selecionar linhagens macho-estéreis sacarinas de alto desempenho, principalmente ricas em açúcar, visando suprir os programas de melhoramento do sorgo sacarino.

Os resultados obtidos no presente estudo são bastante promissores para o programa de melhoramento do sorgo sacarino, haja vista, a seleção de alguns híbridos que superaram a média das linhagens macho-estéreis e restauradoras de fertilidade para caracteres de interesse. Estas combinações híbridas foram recomendadas para ensaios avançados. Contudo, apesar dos bons resultados obtidos relativos aos híbridos, as linhagens macho-estéreis apresentaram média *per se* inferior, sendo imprescindível a continuação do melhoramento das mesmas.

Deve-se salientar que as linhagens macho-estéreis apresentam porte baixo para serem apropriadas para colheita mecanizada das sementes, resultando em linhagens com baixo desempenho quanto à produção de massa verde e etanol. Em sorgo a característica altura de planta é controlada por quatro pares

de genes principais (dw1, dw2, dw3 e dw4) os quais atuam de modo independente e aditivo.

Finalmente, as linhagens selecionadas neste estudo apresentam potencial para exploração como genitores em programas de melhoramento para fins de extração de linhagens com elevada produção de etanol.

6 CONCLUSÕES

Houve efeito significativo da CGC das linhagens macho-estéreis e restauradores para a maioria das características agronômicas e tecnológicas em sorgo sacarino. Efeitos significativos de CEC também foram verificados para a quase totalidade de características agronômicas e tecnológicas avaliadas, indicando que efeitos não-aditivos atuam na expressão fenotípica.

Considerando os efeitos da CGC, a linhagem macho-estéril 201402B022-A e as linhagens restauradoras BRS 511, CMSXS643 e CMSXS646 foram consideradas promissoras para exploração como genitores em programas de melhoramento genético de sorgo sacarino, visando elevar a produção de etanol e a qualidade da matéria-prima.

Os híbridos 201402B010-A x BRS 511, 201402B010-A x BRS 508, 201402B010-A x CMSXS646, 201402B022-A x BRS 511, 201402B022-A x CMSXS643, 201402B022-A x CMSXS646 e 201402B022-A x CMSXS647 foram os mais promissores para rendimento de etanol.

REFERÊNCIAS

- ALMODARES, A.; HADI, M. R. Production of bioethanol from sweet sorghum: A review. **African Journal of Agricultural Research**, v. 4, n. 9, p. 772-780, 2009.
- ANAMI, S. E. et al. Sweet sorghum ideotypes: genetic improvement of stress tolerance. **Food and Energy Security**, v.4, n.1, p. 3-24, 2015a.
- ANAMI, S. E. et al. Sweet sorghum ideotypes: genetic improvement of the biofuel syndrome. **Food and Energy Security**, v.4, n. 3, p.159-177, 2015b.
- AUDILAKSHMI, S. et al. Inheritance of sugar concentration in stalk (brix), sucrose content, stalk and juice yield in sorghum. **Biomass and Bioenergy**, v. 34, n.6, p. 813-820, 2010.
- ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS (AOAC). **Official Methods of Analysis**.15 ed. Washington, 1990.1018 p.
- BAHADURE, D.M. et al. Combining ability and heterosis on millable stalk and sugar concentration for bioethanol production across environments in sweet sorghum (*Sorghum bicolor* (L.)Moench.). **Electronic Journal of Plant Breeding**, v. 6, n.1, p. 58-65, 2015.
- BERNARDO, R. **Breeding for Quantitative Traits in Plants**. Stemma, Hardbound, 2010. 369p.
- BILLOT, C. et al. Massive Sorghum Collection Genotyped with SSR Markers to Enhance Use of Global Genetic Resources. **Plos One**, v. 8, n. 4, p. 59714, 2013.
- BUNPHAN, D. et al. Heterosis and Combining Ability of F1 Hybrid Sweet Sorghum in Thailand. **Crop Science**, v. 55, p. 178-187, 2015.
- BUNPHAN, D.; JAISIL, P.; SANITCHON, J. Application of LW7 marker for identification of progenies with male sterility gene in sweet sorghum population. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 13, n.1, p. 59-66, 2012.
- CARGNELUTTI FILHO, A.; STORCK, L. Medidas do grau de precisão experimental em ensaios de competição de cultivares de milho. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 44, n. 2, p. 111-117, 2009.

CASELA, C. R. et al. **Doenças foliares de sorgo**. Embrapa Milho e Sorgo, Embrapa Circular Técnica, 72, Sete Lagoas, 2007. 5p.

CONSECANA. CONSELHO DOS PRODUTORES DE CANA-DE-AÇÚCAR. **Açúcar e Álcool do Estado de São Paulo**: Manual de instruções. 5. ed. Piracicaba, 2006. 54 p.

CRUZ, C. D. GENES - A Software Package for Analysis in Experimental Statistics and Quantitative Genetics. **Acta Scientiarum Agronomy**, v.35, n.3, p. 271-276, 2013.

CRUZ, C.D.; REGAZZI, A.J.; CARNEIRO, P.C.S. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. Viçosa: UFV, Imprensa universitária, v.1, 2012.

CRUZ, C.D.; VENCOVSKY, R. Comparação de alguns métodos de análise dialélica. **Revista Brasileira de Genética**, v.12, n.2, p.425-438, 1989.

DOGGETT, H.; EBEHART, S. A. Recurrent selection in sorghum. **Crop Science**, v. 8, n. 1, p. 119-121, 1968.

DURÃES, N.N.L. **Heterose em Sorgo Sacarino**. 2014. 79 p. Dissertação (Mestrado em Genética e Melhoramento de Plantas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014. Disponível em: http://repositorio.ufla.br/bitstream/1/3792/1/DISSERTA%C3%87%C3%83O_Heterose%20em%20Sorgo%20Sacarino.pdf Acesso em: 20 jul. 2015.

ELANGOVAN, M. et al. Genetic Diversity and Heritability Characters Associated in Sweet Sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench]. **Sugar Tech**, v. 16, n.2, p. 200-210, 2014.

FALCONER, D.S.; MACKAY, T.F.C. **Introduction to quantitative genetics**. 4.ed. Edinburgh: Longman Group Limited, 1996. 464p.

FERREIRA, D. F. **Estatística básica**. Lavras: UFLA, 2005. 653 p.

FIGUEIREDO, U. J. de et al. Adaptability and stability of genotypes of sweet sorghum by GGEbiplot and Toler methods. **Genetics and Molecular Research**, v. 14, n. 3, p. 11211-11221, 2015.

GARDNER, C.O.; EBERHART, S.A. Analysis and interpretation of the variety cross diallel and related populations. **Biometrics**, v.22, p. 439-452, 1966.

GERALDI, I.O.; MIRANDA FILHO, J.B. Adapted model for the analysis of combining ability of varieties in partial dialles crosses. **Revista Brasileira de Genética**, v. 11, n. 2, p. 419-430, 1988.

GRIFFING, B. Concept of general and specific combining ability in relation to diallel crossing systems. **Australian Journal of Biological Sciences**, v.9, p.463-493, 1956.

HALLAUER, A.R.; MIRANDA FILHO, J.B.; M.J. CARENA. Heterosis. In: HALLAUER, A.R., MIRANDA FILHO, J.B.; M.J. CARENA. (Ed.). **Quantitative genetics in maize breeding**. New York: Springer, p. 477-459, 2010.

HAYMAN, B.I. The theory and analysis of diallel crosses. **Genetics**, v. 39, p.789-809, 1954.

INDHUBALA, M.; GANESAMURTHY, K.; PUNITHA, D. Combining Ability Studies for Quality Traits in Sweet Sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). **The Madras Agricultural Journal**, v. 97, p.17-20, 2010.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. **BDMEP - Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa**. Disponível em: <www.inmet.gov.br>. Acesso em: 02/10/2016.

KEMPTHORNE, O.; CURNOW, R.N. The partial diallel cross. **Biometrics**, v.17, n. 2, p.229-250, 1961.

KIMBER, C. T.; DAHLBERG, J. A.; STEPHEN, K. The Gene Pool of Sorghum bicolor and Its Improvement. In: **Genomics of the Saccharinae, Plant Genetics and Genomics: Crops and Models**. Paterson, A.H. (ed.), New York, v. 11, p. 23-41, 2013.

KRAUSE, W.; RODRIGUES, R.; LEAL, N.R. Capacidade combinatória para características agronômicas em feijão-de-vagem. **Revista Ciência Agronômica**, v. 43, n. 3, p. 522-531, 2012.

KRIEGER U.; LIPPMAN, Z.B.E.; ZAMIR, D. The flowering gene *SINGLE FLOWER TRUSS* drives heterosis for yield in tomato. **Nature Genetics**, v. 42, p. 459-463, 2010.

KUMAR, A.A. et al. Recent Advances in Sorghum Genetic Enhancement Research at ICRISAT. **American Journal of Plant Sciences**, v. 2, p. 589-600, 2011.

LOCATELLI, A.B. et al. Capacidade combinatória de nove linhagens endogâmicas de milho (*Zeamays L.*) em dois ambientes. **Ciência Rural**, v. 32, n. 3, p. 365-370, 2002.

LOMBARDI, et al. Path analysis of agro-industrial traits in sweet sorghum. **Genetics and Molecular Research**, v.14, n.4, p.16392-16402, 2015.

LOURENÇO, M.E.V. et al. Potencialidades do sorgo sacarino [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] para a produção sustentável de bioetanol no Alentejo. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 30, n. 1, p. 103-110, 2010.

MAKANDA, I.; TONGOONA, P.; DERERA, J. Combining ability and heterosis of sorghum germplasm for stem sugar traits under off-season conditions in tropical lowland environments. **Field Crops Research**, v. 114, n.2, p. 272-279, 2009.

MAY, A. et al. **Sistema Embrapa de produção agroindustrial de sorgo sacarino para bioetanol**: Sistema BRS1G-Tecnologia Qualidade Embrapa. Embrapa Milho e Sorgo, Embrapa Circular Técnica, 139, Sete Lagoas, 2012a. 118 p.

MAY, A. et al. Seminário temático agroindustrial de produção de sorgo sacarino para bioetanol- **Anais...** Embrapa Milho e Sorgo, Documentos 145, p.33-68, 2012b.

MENDES, F.F. et al. Index to select the best segregating populations of common beans. **Annual Report of Bean Improvement Cooperative**, v.52, p.14-15, 2009.

NAN, L.; BEST. G.; CARVALHO NETO, C.C. Integrated energy systems in China: the Cold Northeaster region experience. Rome: UNUP, 1994. 475 p.

NETTO, D. A. M. **Coleção de base e coleção ativa**: banco de germoplasma de sorgo. Embrapa Milho e Sorgo, Embrapa Circular Técnica, 99, Sete Lagoas, 2010. p. 27.

PARRELLA, R.A. da C. et al. **Desenvolvimento de Híbridos de Sorgo Sensíveis ao Fotoperíodo visando Alta Produtividade de Biomassa**. Embrapa Milho e Sorgo, Embrapa Circular Técnica, 28, Sete Lagoas, 2010. p. 23.

PARRELA, R.A.C. Melhoramento genético do sorgo sacarino. **Revista agroenergia**, v. 2, n.3, p. 13-15, 2011

PATERNIANI, E.; CAMPOS, M.S. Melhoramento do milho. In BORÉM, A. (Organizador). **Melhoramento de espécies cultivadas**. Viçosa. Editora UFV, 1999. p. 429-485.

PATERSON, A. et al. The Sorghum bicolor genome and the diversification of grasses. **Nature**, v. 457, p. 551-556, 2009.

PEDERSEN, J. F.; TOY; JOHNSON, J. J. Natural Out-crossing of Sorghum and Sudangrass in the Central Great Plains. **Crop Science**, v. 38, n. 4, p. 937-939, 1998.

PFEIFFER, T.W. et al. Heterosis in Sweet Sorghum and Selection of a New Sweet Sorghum Hybrid for Use in Syrup Production in Appalachia. **Crop Science**, v. 50, n. 5, p. 1788-1794, 2010.

PEREIRA FILHO et al. 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, n. 2, p. 118-127, 2013.

PIMENTEL-GOMES, F.; GARCIA, C.H. **Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais**. Piracicaba: FEALQ, 2002. 309p.

QUEIROZ et al. Potencial do sorgo para uso na Alimentação Humana. **Informe Agropecuário**, v. 35, n. 278, p. 7-12, 2014.

R Development Core Team. 2015. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Disponível em: <<https://www.R-project.org/>>.

RAMALHO, M.A.P. et al. **Aplicações da Genética Quantitativa no Melhoramento de Plantas Autógamas**. Lavras: UFLA, 2012. 522p.

RAMALHO M.A.P.; SANTOS J.B.; ZIMMERMANN, M.J.O. **Genética quantitativa em plantas autógamas: aplicação ao melhoramento do feijoeiro**. Goiânia, UFG, 1993. 271p.

REDDY, B.V.S.; RAMESH, S.; ORTIZ, R. Genetic and cytoplasmic-nuclear male sterility in sorghum. In: JANICK, J. **Plant Breeding Reviews**, v. 25, p. 139-172, 2005.

REDDY, B.V.S et al. Combining ability and heterosis of sorghum germplasm for stem sugar traits under off-season conditions in tropical lowland environments. **Euphytica**, v.154, p.153-164, 2007.

REDDY, B.V.S.; KUMAR, A.A.; REDDY, P.S. Recent Advances in Sorghum Improvement Research at ICRISAT. **Natural Science**, v. 44, p. 499-506, 2010.

REGASSA, T.H.; WORTMANN, C.S. Sweet sorghum as a bioenergy crop: Literature review. **Biomass and Bioenergy**, v. 64, p. 348-355, 2014.

RESENDE, M.D.V.; DUARTE, J.B. Precisão e controle de qualidade em experimentos de avaliação de cultivares. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.37, n.3, p.182-194, 2007.

SANTOS, F.S. et al. Sorgo sacarino na produção de agroenergia. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 4, p. 01- 12, 2015.

SANDEEP, R.G. et al. Parental combining ability as a good predictor of productive crosses in sweetsorghum [*Sorghum bicolor* (L.)Moench]. **Journal of Applied and Natural Science**, v. 2, n. 2, p. 245-250, 2010.

SCHAFFERT, R.E. et al. Metas de rendimento e qualidade de sorgo sacarino. **Agroenergia em Revista**, p. 47-47, 2011.

SCOTT, A.J.; KNOTT, M. A cluster analysis method for grouping means in the analysis of variance. **Biometrics**, v. 30, n. 3, p. 507-512, 1974.

SOUZA,V.F. Adaptability and stability of sweet sorghum cultivars. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v.13, n. 2, p.144-151, 2013.

SPRAGUE, G.F.; TATUM, L.A. General vs. specific combining ability in single crosses of corn. **Journal of American Society of Agronomy**, v. 34, n. 10, p. 923-932, 1942.

SRINIVASA, R.P. et al. **Sweet sorghum for biofuel and strategies for its improvement**. Information Bulletin n.77, Patancheru, Andhra Pradesh, India: International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics. 2009. 80 p.

STEPHENS, J.C.; HOLLAND, P.F. Cytoplasmic male sterility for hybrid sorghum seed production. **Agronomy Journal**, v. 46, p. 20-23, 1954.

UMAKANTH, A.V et al. Combining ability and heterosis over environments for stalk and sugar related traits in sweet sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench.]. **Sugar Tech**, v.14, n.3, p.237-246, 2012.

VENCOVSKY, R. Herança quantitativa. In: PATERNIANI, E.; VIEGAS, G.P. (Ed.). **Melhoramento e produção de milho**. Campinas, 1987, p.137-209.

VENCOVSKY, R.; BARRIGA, P. **Genética biométrica no Fitomelhoramento**. Ribeirão Preto: Sociedade Brasileira de Genética, 1992. 496p.

VINAYKUMAR, R., B. N. et al. Combining ability of parents and hybrids for juice yield and its attributing traits in sweet sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench]. **Electronic Journal of Plant Breeding**, v.2, n.1, p.41-46, 2011.

WANG, M. L. et al. Genetic diversity and population structure analysis of accessions in the US historic sweet sorghum collection. **Theor Appl Genet**, v. 120, n.1, p. 13-23, 2009.

WANG, M.L. et al. Genetic diversity in parent lines of sweet sorghum based on agronomical traits and SSR markers. **Field Crops Research**, v.149, p.11-19, 2013.

APÊNDICE A - estimativa da heterose na média dos parentais (H) e hebeltiose (HB) para os caracteres agronômicos florescimento (FLOR, DIAS) altura de plantas (AP, M), produção de massa verde (PMV, t ha⁻¹) obtidos na avaliação do cruzamento dialélico parcial envolvendo quatro linhagens a e cinco linhagens r de sorgo sacarino. Lavras: MG; Sete Lagoas: MG, 2014/2015

Híbrido	FLOR		AP		PMV		MS		PMS	
	H	HB	H	HB	H	HB	H	HB	H	HB
201402B010-A x BRS 511	-1,68	-4,91	19,15	-0,67	22,06	-4,87	10,70	7,41	28,24	0,84
201402B010-A x BRS 508	-5,21	-10,95	21,07	2,63	28,02	7,48	7,08	1,33	30,85	6,75
201402B010-A x CMSXS643	-5,73	-15,78	19,43	-0,99	25,25	1,13	3,64	3,81	25,68	0,50
201402B010-A x CMSXS646	-5,86	-11,27	15,36	-6,83	23,97	-1,95	3,46	0,97	25,97	-0,82
201402B010-A x CMSXS647	-3,01	-8,14	14,26	-8,00	14,78	-19,50	3,29	5,69	18,48	-12,20
201402B013-A x BRS 511	-0,11	-3,93	22,41	0,00	20,09	-5,21	-0,04	-6,34	18,16	-13,01
201402B013-A x BRS 508	-2,43	-8,69	23,26	1,66	23,08	3,44	6,23	-2,06	24,18	-2,15
201402B013-Ax CMSXS643	-7,49	-18,38	22,38	-0,99	26,20	4,54	5,86	3,52	28,12	3,94
201402B013-A x CMSXS646	-6,02	-12,14	17,31	-8,31	23,53	-0,31	2,79	-2,31	23,64	-3,89
201402B013-A x CMSXS647	-5,81	-11,76	19,87	-4,71	26,65	-0,82	3,82	3,63	29,51	3,00
201402B007-A x BRS 511	1,62	-3,18	19,68	-3,45	22,45	-7,79	5,28	-1,31	23,63	-10,73
201402B007-A x BRS 508	-4,04	-11,51	23,80	1,98	29,87	6,57	0,82	-8,61	28,50	-1,50
201402B007-A x CMSXS643	-4,51	-16,21	23,35	0,65	27,84	1,27	3,97	0,94	27,52	-2,06
201402B007-A x CMSXS646	-4,96	-12,13	18,42	-6,82	21,89	-8,21	11,54	6,35	28,50	-2,30
201402B007-A x CMSXS647	-0,01	-6,70	16,47	-8,76	20,19	-15,27	5,86	5,06	24,28	-9,37
201402B022-A x BRS 511	0,86	-2,72	26,01	5,08	29,22	9,66	-0,26	-5,32	27,40	4,06
201402B022-A x BRS 508	-0,58	-6,52	30,66	11,12	13,30	-5,26	8,47	1,52	18,67	-4,70
201402B022-A x CMSXS643	-5,34	-15,80	21,60	-1,99	35,56	19,25	6,04	4,84	37,72	20,52
201402B022-A x CMSXS646	-4,02	-9,81	23,88	0,32	33,31	15,19	7,92	4,20	37,41	18,54
201402B022-A x CMSXS647	-1,66	-7,17	22,42	-0,97	16,16	-12,05	7,90	8,89	24,39	0,46
Média	-3,30	-9,89	21,04	-1,45	24,17	-0,63	5,22	1,61	26,54	-0,21

APÊNDICE B - Estimativa da heterose na média dos parentais (H) e heterobeliose (HB) para os caracteres tecnológicos teor de sólidos solúveis totais (SST, %CALDO), sacarose (POL, % caldo), pureza (PUR, %), açúcares redutores (AR, %caldo), açúcares redutores totais (ART, %caldo), açúcares totais recuperáveis (ATR, Kg de açúcar t⁻¹ de colmo), etanol hidratado (EH, l de etanol t⁻¹ de colmo), brix por hectare (TBH, t ha⁻¹) e produção de etanol (ETH, l ha⁻¹) avaliados em dois locais. Lavras: MG; Sete Lagoas: MG, 2016

Híbrido	SST		POL		ART		ATR		ET		TBH		ETH	
	H	HB	H	HB	H	HB	H	HB	H	HB	H	HB	H	HB
201402B010-A x BRS 511	18,41	10,90	29,82	21,43	22,67	15,33	22,00	15,62	22,65	15,32	30,22	0,54	36,36	8,64
201402B010-A x BRS 508	16,51	7,94	26,11	13,94	20,29	11,15	19,21	10,95	20,27	11,13	39,29	17,23	40,81	17,70
201402B010-A x CMSXS643	6,23	-0,90	8,93	2,42	5,83	0	6,14	0,31	5,86	0	27,13	-3,06	25,81	-4,31
201402B010-A x CMSXS646	10,84	4,05	26,62	23,59	19,50	16,3	18,65	16,27	19,53	16,26	30,31	1,85	39,28	16,59
201402B010-A x CMSXS647	13,50	15,80	12,92	18,39	11,34	14,92	9,78	13,23	11,37	14,88	27,47	-0,59	27,44	0,83
201402B013-A x BRS 511	4,28	-4,77	3,13	-11,4	-1,15	-7,60	-0,53	-5,91	-1,15	-7,60	19,92	-12,07	14,35	-15,58
201402B013-A x BRS 508	9,39	0,00	17,24	1,39	3,86	-4,18	3,78	-3,33	3,84	-4,23	29,88	6,25	24,92	2,35
201402B013-Ax CMSXS643	6,93	-0,24	9,30	0	2,50	-0,57	2,78	-0,51	2,50	-0,58	26,87	-1,32	22,51	-2,10
201402B013-A x CMSXS646	7,37	0,24	10,58	4,42	3,93	3,12	3,92	3,86	3,97	3,09	26,39	-1,53	24,78	3,50
201402B013-A x CMSXS647	8,45	10,70	11,16	14,12	3,52	10,31	2,96	9,44	3,52	10,37	32,36	7,95	29,39	9,94
201402B007-A x BRS 511	10,67	-2,99	18,73	-1,72	10,67	-2,75	10,78	-1,21	10,71	-2,74	26,95	-10,31	26,67	-11,51
201402B007-A x BRS 508	9,62	-5,09	20,59	-2,64	14,51	-0,10	13,75	0,42	14,51	-0,06	35,93	6,80	38,82	9,45
201402B007-A x CMSXS643	13,08	1,20	24,36	8,64	15,63	5,71	15,18	5,43	15,67	5,66	32,63	-1,13	33,41	0,52
201402B007-A x CMSXS646	20,84	10,00	35,46	24,18	24,00	16,62	23,30	17,01	24,00	16,66	32,64	-0,76	37,77	8,85
201402B007-A x CMSXS647	13,39	10,3	27,39	22,01	15,75	14,31	14,14	12,88	15,69	14,29	28,18	-6,26	31,3	-0,20
201402B022-A x BRS 511	4,20	-2,99	3,64	-3,49	3,40	-3,09	4,45	-0,86	3,40	-3,09	32,17	9,14	31,76	7,55
201402B022-A x BRS 508	15,27	8,13	20,17	10,77	17,37	10,16	16,19	9,83	17,36	10,14	24,90	4,38	27,84	5,74
201402B022-A x CMSXS643	11,42	6,32	16,44	14,45	13,50	10,53	13,10	9,99	13,52	10,51	42,20	23,30	43,51	25,26
201402B022-A x CMSXS646	6,21	0,81	11,85	12,43	8,92	7,71	8,30	8,05	8,89	7,75	35,75	15,32	40,32	23,11
201402B022-A x CMSXS647	12,35	16,20	20,65	29,25	16,85	22,5	16,46	21,86	16,90	22,51	29,66	8,45	34,82	16,50
Média	10,95	4,27	17,76	10,11	11,65	7,02	11,22	7,17	11,65	7,01	30,54	3,21	31,59	6,14