



UNIVERSIDADE
ESTADUAL DO
MARANHÃO



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO – UEMA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA E AMBIENTE - PPGAA**

JEMIMA CAMELO DE SOUSA

**CORRELAÇÕES DO ÍNDICE DE CLOROFILA E TEORES DE AÇÚCARES SOLÚVEIS NO
COLMO COM O CRESCIMENTO E PRODUTIVIDADE DE CULTIVARES DE SORGO EM
BALSAS MARANHÃO**

Balsas-MA

2023

JEMIMA CAMELO DE SOUSA

**CORRELAÇÕES DO ÍNDICE DE CLOROFILA E TEORES DE AÇÚCARES
SOLÚVEIS NO COLMO COM O CRESCIMENTO E PRODUTIVIDADE DE
CULTIVARES DE SORGO EM BALSAS MARANHÃO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Ambiente – PPGAA/UEMA, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Agricultura e Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Eliemar Campostrini

Coorientador: Prof. Dr. Francisco Charles Silva Santos

Balsas-MA

2023

JEMIMA CAMELO DE SOUSA

**CORRELAÇÕES DO ÍNDICE DE CLOROFILA E TEORES DE AÇÚCARES
SOLÚVEIS NO COLMO COM O CRESCIMENTO E PRODUTIVIDADE DE
CULTIVARES DE SORGO EM BALSAS MARANHÃO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Agricultura
e Ambiente – PPGAA/UEMA, como parte
dos requisitos para obtenção do título de
Mestre em Agricultura e Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Eliemar Campostrini

Coorientador: Prof. Dr. Francisco Charles Silva Santos

Aprovada em 26 / 02 / 2023

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
gov.br ELIEMAR CAMPOSTRINI
Data: 27/02/2023 08:20:01-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Eliemar Campostrini
(Orientador)

Documento assinado digitalmente
gov.br FRANCISCO CHARLES DOS SANTOS SILVA
Data: 27/02/2023 11:10:05-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Francisco Charles dos Santos Silva
(Coorientador)

Documento assinado digitalmente
gov.br ALAN MARIO ZUFFO
Data: 27/02/2023 10:58:43-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Alan Mario Zuffo
(Membro externo ao programa)

"Eu sou brasileiro, filho do Nordeste,
não nego meu sangue, não nego meu nome.
Eu sou de uma terra que o povo padece,
mas não esmorece e procura vencer".
(Patativa do Assaré)

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus, por estar presente em minha vida em todos os momentos me dando força para seguir em frente.

A Universidade Estadual do Maranhão, pela oportunidade da realização do Curso de Mestrado.

Ao programa de Pós Graduação em Agricultura e Ambiente pela oferta do curso de Pós Graduação e aos professores pelos conhecimentos e auxílio.

Ao meu orientador Prof. Dr. Eliemar Campostrini, por todos os ensinamentos, e confiança, ao meu coorientador Francisco Charles pelos ensinamentos, confiança e os momentos de descontração.

A minha amiga e companheira de trabalho Raianara Andrade pela ajuda na condução do experimento, momentos de descontração, incentivos e inspiração nesta jornada. Ao colega de mestrado Vinicius pelos incentivos e apoio.

Aos estagiários Cicero, Airton, Railane e Maria pela ajuda na condução do experimento. Ao motorista da UEMA seu Edson pela disposição e momentos de descontração.

Aos meus amigos da graduação em zootecnia, Marlon, Larissa, Vanessa que mesmo de longe sempre me apoiaram. A minha amiga Crisley que conheci nessa jornada.

A minha tia Celene Pereira Camelo por todos os conselhos, reflexões e ajudas ao longo da pós graduação.

Aos meus familiares Júlia, Armando, Maria Daluz pelo apoio em alguns momentos dessa jornada.

A minha família, meus pais Marlene e Edivaldo, minha irmã Ingrid e meu sobrinho José Lourenço, pelo suporte e momentos felizes.

Fundação de Amparo à Pesquisa e Desenvolvimento Científico do Maranhão (FAPEMA), pela bolsa de estudo concedida durante o curso.

Aos membros da banca de dissertação que se disponibilizaram e contribuíram com a avaliação e finalização deste trabalho.

E a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a concretização deste trabalho. A todos meus sinceros agradecimentos.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Área de estudo localizada no município de Balsas, Maranhão.....	15
Figura 2 - Dados de temperatura mínima, média e máxima (°C) e precipitação pluvial (mm) durante os meses de execução do experimento em Balsas nos anos de 2021 e 2022 (INMET, 2022).....	16
Figura 3 - Rede de correlação genotípica de características de sorgo (<i>Sorghum bicolor</i>)..	23
Figura 4 - Gráfico de análise de trilha com a variável principal BRIX sobre as variáveis básicas ou explicativas:	26
Figura 5 - Gráfico de análise de trilha com a variável principal SPAD sobre as variáveis básicas ou explicativas:	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Código, espécies, aptidão agronômica e mantenedor das cultivares avaliadas...	17
Tabela 2. Atributos químicos do solo da área experimental nos locais estudados antes da instalação do experimento, durante o ano agrícola 2021/2022	17
Tabela 3. Resumo da análise de variância conjunta de variáveis produtivas de 10 genótipos de sorgo em Balsas-MA nos anos agrícolas de 2021 e 2022	22

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	7
2. OBJETIVOS	9
2.1 Objetivo geral	9
2.2 Objetivos específicos.....	9
1. INTRODUÇÃO	12
2. MATERIAL E MÉTODOS	14
2.1 Área experimental	14
2.2 Delineamento experimental	16
2.3 Características avaliadas.....	18
2.4 Análises estatísticas	19
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	21
4. CONCLUSÃO	33
REFERÊNCIAS	34

1. INTRODUÇÃO

O sorgo (*Sorghum bicolor* [L.] Moench) é uma planta herbácea monocotiledônea, pertence à família das gramíneas, e este cereal é o quinto mais produzido no mundo (Tabosa et al., 2019). Essa espécie é originária da África tropical, onde foi domesticado para o consumo humano e animal entre 3.000 e 5.000 anos atrás. A espécie se adaptou ao clima brasileiro, sendo desenvolvidas cultivares próprias (Queiroz et al., 2009).

O sorgo possui tolerância a seca, exige baixa quantidade de água durante o crescimento e desenvolvimento, é uma opção sustentável como base alimentar humana, e como forrageira para regiões ameaçadas pelas mudanças climáticas (Taylor, 2019).

No Brasil, os principais tipos de sorgo mais produzidos são os dos tipos granífero, forrageiro, sacarino, biomassa e vassoura. O sorgo granífero e forrageiro são utilizados principalmente para alimentação animal e corte/pastejo. Contudo, o granífero possui uma maior produção e consumo, e se destaca economicamente (Silva, 2019; Landau et al., 2020). O sorgo do grupo vassoura é usado na confecção de vassouras, e o sacarino e biomassa são respectivamente usados para produção de etanol/açúcar e energia de segunda geração (Embrapa, 2015).

Por ser uma planta sensível ao fotoperíodo, o sorgo tem desenvolvimento variável, conforme a região de cultivo e a época de semeadura, o que resulta em variação no rendimento de forragem dentro e entre materiais distintos (Silva et al., 2005). No Cerrado, o cultivo do sorgo, além de ser uma opção para diversificação de cultivos, é uma alternativa por apresentar maior resistência a veranicos, sendo comum ao cultivo tardio em substituição à cultura do milho (Marchão, et al., 2021).

No Brasil, dentre os três tipos principais de sorgo cultiváveis, o sorgo forrageiro, quando comparado com o sorgo granífero, produz mais matéria seca. Este sorgo forrageiro possui caules grossos e é muito utilizado para ensilagem (Rezende et al., 2020; Ribeiro et al., 2017). O sorgo granífero possui potencial intermediário de produção, e pode ser usado para pastagem, feno ou silagem (Ribeiro et al., 2015). O sorgo híbrido com capim-sudão, possui caule fino, excelente capacidade de perfilhamento e regeneração após o pastejo (Bath, 2019; Simili et al., 2011).

O *Sorghum bicolor* [L.] Moench é uma espécie com alto potencial, tendo diversos fins produtivos e características que se diferenciam de acordo com a cultivar adotada no sistema de produção. Já o sorgo sudanense, apresenta uma elevada tolerância à seca, alta eficiência no uso da água, elevado potencial de matéria seca, proteína bruta e forragem, além disso, apresenta alta

tolerância à salinidade (Carvalho et al., 2020; Tabosa, 2020). Nas fases iniciais de um programa de melhoramento, o conhecimento da relação linear entre os caracteres é de grande importância, principalmente em casos em que a característica de interesse apresenta baixa herdabilidade e difícil mensuração e identificação. A estimativa de parâmetros genéticos como herdabilidade, correlações genéticas e fenotípicas e ganhos com a seleção, estão entre os mais importantes parâmetros em programas de melhoramento genético (Vasconcelos et al., 2012). A utilização, portanto, de seleção indireta por resposta correlacionada pode permitir maior eficiência e progresso na seleção (Rios, et al., 2012).

A correlação entre o índice SPAD (Soil Plant Analysis Development) e o teor de N já foi efetuada em trabalhos com a cultura de milho e trigo (Torres-Netto et al., 2002, Torre-Netto et al., 2005; Castro et al., 2011; Kolln, 2012; Castro et al., 2014). Rocha et al. (2005) constataram correlações positivas entre o índice SPAD e o teor de N nas folhas de híbridos de milho (*Zea mays*). Em folhas de café, Godoy et al. (2008) verificou correlação positiva entre índice SPAD e teor de N. Neste trabalho de Godoy et al. (2008), foi relatado que o clorofilômetro foi eficiente para estimar o teor de N na folha, com correlação significativa e positiva da leitura do aparelho com o estado nutricional associadas ao N de diferentes espécies de plantas, e ao longo do ciclo de desenvolvimento.

O nitrogênio, entre os nutrientes, é o principal responsável pelo aumento da produção de forragem, principalmente nas espécies com elevado potencial produtivo, e este nutriente mineral está relacionado positivamente com elevado crescimento e desenvolvimento da parte aérea, devido à otimização dos processos de fotossíntese (Jarvis et al., 1995).

Um estudo de cultivares de trigo no Reino Unido indicou que estas cultivares tinham uma capacidade relativamente alta de armazenamento de reservas de caule até a idade de floração (Shearman et al., 2005), e em condições de estresse como por deficit hídrico, as plantas mantiveram o enchimento de grãos, mesmo sob estresse, o que manteve assim a produtividade destes genótipos.

Wright (1921) elaborou um método estatístico que estabeleceu as correlações diretas e indiretas das variáveis explicativas sobre uma variável principal, chamado de análise de trilha ("Path analysis"). Segundo Verma et al. (2020), a associação entre essas variáveis é estabelecida por meio do coeficiente de correlação, e quanto maior for este, maior a relação entre os caracteres analisados e vice-versa. Amplamente utilizada no ramo das ciências agrárias, uma vez que serve de aporte para tomada de decisões e incremento da produtividade das culturas, e diversos autores fazem o uso da análise de trilha.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar o índice SPAD (Soil Plant Analysis Development) (associado a concentração de clorofilas nas folhas) e a concentração de açúcares no colmo (BRIX) (associado a um ajustamento osmótico), estão relacionados com algumas variáveis agrônômicas em cultivares de sorgo cultivado em Balsas-MA.

2.2 Objetivos específicos

- I. Selecionar indiretamente características relacionadas à capacidade produtiva de fitomassa do sorgo;
- II. Determinar a relação entre as variáveis avaliadas;
- III. Recomendar métodos de avaliação para a seleção características produtivas.

CAPÍTULO 1. CORRELAÇÕES DO ÍNDICE DE CLOROFILA E TEORES DE AÇÚCARES SOLÚVEIS NO COLMO COM O CRESCIMENTO E PRODUTIVIDADE DE CULTIVARES DE SORGO EM BALSAS MARANHÃO

RESUMO

O sorgo (*Sorghum L. moench*) é uma gramínea de origem africana sendo um dos cereais mais cultivados no mundo, e, com relação à tolerância a estresses bióticos e abióticos, esta espécie é uma das mais versáteis. As informações sobre a correlação entre caracteres são de grande importância para otimizar a seleção simultânea de caracteres. Contudo, a quantificação e a interpretação da magnitude de uma correlação podem resultar em equívocos na estratégia de seleção. Por sua vez, a análise de trilha baseia-se na avaliação do efeito de uma variável independente, sobre uma variável dependente, após a remoção da influência de todas as outras variáveis independentes incluídas na análise. Assim, esta pesquisa objetivou avaliar o índice SPAD e a concentração de açúcares no colmo (BRX), estão relacionados com características agrônomicas em cultivares de sorgo cultivado no sul de Balsas-MA. O experimento foi realizado na unidade de pesquisa agrícola da Universidade Estadual do Maranhão, localizada no município de Balsas-MA, com delineamento experimental em blocos casualizados e três repetições, nas safras de 2021 e 2022. Para tanto, foram utilizados dez cultivares, sendo os tratamentos compostos pelas cultivares SUDAN 4202, AGRI 001-E, AGRI 002-E, BRS 658, BRS 810, BRS Ponta Negra, BRS 373, BR 509, BR 506 e IPA 467-4-2. Avaliou-se a altura de planta, o diâmetro do colmo, o número de folhas, a área foliar, os dias para o florescimento, ciclo (contagem de dias desde o dia da semeadura, até as plantas atingirem o estágio fenológico de grão pastoso.), o *stand* final, a massa fresca, a massa seca, o índice SPAD e o teor de açúcares no colmo estimado pelo índice °Brix.. As variáveis massa fresca, diâmetro do colmo, altura e número de folhas foram eficientes no aumento da produção de sólidos solúveis (BRX), o que indica a presença de causa e efeito. Entre todas as variáveis analisadas, a área foliar foi a única que exerceu efeito direto sobre a principal, índice SPAD, com magnitude superior ao efeito residual. A análise de trilha mostrou ser uma ferramenta eficiente na seleção de características produtivas de cultivares sorgo associadas ao índice de clorofila e sólidos solúveis.

Palavras-chave: Análise de trilha, SPAD, seleção

ABSTRACT

Sorghum (*Sorghum L. moench*) is a grass of African origin and is one of the most planted cereals in the world, and, with regard to tolerance to biotic and abiotic stresses, this species is one of the most versatile. The information about the correlation between characters is of great importance to optimize the simultaneous selection of characters. However, quantification and interpretation of the magnitude of a correlation can result in mistakes in the selection strategy. In turn, path analysis is based on evaluating the effect of an independent variable on a dependent variable, after removing the influence of all other independent variables included in the analysis. Thus, this research aimed to verify whether the SPAD index (associated with the concentration of chlorophylls in the leaves) and the concentration of sugars in the stem (BRIX) (associated with an osmotic adjustment), are related to some agronomic variables in different cultivars of sorghum cultivated in the south of the state of Maranhão. The experiment was carried out at the agricultural research unit of the State University of Maranhão, located in the municipality of Balsas-MA, with an experimental design in randomized blocks and three replications, with the experiment being repeated in the 2021 and 2022 harvests. treatments, being the treatments composed by the cultivars SUDAN 4202, AGRI 001-E, AGRI 002-E, BRS 658, BRS 810, BRS Ponta Negra, BRS 373, BR 509, BR 506 and IPA 467-4-2. The variables studied were plant height, stem diameter, number of leaves, leaf area, days to flowering, cycle (count of days from the sowing day, until the plants reach the phenological stage of pasty grain .), the final stand, the fresh mass, the dry mass, the SPAD index and the sugar content in the stem estimated by the °Brix index. For path analysis, the GENES software was used. The variables fresh mass, stem diameter, height and number of leaves were efficient in increasing the production of soluble solids (BRIX), which indicates the presence of cause and effect. Among all the analyzed variables, the leaf area was the only one that had a direct effect on the main one, the SPAD index, with a magnitude greater than the residual effect. Path analysis proved to be an efficient tool in the selection of productive traits of sorghum cultivars associated with chlorophyll content and soluble solids.

Keywords: Path analysis, SPAD, selection

1. INTRODUÇÃO

O sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) é uma gramínea de origem africana, pertencente à tribo Andropogoneae, e se destaca na alimentação humana e na animal, por possuir um alto valor proteico e energético (Araújo et al., 2020; Queiroz et al., 2021). Sendo um dos cereais mais cultivados no mundo, e, com relação à tolerância a estresses bióticos e abióticos, esta espécie é uma das mais versáteis e mais eficientes, uma vez que em condições estressantes do ambiente, as folhas desta espécie podem manter uma elevada assimilação fotossintética do carbono, bem como os grãos podem ter uma maior velocidade de maturação (Silva; Rodrigues, 2015). Dentre os estados brasileiros, o Maranhão ganha destaque na produção nacional de sorgo, com uma área de semeadura de 9,9 mil hectares (CONAB, 2022).

A cidade de Balsas é influenciada fortemente pelas forças produtivas agrícolas, notadamente, a agricultura pautada na produção de caráter intensivo e guiada pelo agronegócio principalmente a produção de grãos como soja e milho é reconhecido como uma das molas propulsoras que tem permitido uma expansão econômica desta cidade (Elias, 2013).

Na busca de selecionar genótipos de sorgo mais produtivos para Balsas - MA, uma alternativa é, durante o processo de seleção, a utilização, de caracteres de alta herdabilidade, de fácil medição e identificação, e que apresente alta correlação com a produtividade dos genótipos. Nesse sentido, na região brasileira supracitada, a análise do índice de clorofila (SPAD, *Soil Plant Analysis Development*) (índice SPAD) e o teor de sólidos solúveis (BRIX) podem ser caracteres a serem usados na seleção de genótipos mais produtivos em relação ao rendimento de grãos como também a produção de fitomassa pelas cultivares.

O índice SPAD, o qual está associado à concentração de clorofila das folhas, é um método rápido e não destrutivo para avaliar o desempenho do sistema fotossintético durante e após eventos de estresses (Grafts-Brander and Salvucci, 2002; Yamasaki et al., 2002, Torres-Netto et al., 2002, Torre-Netto et al., 2005; Castro et al., 2011; Castro et al., 2014). Em condições de estresse tanto biótico como abiótico, a avaliação do índice de clorofila também tem se destacado como uma importante ferramenta na avaliação da capacidade dos genótipos em obter elevados rendimentos (Silva et al., 2008).

Existem diversos estudos (MACHADO, E. C. et al., 2005; SOUSA FREITAS, A.G. et al., 2021) indicando que a fotossíntese (assimilação de CO₂) pode ser limitada pelo

fechamento estomático, seja em resposta ao decréscimo no potencial hídrico foliar, diminuição da umidade relativa do ar, ou como uma resposta direta dos estômatos ao déficit hídrico do solo. Além disso, apesar das difíceis condições como à seca, o crescimento de algumas plantas em regiões semiáridas indica que esses vegetais têm aparatos fotossintéticos resistentes à desidratação da folha (Jangpromma et al., 2005). Um exemplo desta resistência, é a cana-de-açúcar, espécie esta que possui cultivares considerados tolerantes à seca, sendo a capacidade de manter a fotossíntese mesmo sob deficiência hídrica, um dos mecanismos de resistência a esse estresse abiótico.

O declínio progressivo da capacidade fotossintética das plantas sob estresse por seca também é caracterizado pela degradação de clorofila (Rong-H et al., 2006). O que leva a análise dos pigmentos fotossintéticos, a ser uma importante ferramenta para avaliação da sanidade e integridade dos aparatos internos da célula durante o processo de fotossíntese, e fornecer uma precisa técnica de detecção e quantificação de plantas tolerantes ao estresse hídrico (Brunelli,2014).

O teor de sólidos solúveis, também conhecido como °Brix, pode ser utilizado como uma medida indireta do teor de açúcares. De acordo com Hunter, Skrivan e Ruffner (1994) e Palliotti e Cartechini (2001), os teores de glicose, frutose e sacarose, bem como a atividade de enzimas do metabolismo de carboidratos são influenciados por variações sazonais e fenológicas, e a expressão gênica é influenciada por uma variedade de fatores intra e extracelulares (Tymowska-Lalanne; Kreis, 1998), como exemplo os estímulos ambientais, hormonais e fases fenológicas (Roitsch et al.,2003). Hsiao (1973) e Boyer (1976) relataram que a translocação de nutrientes para o colmo é um dos processos que proporcionam maior tolerância ao déficit hídrico nas plantas. Portanto, a capacidade de mobilização das reservas do colmo para uma planta em déficit hídrico pode ser uma expressão única de tolerância à desidratação da planta, a qual está intimamente ligada ao rendimento de grãos e produtividade da cultivar.

As reservas de nutrientes do colmo são um componente importante de reprodução e assim melhorar o rendimento sob estresse hídrico (Blum,1998). O armazenamento e a disponibilidade para remobilização dos carboidratos podem variar ao longo do colmo. O enchimento de grãos sob estresse térmico também é suportado pela mobilização de reservas do colmo (Blum et al., 1994). Tanto o calor, quanto a seca, durante o enchimento dos grãos, reduzem a duração de enchimento de grãos. Quando o enchimento de grãos sob tal estresse depende de remobilização de reservas do caule, a taxa na qual essas reservas são

metabolizadas e transportadas para o grão é crucial. Sendo assim, a análise e estudos envolvendo estas variáveis são de grande importância.

Nos últimos anos, apesar da expansão da cultura do sorgo em nível mundial e nacional, as informações acerca das interações entre os diferentes componentes de rendimento da cultura com o índice de clorofila, e com a concentração de sólidos solúveis, ainda são escassas na literatura.

A análise de correlação é uma das formas de quantificar o grau de associação entre diferentes variáveis. Entretanto, a quantificação e a interpretação da magnitude de uma correlação podem, contudo, resultar em equívocos na estratégia de seleção, pois uma correlação alta entre dois caracteres pode ser resultado do efeito, sobre estes, de um terceiro ou de um grupo de caracteres (Cruz & Regazzi, 1994).

Com o intuito de entender melhor as causas envolvidas nas associações entre caracteres, algumas técnicas podem ser utilizadas, como exemplo a análise de rede de correlações e a análise de trilha (Wright, 1921). A análise de rede de correlações tem como propósito apresentar em um gráfico de rede, os padrões de associação presentes em um conjunto de variáveis, facilitando assim a análise dos resultados (Silva et al., 2016). Por sua vez, a análise de trilha baseia-se na avaliação do efeito de uma variável independente sobre uma variável dependente, isto, após a remoção da influência de todas as outras variáveis independentes incluídas na análise (Hartwig et al., 2007). Tal fato pode resultar no desdobramento das correlações estimadas em efeitos diretos e indiretos de caracteres sobre um caráter básico.

Assim, este trabalho teve como objetivo avaliar o índice SPAD (associado a concentração de clorofilas nas folhas) e a concentração de açúcares no colmo (BRIX) (associado a um ajustamento osmótico), estão relacionados com algumas variáveis agronômicas em diferentes cultivares de sorgo cultivado no sul do estado do Maranhão em Balsas-MA.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área experimental

Na unidade de pesquisa agrícola da Universidade Estadual do Maranhão, localizada no município de Balsas-MA, 07°31'57" S de latitude e 46°02'08" W longitude, dois ensaios experimentais foram realizados (Figura 1).

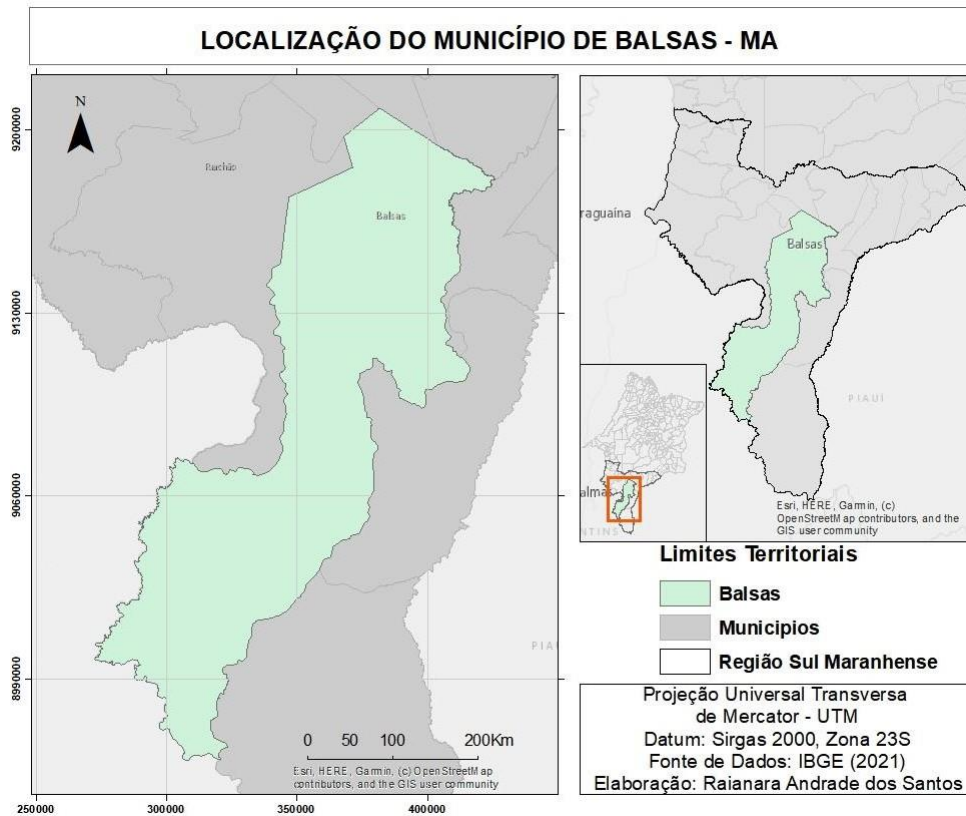


Figura 1. Área de estudo localizada no município de Balsas, Maranhão.

O primeiro ensaio foi realizado na segunda safra 2021/2022, entre os meses de março a junho, e o outro foi realizado na segunda safra 2022/2023, de fevereiro até maio. No local do experimento, o clima, segundo a classificação de Köppen, é do tipo tropical quente e úmido (Aw), com estação seca bem definida, e com temperatura média é de 27.1 °C (Maranhão, 2002). A precipitação pluviométrica média anual é de 1175 mm, sendo que as maiores precipitações ocorrem nos meses de novembro a abril, quando concentram 85% do total nesse período (Passos; Zambrzycki; Pereira, 2017). Durante as duas épocas de cultivo, as variáveis meteorológicas como a temperatura e a precipitação pluviométrica foram avaliadas por meio de uma estação climatológica localizada a 2,5 km da área experimental (Figura 2).

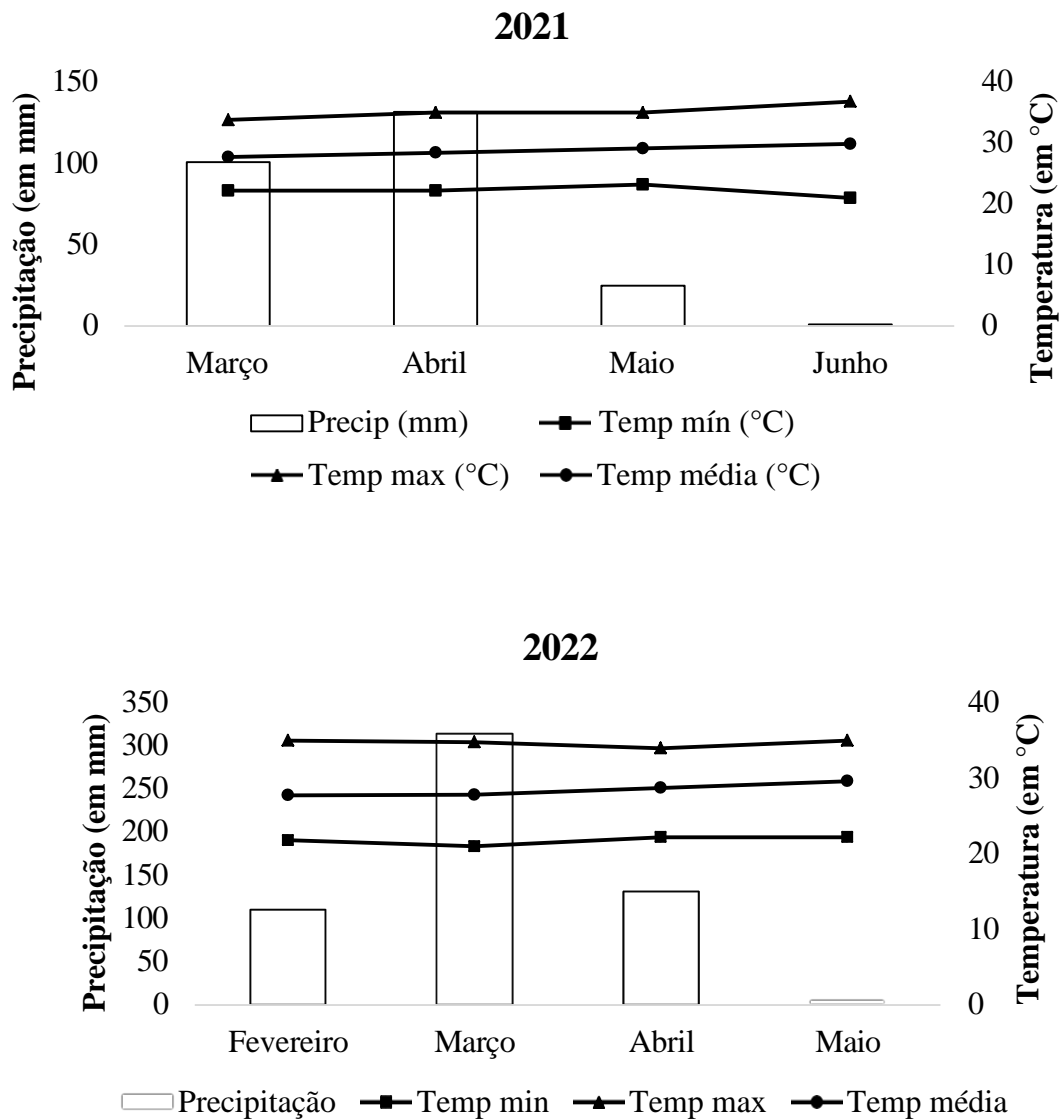


Figura 2. Médias mensais de precipitação pluvial, no local estudado durante a realização dos dois experimentos, nos anos agrícolas de 2021/2022 e 2022/2023.
Fonte: INMET (2022).

2.2 Delineamento experimental

Os ensaios foram dispostos em delineamento experimental de blocos casualizados, com três repetições e dez tratamentos (Tabela 1), o que correspondeu a dez cultivares de sorgo de diferentes aptidões agrônômicas.

Tabela 1. Código, espécies, aptidão agronômica e mantenedor das cultivares de sorgo avaliadas.

Código	Cultivar	Nome científico	Aptidão¹	Mantenedor
G1	SUDAN 4202	<i>Sorghum sudanense</i> (Piper) Stapf	BIO/FOR	IPA
G2	AGRI 001-E	<i>Sorghum bicolor</i> (L.) Moench	BIO	TROPIGENE
G3	AGRI 002-E	<i>Sorghum bicolor</i> (L.) Moench	BIO/FOR	TROPIGENE
G4	BRS 658	<i>Sorghum bicolor</i> (L.) Moench	FOR	EMBRAPA
G5	BRS 810	<i>Sorghum bicolor</i> (L.) Moench x	FOR	EMBRAPA
G6	Ponta negra	<i>Sorghum bicolor</i> (L.) Moench	FOR	EMBRAPA/EMPAR N
G7	BRS 373	<i>Sorghum bicolor</i> (L.) Moench	GRAN	EMBRAPA
G8	BRS 509	<i>Sorghum bicolor</i> (L.) Moench	SAC	EMBRAPA
G9	BRS 506	<i>Sorghum</i> spp	SAC	EMBRAPA
G10	IPA467-4-2	<i>Sorghum</i> spp.	SAC	IPA

¹BIO-biomassa, FOR-forrageiro, GRAN- granífero, SAC- sacarino;

Cada parcela experimental foi constituída por 5 linhas com 5 metros de comprimento, espaçadas a 0,80 m. As duas linhas laterais de cada parcela, assim como 1,0 metro das linhas centrais, foram utilizadas como bordadura. A área útil colhida totalizou 2.4 m².

Com base nos resultados da análise de solo da área experimental (Tabela 2), e para a correção do solo, foram aplicadas 6,0 toneladas ha⁻¹ de calcário calcítico com 97% de PRNT. Este calcário foi incorporado ao solo a 20 cm de profundidade por meio de aração.

Tabela 2. Atributos químicos do solo da área experimental nos locais estudados antes da instalação do experimento, durante o ano agrícola 2021/2022.

Ph	M.O	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	CTC total	V
em CaCl ₂	g/dm ³	mg/dm ³	-----cmol/dm ³ -----							%
3,70	9,92	2,70	0,07	0,51	0,03	0,56	3,64	0,61	4,25	14,30

Para o controle da vegetação espontânea, em pré-plantio, foi aplicado o herbicida com princípio ativo glifosato, com dose de 5 litros ha⁻¹ do produto comercial. Quinze dias após essa aplicação, foi realizada a demarcação da área experimental.

Na semeadura, adotou-se o sistema de plantio direto, onde as linhas de semeadura foram abertas manualmente. A adubação de plantio e de cobertura, bem como os demais tratamentos culturais, seguiram a recomendação para a cultura do sorgo (Borém et al., 2014).

Uma semana após a realização da semeadura, foi realizado o desbaste das plantas excedentes, de modo a ajustar à densidade de plantas nas linhas com a densidade recomendada para cada cultivar, além do procedimento de capina manual para a retirada

da vegetação espontânea persistente.

2.3 Características avaliadas

No final do experimento (na fase de maturidade fisiológica do grão, variando de 68 dias até cerca de 104 após a semeadura), as características como a altura da planta (ALT), o número de folhas em cada planta (NF), o diâmetro do colmo (DC), o índice SPAD, a área foliar (AF) das plantas, foram avaliadas em quatro plantas previamente demarcadas por cultivar, a produção de massa verde total da planta (MF), e massa seca (MS) foram avaliadas. A ALT foi determinada com auxílio de uma régua graduada a partir do nível do solo até a inserção da inflorescência, o NF foi avaliado por uma simples contagem, o DC foi avaliado por meio de paquímetro digital com precisão de 0,01 milímetros (MTX-316119, China), e o índice relativo de clorofila na folha (SPAD) foi mensurado por meio do *Portable Chlorophyll Meter* (SPAD-502, Minolta, Japão). Na avaliação do índice SPAD, foi utilizado o terço médio de cada folha, e foi evitado as bordas foliares e a região da nervura central nas quatro plantas de cada parcela utilizadas. Nesta avaliação do índice SPAD, foram utilizadas duas folhas localizadas no meio e no topo do dossel de cada planta. A área foliar foi obtida utilizando o método não destrutivo, por meio da equação: área foliar (AF) (cm²) = comprimento (cm) × largura (cm) × 0,75, segundo a metodologia proposta por Hassan et al. (2010). Para tanto, o comprimento e a largura de folha foram avaliados em uma folha do terço médio da planta, nas quatro plantas por parcela, com auxílio de uma trena. A MF foi determinada em kg parcela⁻¹, por meio da pesagem de todas as plantas (colmos + folhas + panículas) de cada parcela, colhidas na maturidade fisiológica do grão (de acordo com cada cultivar). A produção de massa seca (MS) foi determinada após a secagem da biomassa (colmos + folhas + panículas) em estufa de aeração forçada a 65 °C por 72 horas. Os dados de MS foram convertidos para t ha⁻¹.

Foi quantificado o número de dias para florescimento (DFL), sendo que esta variável foi determinada por meio do número de dias da semeadura até o início da liberação do pólen em 50% das plantas da parcela. Esta variável DFL foi obtida a partir do número de dias da emergência até a maturação (estádio R8). A variável ciclo final (CICLO) foi medido na contagem de dias desde o dia da semeadura, até as plantas atingirem o estágio fenológico de grão pastoso. A variável Estande Final (STD) foi obtida por meio da contagem de todas as plantas presentes na parcela no momento da colheita.

Após as plantas atingirem o estágio fenológico de grão pastoso (de acordo com cada cultivar), foi realizada a colheita dos colmos das cultivares, e, na parte mediana da planta, foi avaliado o teor de sólidos solúveis totais (BRIX), por meio do índice °Brix. Para tanto, foi utilizado o refratômetro digital portátil da marca Quimis®, São Paulo, Brasil.

2.4 Análises estatísticas

Os dados obtidos de todas as variáveis foram submetidos à análise de variância conjunta, considerando simultaneamente as duas safras.

$$Y_{ijk} = \mu + G_i + A_j + GA_{ji} + B_k + E_{ijk}$$

em que: Y_{ijk} = observação feita na parcela do i -ésimo genótipo no j -ésimo ambiente dentro do k -ésimo bloco.; μ = média geral; G_i = efeito do i -ésimo genótipo; A_j = efeito do j -ésimo bloco; GA_{ji} é o efeito de interação do i -ésimo genótipo com o j -ésimo ambiente; B_k = efeito do k -ésimo bloco; E_{ijk} = efeito dos fatores não controlados na parcela que recebeu o i -ésimo genótipo no j -ésimo ambiente dentro do k -ésimo bloco.

A matriz de correlação genotípica foi obtida entre os caracteres para as variáveis que apresentaram diferença significativa entre variedades ou que o efeito da interação entre variedades e safras também tenham sido significativo. Essa matriz foi determinada a partir da análise de variância dos dados originais, utilizando-se o estimador do coeficiente de correlação de Pearson (Cruz,2006).

$$r_g = \frac{PMG_{xy} - PMR_{xy}}{\sqrt{\sigma_g(x)\sigma_g(y)}} = \frac{\sigma_g(xy)}{\sqrt{\sigma_g(x)\sigma_g(y)}}$$

$$\sigma_{g(x)} = \frac{QMG_x - QMR_x}{r}$$

$$\sigma_{g(y)} = \frac{QMG_y - QMG_x}{r}$$

Em que: r_g : estimador da correlação genotípica; PMG_{xy} : produto médio entre os genótipos para os caracteres X e Y; QMG_x : quadrado médio entre os genótipos para o caráter X; QMG_y : quadrado médio entre os genótipos para o caráter Y; $\sigma_g(XY)$: estimador da covariância genotípica; $\sigma_g(X)$ e $\sigma_g(Y)$: estimadores dos componentes quadráticos associados a variabilidade genotípica para os caracteres X e Y, respectivamente.

As matrizes de correlação foram analisadas criando-se redes de correlação ponderadas, nas quais, as conexões entre variáveis são determinadas pela “adjacência matriz”, com a função:

$$h(h_{rij}) = \frac{1}{2} \{sgn(|r_{ij}| - p) + 1\}$$

em que: p é o parâmetro “*hard threshold*”, que foi definido como nulo, para que todas as conexões entre variáveis possam ser vistas.

O algoritmo de Fruchterman-Reingold (Fruchterman; Reingold, 1991) foi usado para criar um *layout*, no qual a proximidade entre os nós (traços) é proporcional ao valor absoluto de correlação entre esses nós. Assim como as correlações negativas, as correlações positivas são coloridas.

A rede de correlações foi utilizada como um filtro para a escolha das variáveis a serem empregadas na análise de trilha. As variáveis que não se agruparem com as variáveis adotadas como principal na análise de trilha foram descartadas.

Após a identificação das variáveis a serem submetidas à análise de trilha, e antes da realização dessa última, a matriz de correlações genéticas dessas variáveis passaram pelo diagnóstico de multicolinearidade. A presença de multicolinearidade foi verificada pela análise dos autovalores da matriz $X'X$, em que o grau de multicolinearidade foi estabelecido com base no número de condição (NC). Essa variável é a razão entre o maior e o menor autovalor da matriz. Depois de constatado o grau de multicolinearidade, a análise de trilha foi realizada utilizando técnica de análise de regressão em crista ou em cumeeira (Carvalho, 1995).

Todas as análises estatísticas utilizadas neste trabalho foram realizadas no programa GENES (Cruz, 2011).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise de variância teve efeito significativo para a interação entre as cultivares e as safras para todas as variáveis estudadas (Tabela 3).. Com objetivo de analisar melhor o efeito da interação, efetuou-se a decomposição em parte simples.

Segundo Cruz et al. (2004), a interação entre genótipos e ambientes está associada a dois fatores, sendo o primeiro, denominado simples, e é proporcionado pela diferença entre genótipos. O segundo, denominado complexo, é determinado por meio da ausência de correlações entre os genótipos. Consideramos que uma interação é de natureza simples, quando a decomposição da interação genótipos e ambientes for superior a 50%, portanto em exceção da variável BRIX, todas as demais variáveis apresentaram predominância de interação simples, o que demonstra a existência de variabilidade genética entre as cultivares, a qual está presente dentro da variância de interação Cultivar x Safra.

Os valores da variável CV relacionados às variáveis altura, diâmetro do colmo, massa fresca, massa seca, área foliar, CICLO, DFL, número de folhas, STD e índice SPAD (SPAD) ficaram dentro dos limites relatados na literatura (Lessa et al., 2019; Silva et al., 2022; Martins, 2019). Assim, a precisão experimental pode ser considerada elevada. Nos trabalhos relatados por Oliveira et al. (2022) e Cruz et al. (2021), e para a variável BRIX, os valores de CV foram baixos, não correspondendo com o CV obtido neste presente trabalho, o qual foi de 21,90. Como foi relatado por França et al. (2020), as variações nesses caracteres podem estar relacionadas aos efeitos dos fatores abióticos, principalmente a uma possível limitação hídrica pontual durante o período experimental, uma vez que o experimento não foi irrigado, e foi dependente da precipitação pluviométrica, aliado com a variabilidade existente entre os materiais avaliados.

Tabela 3. Resumo da análise de variância conjunta de variáveis produtivas de 10 genótipos de sorgo em Balsas-MA nos anos agrícolas de 2021 e 2022

Fonte de variação	Quadrado médio											
	-----ALT(Altura)-----	---NF(Número de folhas)---	--DC(Diâmetro do colmo)-----	AF(area foliar)-----	-----MF(Massa Fresca)-----	-----MS(Massa Seca)-----	----DFL(Dias para a floração)-----	--CICLO-----	---STD(STAND)---	-----BRIX-----	-----SPAD-----	
Blocos/Safra	0,196	2,401	7,365	9614,724	135,277	25,378	40,033	8,633	47,098	4,016	3,863	
Cultivar	1,325 ns	9,495 ns	48,072 ns	32634,179 ns	209,826 ns	44,505 ns	748,118 **	626,740 **	1413,632 ns	63,872 ns	35,474 ns	
Safra	22,392 **	144,926 **	459,847 **	221612,1 **	916,569 ns	403,087 *	540 *	0,6 ns	5668,567 **	10,416 ns	8296,388 **	
Cultivar x Safra	0,814 **	4,324 **	20,872 **	17189,126 **	110,455 **	23,782 **	20,259 *	36,081 **	779,333 **	22,944 **	43,224 **	
Resíduo	0,046	0,770	2,906	4900,084	23,311	4,986	8,144	4,855	220,828	6,197	7,843	
Total	44,121	306,636	1214,447	884883,77	5179,441	1298,724	7908,733	6175,333	33543,487	1030,933	9302,502	
Média	1,717	9,154	16,843	416,169	21,462	8,944	69,566	86,666	67,488	11,366	41,162	
CV(%)	12,579	9,587	10,121	16,820	22,495	24,967	4,102	2,542	22,019	21,901	6,803	

* e ** significativos aos níveis de 5% e 1% de probabilidade, respectivamente; CV = Coeficiente de variação; NS= Não significativo

A partir da matriz de correlação genotípica envolvendo todas as variáveis analisadas, obteve-se uma rede de correlações. Na Cada linha contém um peso indicando a força da correlação. Quanto mais forte a correlação entre duas variáveis, mais espessa é a linha que as conecta na malha da rede. Uma forma de representação da malha é a disposição dos nós, de modo que, o comprimento das linhas depende da intensidade das correlações, de maneira que, as linhas mais curtas indicam correlações mais fortes, mostrando assim, como as variáveis se agrupam (Epskamp et al., 2012).

Rede de Similaridade

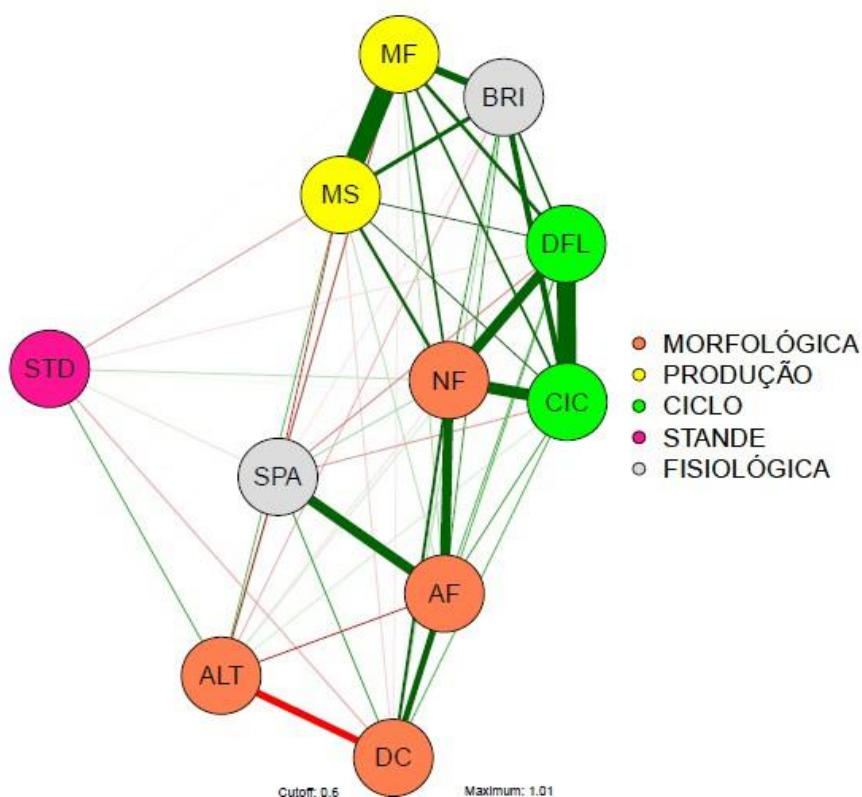


Figura 3: Rede de correlação genotípica de características de sorgo (*Sorghum bicolor*). As linhas vermelhas e verdes representam correlações negativas e positivas, respectivamente. A largura da linha é proporcional à força da correlação. As linhas em destaque apresentam correlação em módulo maior que 0,6. Variáveis: STD: Número de plantas por parcela útil, ALT: Altura de planta(m), NF: Número de folhas, DC: Diâmetro do colmo (mm), AF: Área foliar (m²), MF: Massa fresca de planta, MS: Massa seca de planta, DFL: Dias para a floração, CIC: Ciclo total da planta, SPA: Índice de clorofila, BRI: Sólidos solúveis totais (BRI)

Uma das utilidades da análise de rede de correlações é analisar a formação de agrupamentos de variáveis, onde dentro de um mesmo grupo, há variáveis com correlações de elevadas magnitudes com todas as demais variáveis do grupo, ou

variáveis que apresentam correlações fortes apenas com algumas, não apresentando relação direta, aparente, com as demais variáveis, estando no mesmo grupo por influência de outras variáveis.

Tal peculiaridade da análise de rede de correlações abre a possibilidade de se utilizar a técnica como um filtro para selecionar variáveis a serem adicionadas na análise de trilha, em que são descartadas as variáveis que não são alocadas em nenhum grupo. Na rede de correlações genotípicas, apresentada na Figura 3, é visualmente perceptível o agrupamento de algumas variáveis correlacionadas. A variável número de plantas na parcela útil (STD) não está presente em nenhum desses grupos, sendo assim, esta variável foi retirada da análise de trilha.

Como informado na análise de trilha (Vencovsky e Barriga, 1992), apesar da formação de grupos de variáveis correlacionadas, uma alta correlação não implica em uma relação de causa e efeito entre as variáveis. Esta análise tem a capacidade de particionar o coeficiente de correlação e quantificar as relações diretas e indiretas de todas as variáveis envolvidas na resposta, uma a uma. Tal fato proporciona maior confiabilidade na escolha de características relevantes para a seleção (Gonçalvez et al., 2017).

A análise de trilha, análise de trajetória ou também denominada de análise de caminhamento, foi usada para determinar os efeitos diretos e indiretos do BRIX (BRI) e do índice SPAD (SPA) sobre algumas variáveis agrônômicas da cultura do sorgo.

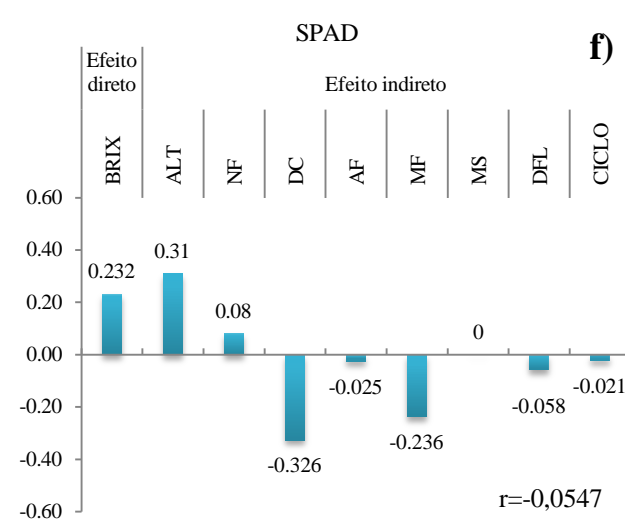
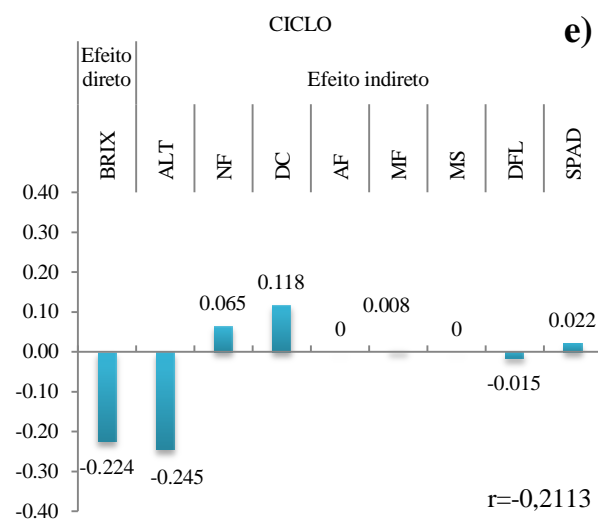
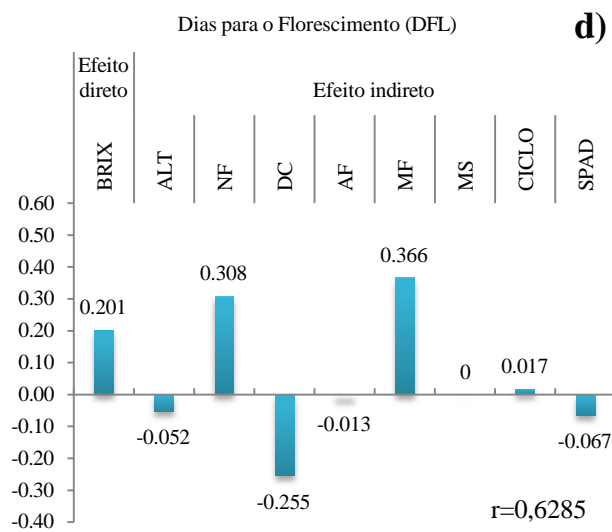
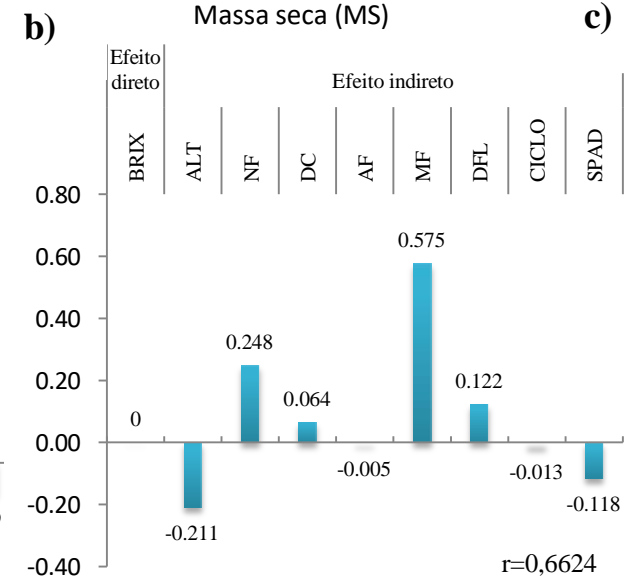
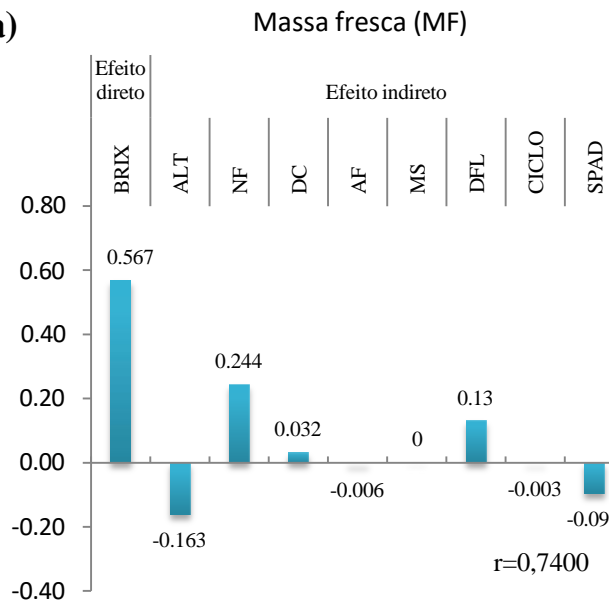
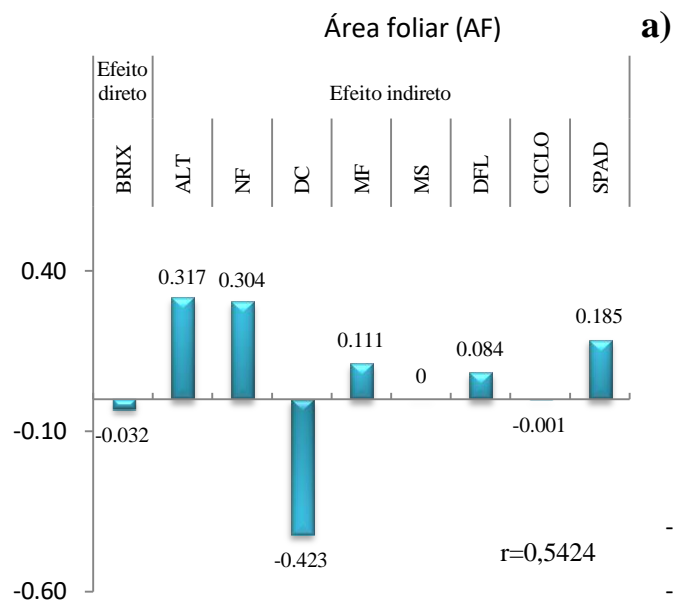
Todavia, anteriormente à análise de trilha, foi avaliada a multicolinearidade pelo número de condição das matrizes de correlações genotípicas. Para tanto, observou-se uma multicolinearidade severa. Dessa forma, para a estimação dos coeficientes do modelo, foi utilizada a regressão em crista (Hoerl e Kennard, 1970), e assim, contornar os efeitos da multicolinearidade.

Na figura 4, são mostrados os resultados da análise de trilha, tendo como variável principal, a variável BRIX. O coeficiente de determinação (R^2) da análise de trilha foi equivalente a 75,6 e o reduzido efeito da variável residual (0,493) mostraram que o modelo adotado expressou a relação causa efeito das variáveis explicativas sobre a variável alvo sólidos solúveis (BRIX).

Para fins de melhoramento, é importante identificar dentre as características de alta correlação com a variável básica, aquelas de maior efeito direto em sentido

favorável à seleção, de tal forma que a resposta correlacionada por meio da seleção indireta seja eficiente (Severino et al., 2002), além disso, segundo Dotto Blind et al. (2018), as estimativas de efeitos diretos e indiretos acima do efeito residual devem ser consideradas as de maior relevância.

A análise de trilha foi realizada considerando a variável BRIX (°Brix) como variável básica (dependente principal), em associação aos caracteres ALT, NF, DC, AF, MF, MS, DFL, CICLO, e SPAD, sendo estas respectivas variáveis são consideradas independentes ou explicativas (Figura 4).



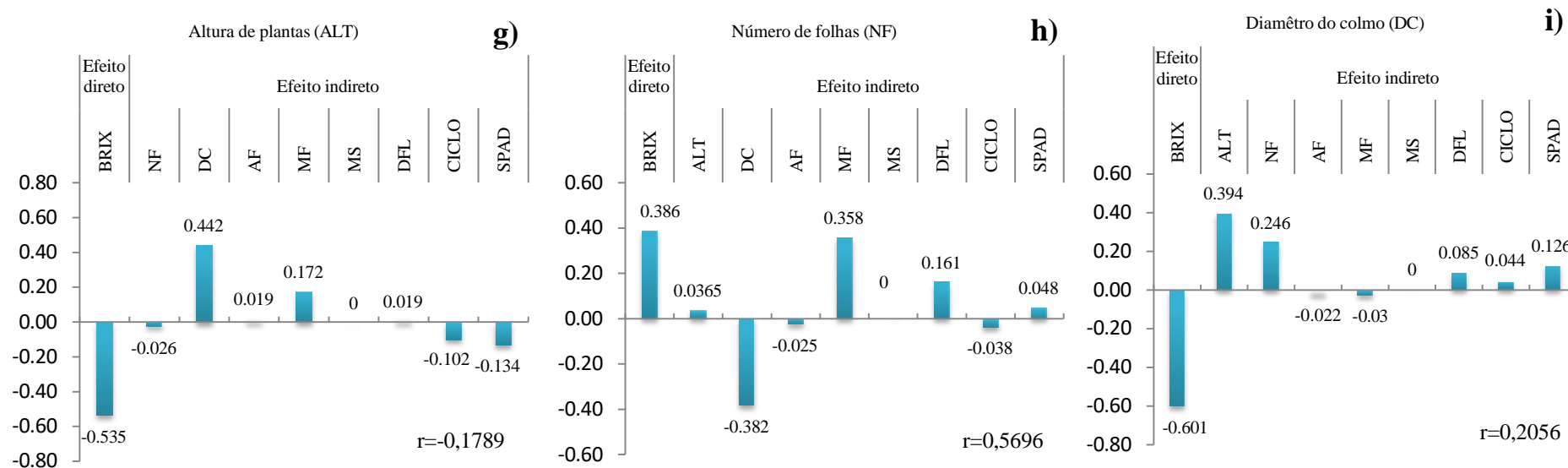


Figura 4. Gráfico de análise de trilha com a variável principal BRIX sobre as variáveis básicas ou explicativas: Área Foliar (AF), Massa Fresca (MF), Massa Seca (MS), Dias para o Florescimento (DFL), STD, SPAD, Altura da Planta (ALT), Número de Folhas (NF), Diâmetro do Colmo (DC), obtidas pelo método baseado na regressão em crista ($k=0,062$).

Nesse sentido, a massa fresca foi a variável que mais influenciou o BRIX, com correlação positiva de elevada magnitude (0,74), e efeito direto (0,567) superior ao efeito residual (0,493) (Figura 4b). Por outro lado, a variável massa seca não mostrou influência sobre o BRIX, demonstrando que a seleção de genótipos de maior concentração de sólidos solúveis (BRIX) resultará em matérias com maior quantidade de água nos tecidos, mas não implicará no incremento da massa seca.

Segundo Teetor et al. (2011), em cultivares de sorgo sacarino, os principais componentes de produção de etanol são a massa fresca, os sólidos solúveis e a massa do caldo, sendo que tais características podem ser correlacionadas. A alta produção de biomassa influenciou diretamente no BRIX e é muito vantajosa, pois colmos com açúcares fermentáveis e bagaço podem ser utilizado para forragem, coogeração de energia elétrica e produção de etanol de segunda geração.

Apesar da correlação de baixa magnitude, a altura de plantas foi a segunda variável com maior influência sobre o BRIX. Este fato foi devido ao efeito direto (-0,535), cuja magnitude em módulo é superior ao efeito residual. Tal fato, indica que a seleção de genótipos de sorgo com elevado teor de sólidos solúveis (BRIX) contribuirá na obtenção de plantas de menor altura. Todavia, nesse caso, deve-se aplicar um esquema de seleção restrito, a fim de se eliminar o efeito indireto positivo do diâmetro do colmo (DC). DC foi a variável que mais contribuiu de maneira indireta para a redução da magnitude da correlação entre o BRIX e a altura de plantas.

Por sua vez, o diâmetro do colmo teve efeito direto negativo (Figura 4i), e correlação positiva de baixa magnitude com o BRIX. Segundo Cruz et al. (2004), esse fenômeno indica a ausência de relações de causa e efeito entre as duas variáveis, o que sugere que, ao menos para o conjunto gênico estudado, a seleção direta baseada na concentração de sólidos solúveis, BRIX, não implicará em alterações nas médias de diâmetro do colmo das plantas de sorgo.

O diâmetro do colmo também foi responsável por efeitos indiretos elevados com área foliar (-0,423) (Figura 4a), SPAD (-0,326) (Figura 4f), número de folhas (-0,382) (Figura 4g) e altura (0,442) (Figura 4h). Tais resultados podem ser justificados, considerando que fatores primordiais ao crescimento/desenvolvimento das plantas, tais como luz solar, água e nutrientes minerais, podem ser reduzidos ou estarem ausentes, devido a competição entre plantas de sorgo e plantas daninha. Esta limitação nutricional pode afetar negativamente o acúmulo de reservas nos colmos e conseqüentemente o

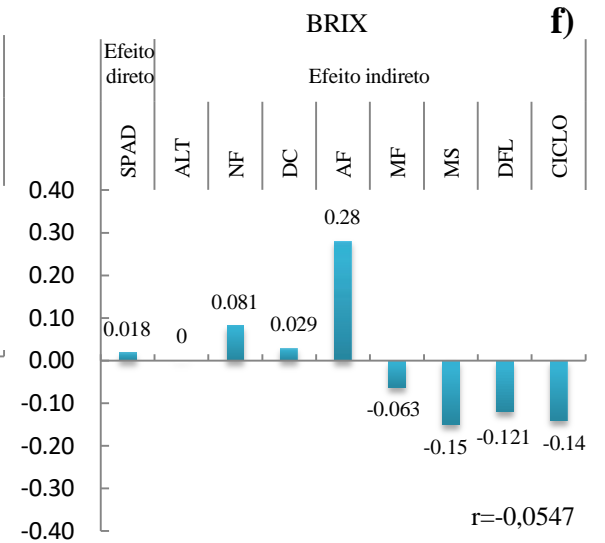
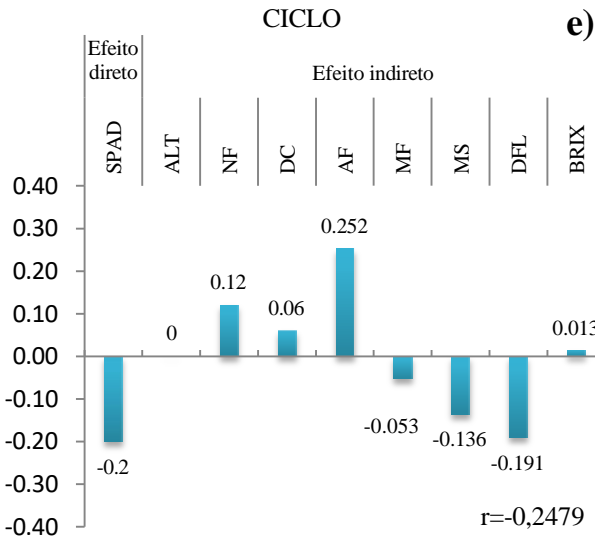
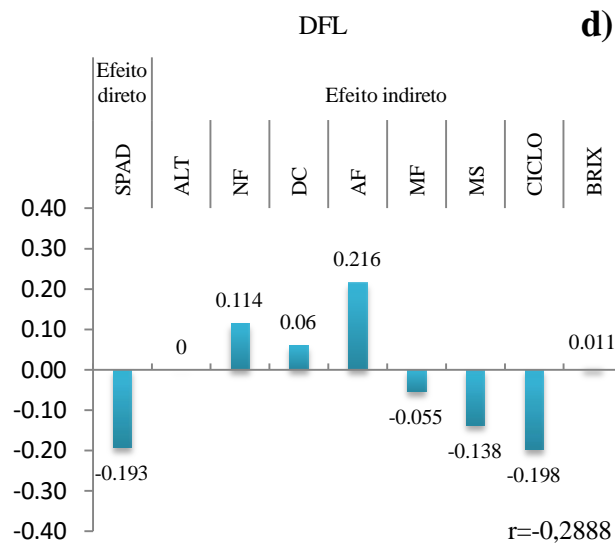
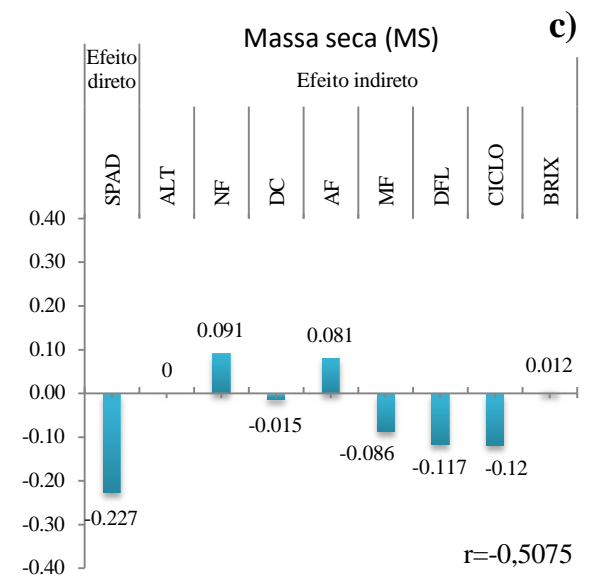
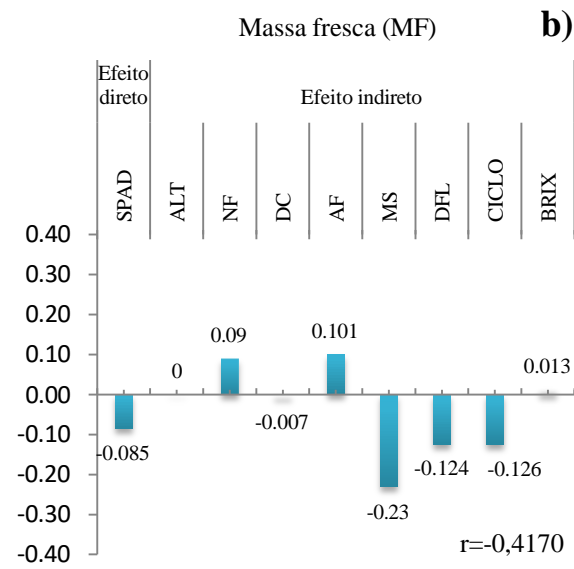
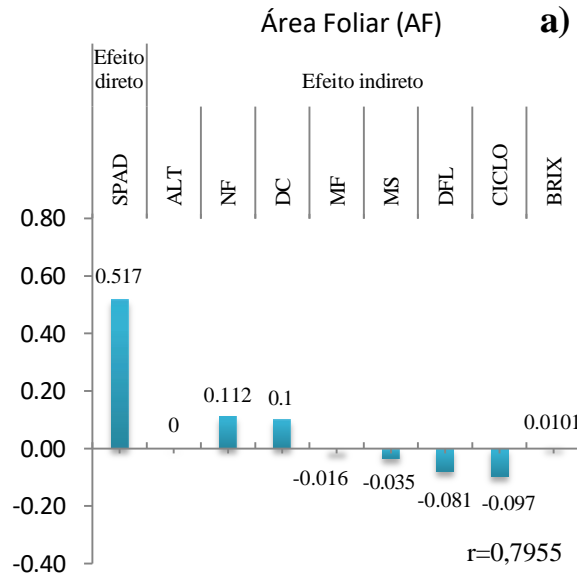
diâmetro médio destas estruturas das plantas (Kappes et al., 2011; Hanauer et al., 2014; Taiz et al., 2017).

Apesar das variáveis como a área foliar, massa seca e dias para o florescimento terem apresentado correlações elevadas e positivas, apenas a massa fresca e a altura de plantas apresentaram relação de causa e efeito com o BRIX. Este resultado pode mostrar como o estudo de correlações pode não ser correto, o que demonstra a importância de se realizar o desdobramento das correlações em efeitos diretos e indiretos.

De modo geral, pode-se inferir que as características estudadas como ALT, NF, DC, MF, MS, DFL, CICLO e SPAD diferiram em grau de influência direta sobre o teor de sólidos solúveis (açúcares) no colmo. Dentre estas características, a MF, DC, ALT e NF foram eficientes no aumento da produção de sólidos solúveis, o que indica a presença de causa e efeito. Neste caso, a melhor estratégia seria a seleção simultânea destes caracteres, enfatizando-se as características cujos efeitos diretos são maiores.

Por meio da correlação e análise de trilha, verificou-se que, em genótipos de sorgo, a seleção baseada no aumento da concentração de açúcares no colmo poderá acarretar com maior produção de massa fresca, e maior número de folhas, porém, com uma menor altura e diâmetro de colmo.

A análise de trilha também foi utilizada para determinar os efeitos diretos e indiretos considerando o índice SPAD como variável básica ou principal, com os caracteres altura da planta, número de folhas, diâmetro do colmo, área foliar, massa fresca, massa seca, número de dias para o florescimento, CICLO, BRIX (Figura 5). Para essa análise, o coeficiente de determinação (R^2) foi equivalente a 77,4, enquanto o efeito residual foi de 0,493, o que pode mostrar que o modelo adotado expressou a relação causa efeito das variáveis explicativas sobre a variável alvo índice SPAD.



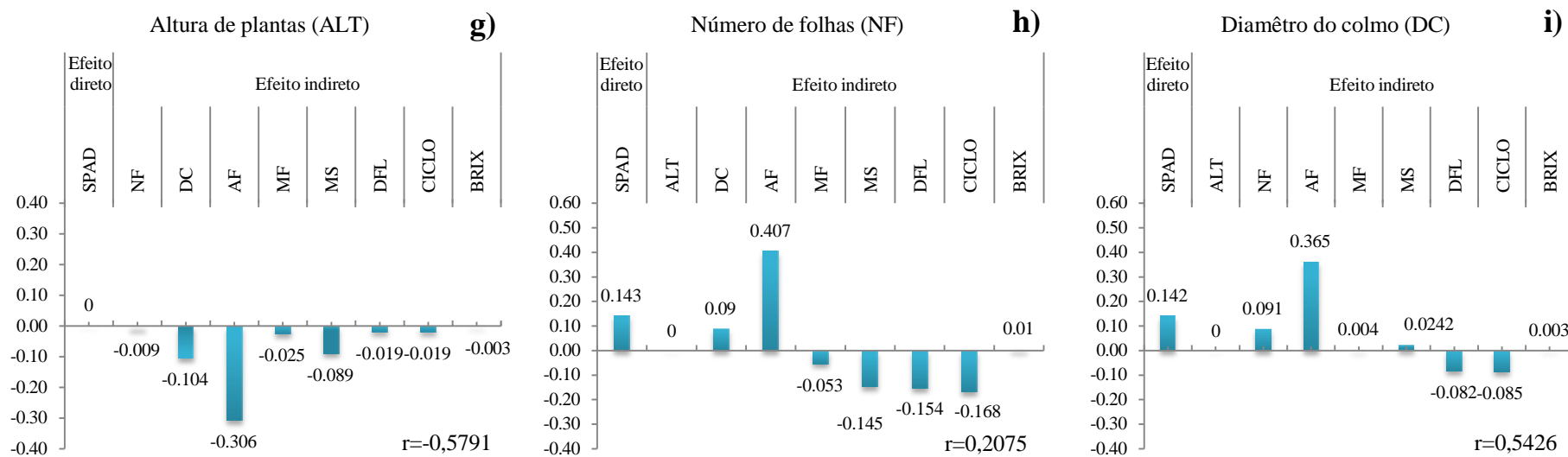


Figura 5. Gráfico de análise de trilha com a variável principal SPAD sobre as variáveis básicas ou explicativas: Área Foliar (AF), Massa Fresca (MF), Massa Seca (MS), Dias para o Florescimento (DFL), CICLO, BRIX (BRI), Altura da Planta (ALT), Número de Folhas (NF), Diâmetro do Colmo (DC)., obtidas pelo método baseado na regressão em crista ($k=0,551$)

Dentre todas as variáveis analisadas, a área foliar foi a única que exerceu efeito direto (0,517) sobre a principal, índice SPAD, com magnitude superior ao efeito residual. Desta maneira, os genótipos com maior área foliar tendem a ter maior concentração de clorofilas, as quais são estimados indiretamente pelo índice SPAD (Torres-Netto et al., 2002, Torre-Netto et al., 2005; Castro et al., 2011; Castro et al., 2014). Tais resultados corroboram com Busato et al. (2010), os quais relataram que a área foliar é uma característica importante na avaliação da eficiência fotossintética, crescimento, no metabolismo da planta, na produção final, e na qualidade e maturação das culturas. A área foliar também contribuiu indiretamente de forma relevante na formação do resultado da análise de trilha na maioria das variáveis avaliadas nesta pesquisa, entre elas a altura da planta (-0,306), o diâmetro do colmo (0,365), o STAND (0,252), o número de folhas (0,407), os dias para o florescimento (0,216) e BRIX (0,28). Estes dados podem mostrar a relevância do índice SPAD em estudos relacionados ao fitomelhoramento do sorgo.

Os demais caracteres estudados apresentaram efeitos diretos abaixo do efeito residual, o que demonstra que são pouco influenciados pelo índice SPAD. Assim, estes caracteres não serão ou serão pouco influenciados caso a população de estudo seja submetida à seleção direta para o índice SPAD. Torna-se necessário ressaltar que, de maneira geral, na região onde o trabalho foi realizado, são escassos os estudos da cultura do sorgo buscando elucidar as relações entre variáveis

Dessa forma, neste trabalho, não se pretende enfatizar a dificuldade em se mensurar os componentes de produção do sorgo, mas, sim, propor uma maior compreensão de como os componentes de produção influenciam, de forma direta, ou indiretamente, a si, as variáveis de fácil mensuração com o BRIX e o índice SPAD, Tal estudo pode auxiliar na escolha de variáveis que poderão ser selecionadas, a fim de se maximizar o ganho genético com a seleção, ou que poderão auxiliar na compreensão de processos ecofisiológicos da espécie.

4. CONCLUSÃO

As variáveis massa fresca, o diâmetro do colmo, a altura da planta e o número de folhas tiveram influencia de alta magnitude sobre os sólidos solúveis (BRIX). Sendo assim, estas variáveis podem ser usadas em programas de melhoramento para a seleção de cultivares mais produtivas.

A variável área foliar (AF) foi a única variável a ter influencia de grande magnitude sobre a variável principal SPAD, o que mostra a associação entre essas características, e assim o índice SPAD pode ser utilizado como um caractere de seleção para a produção de biomassa fresca do sorgo na região maranhense.

A análise de trilha mostrou ser uma ferramenta eficiente na seleção de características produtivas de cultivares sorgo associadas ao índice de clorofila e aos teores de açúcares não estruturais no colmo.

REFERÊNCIAS

Bhat, B. V. Breeding forage sorghum. Breeding Sorghum for Divers e End Uses, **Hyderabad**, India. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101879-8.00011-5>,2019.

Blind, Ariel Dotto et al. Estimativa de parâmetros genéticos, análise de trilha e seleção em bucha vegetal para caracteres agrônômicos. **Embrapa Florestas-Artigo em periódico indexado (ALICE)**.35310615965. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i6.15965>, 2018

Blum A. Improving wheat grain filling under stress by stem reserve mobilization. **Euphytica**.100:77–83,1998.

Blum A, Sinmena B, Mayer J et al. Stem reserve mobilisation supports wheat grain filling under heat stress. **Aust J Plant Physiol**. 21:771–781,1994.

BORÉM, A.; PIMENTEL, L.; PARRELLA, R. **Sorgo: do plantio à colheita**. Editora. UFV, 275 p, 2014.

Boyer JS. Photosynthesis at low potentials. **Philos Trans R Soc Lond Ser B**. 273:501–511,1976.

Busato, C., Fontes, P. C. R., Braun, H et al. Estimativa da área foliar da batateira, cultivar Atlantic, utilizando dimensões lineares. **Revista Ciência Agrônômica**,<https://doi.org/10.1590/S1806-66902010000400026>, 2010.

Carvalho, S.P. de. **Métodos alternativos de estimação de coeficientes de trilha e índices de seleção, sob multicolinearidade**. Viçosa: UFV, 1995. 163p.

CARVALHO, A. A.; MONTENEGRO A. A. A.; TABOSA J. N. et al. Reúso hidroagrícola: uma solução para convivência com a escassez hídrica no Sertão e Agreste pernambucano. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 5, n. 2, p. 140-150, 2020. DOI:10.24221/jeap.5.2.2020.2841.140-150.

Castro, FA; Campostrini, E.; Netto, AT; Viana, LH. Relationship between photochemical efficiency (JIP-test parameters) and portable chlorophyll meter readings in papaya plants. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, 23: 295-304.2011.

Castro, F.A., Campostrini, E., Netto, A.T et al. Portable chlorophyll meter (PCM-502) values are related to total chlorophyll concentration and photosynthetic capacity in papaya (*Carica papaya* L.). *Theor. Exp. Plant Physiol*. 26, 201–210. <https://doi.org/10.1007/s40626-014-0018-y>. 2014.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos**, Brasília, DF, v. 10, safra 2022/23, n. 2 segundo levantamento, novembro 2022.

Cruz, C. D., & Regazzi, A. J. Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético. **UFV**,1994.

Cruz, C. D.; Regazzi, A. J. Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético. 3. ed. Viçosa: **UFV**, 2004. 480p.

Cruz, C. D. **Programa Genes – Aplicativo computacional na área de Genética e estatística experimental.** Disponível em: <http://arquivo.ufv.br/dbg/genes/genes_Br.htm>. Acesso em: 20 jul. 2022.

Cruz, I.F, R.; Silva, F.V.; Alves Pinto et al. PRODUÇÃO DE SORGO SACARINO BRS 506 EM FUNÇÃO DO MANEJO DA ADUBAÇÃO: ÉPOCA DE CORTE PARA COLHEITA E IRRIGAÇÃO. **AGRI-ENVIRONMENTAL SCIENCES**, 7(1), 10. <https://doi.org/10.36725/agries.v7i1.5138>,2021.

Elias, D. Globalização, agricultura e urbanização no Brasil. **Acta Geográfica**, Boa Vista, Ed. Especial Geografia Agrária, 2013. p.13-32. Disponível em: <https://revista.ufr.br/actageo/article/view/1937>

EMBRAPA - SORGO: **O produtor pergunta, a Embrapa responde** / Israel Alexandre Pereira Filho, José Avelino Santos Rodrigues, editores técnicos. – Embrapa, p.327,2015.

Epskamp, S.; Cramer, A. O. J.; Waldorp, L. J. et al. Qgraph: network visualizations of relationships in psychometric data. **Journal of Statistical Software**, v.48, p.1-18, 2012.

Farias, A.A. et al. Produtividade do sorgo granífero adubado com esterco e biofertilizante bovino. Engenharia Ambiental: **Pesquisa e Tecnologia** : 127-137. 2011.

França, M.V.; Medeiros, R.M. Aptidão climática do sorgo como suporte alimentar a avicultura de São Bento Una-Pernambuco, Brasil. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**: 275-283. <https://doi.org/10.20873/jbb.uft.cemaf.v8n4.franca,2020>.

Fruchterman, T. M.; Reingold, E. M. Graph drawing by force-directed placement. Software: **Practice and experience**, v. 21, n. 11, p. 1129–1164, 1991.

Grafts-Brander SJ, Salvucci ME. Sensitivity of photosynthesis in a C4 plant, maize, to heat stress. **Plant Physiology**, 129:1773-1780,2002.

Godoy, L. J. G.; Santos, T. S.; Villas Boas, R. L. et al. Índice relativo de clorofila e o estado nutricional em nitrogênio durante o ciclo do cafeeiro fertirrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 217-226, 2008.

Gonçalves, D.D.L.; Barelli, M.A.A.; Oliveira, T.C. D. et al. Genetic correlation and path analysis of common bean collected from Caceres Mato Grosso State, Brazil. **Ciência Rural**,47(8): 1-7, 2017.

Hassan, M.; Christopher, B. S. T.; Ghizan, S. et al. Non-destructive estimation of maize leaf area, fresh weight, and dry weight using length and leaf width. **Communications in Biometry and Crop Science**, v.5, n.1, p.19-26, 2010.

Hartwig I, Carvalho FIF de; Oliveira AC de, Vieira EA; Silva JAG da, Bertan I. et al. Estimativa de coeficientes de correlação e trilha em gerações segregantes de trigo hexaplóide. **Bragantia** [Internet].<https://doi.org/10.1590/S0006-87052007000200004>, 2017.

Hoerl, A. E.; Kennard, R. W. Ridge regression: applications to nonorthogonal problems. **Technometrics**, Washington, v. 12, n. 1, p.69-82, 1970.

Hsiao TC. Plant responses to water stress. **Ann Rev Plant Physiol**, 24:519–532,1973.

Hunter, J. J.; Skrivan, R.; Ruffner, H. P. Diurnal and seasonal changes in leaves of *Vitis vinifera* L: CO₂ assimilation rates, sugar levels and sucrolytic enzyme activity. **Vitis, Sielbeldingen**, v. 33, n. 2, p. 189-195, 1994.

Jangpromma N.; Kitthaisong S.; Daduang S. et al. 18kDa Protein accumulation in sugarcane leaves under drought stress conditions. **KMITL Sci. Tech. J.** 7 No. S1,2015.

Jarvis, S.C.; SCHOLEFIELD, D.; PAIN, B.F. **Nitrogen Cycling in Grazing Systems**. In: BACON, P.E. (Ed.) Nitrogen Fertilization in the Environment. New York: Marcel Dekker Inc., . p. 381-419, 1995.

Kappes, Claudinei et al. **Desempenho de híbridos de milho em diferentes arranjos espaciais de plantas**. 2011. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/brag/a/QZPcbCDz6qtz4bL5dtKWFDy/?lang=pt&format=pdf>. Acesso em: 02 out. 2022.

KöLLN, Oriel Tiago. **Interação entre os estresses de nitrogênio e disponibilidade hídrica no fracionamento isotópico de ¹³C e na produtividade em soqueira de cana-de-açúcar**. 2012. Dissertação (Mestrado em Energia Nuclear na Agricultura e no Ambiente) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, University of São Paulo, Piracicaba, 2012. doi:10.11606/D.64.2012.tde-17102012-155909. Acesso em: 22 nov.2022

Landau, E. C.. **Dinâmica da produção agropecuária e da paisagem natural no Brasil nas últimas décadas**. Brasília, DF: Embrapa, Volume. 4 p.414,2015 Disponível em:<<http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/214957/1/LivroDinamicaAgropecB>R-Vol04.pdf>>. Acesso em: 14 de julho de 2022.

Lessa,C. I.; Nojosa, Á. C. N. D. O.; Magalhães,C.L. et al. ESTRESSE SALINO, COBERTURA MORTA E TURNO DE REGA NA CULTURA DO SORGO.**Rev. Bras. Agric. Irr.** Edição Especial - IV SBRNS, Set – Out, Fortaleza, p. 3637 - 3645, 2019

Machado, E. C. et al. Respostas da fotossíntese de três espécies de citros a fatores ambientais. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 40, p. 1161-1170, 2005.

MARANHÃO - GOVERNO DO ESTADO DO MARANHÃO. **Gerência de Planejamento e Desenvolvimento Econômico** - GEPLAN. Atlas do Maranhão. São Luís: Universidade Estadual do Maranhão, 39 p. 2002.

Marchão, Robélio Leandro et al. Sorgo granífero consorciado com capim-braquiária na safrinha: estratégia para o manejo de plantas daninhas na soja em sucessão. **Embrapa Cerrados-Circular Técnica (INFOTECA-E)**, 2021.

Oliveira, F. T. de; Oliveira, T. C. de; Santos, A. A. C. dos. et al. Productivity and stability of sweet sorghum in the municipality of Cáceres-MT. **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 11, n. 8, p. e5911830042, 2022. DOI: 10.33448/rsd-v11i8.30042. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/30042>. Acesso em: 25 oct. 2022.

Palliotti, A.; Cartechin, A. Developmental changes in gas exchange activity in flowers, berries and tendrils of fieldgrown Cabernet Sauvignon. **American Journal of Enology and Viticulture**, Davis, v. 54, n. 4, p. 317-323, 2001.

Passos, M. L. V.; Zambrzycki, G. C.; Pereira, R. S. Balanço hídrico climatológico e classificação climática para o município de Balsas - MA. **Revista Scientia Agraria**, v.18, n.1, p.83-89, 2017.

Queiroz, Valéria Aparecida Vieira. et al. **O Sorgo na alimentação humana**. Sete lagoas, MG: Embrapa milho e sorgo, (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA- milho e sorgo. Circular técnica, 133),2009.

Rezende, R. P.; Golin, H. O.; Abreu, V. L. da S. et al. Does intercropping maize with forage sorghum effect biomass yield, silage bromatological quality and economic viability? **Research,Society and Development**, 9(4), 46942818. DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v9i4.2818>, 2020.

Ribeiro, M. G.; Costa, K. A. P., Silva, A. G.; Severiano, E. C., Simon, G. A. et al. Grain sorghum intercropping with *Brachiaria brizantha* cultivars in two sowing systems as a double crop. **African Journal of Agricultural Research**, 10(39), 3759–3766. DOI:<https://doi.org/10.5897/AJAR2015.9705>, 2015.

Ribeiro, M. G.; Costa, K. A. P.; Souza, W. F. et al. Silage quality of sorghum and *Urochloa brizantha* cultivars monocropped or intercropped in different planting systems. **Acta Scientiarum. Animal Sciences**, 39(3), 243–250. DOI:<https://doi.org/10.4025/actascianimsci.v39i3.33455>,2017.

Rios, Sara de Almeida et al. Análise de trilha para carotenoides em milho. **Revista Ceres**. v. 59, n. 3, p. 368-373. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0034-737X2012000300011>. ISSN 2177-3491,2012.

Rocha, R. N. C.; Galvão, J. C. C.; Teixeira, P. C. et al. Relação do índice spad, determinado pelo clorofilômetro, com teor de nitrogênio na folha e rendimento de grãos em três genótipos de milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete lagoas, v. 4, p. 161- 171, 2005.

Roitsch, T.; Balibrea, M. E.; Hofmann, M. et al. Extracellular invertases: metabolic enzyme and metabolic protein. **Journal of Experimental Botany**, Lancaster, v. 54, n. 382, p. 513-524, 2003.

Rong-Hua, L.I.; Pei-Pol, G.U.O. et al. Evaluation of chlorophyll content and fluorescence parameters as indicators of drought tolerance in barley. **Agricultural Sciences in China**, Oxford, v. 5, n. 10, p. 551-557, 2006.

Severino, L. S.; Sakiyama, N. S.; Pereira, A. A. et al. Associações da produtividade com outras características agronômicas de café (*Coffea arabica* L. “Catimor”). **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, PR, v. 24, n. 5, p. 1467-1471, 2002

Silva, D. A. da .; Oliveira, A. J. de; Oliveira, T. C. de. et al. Agronomic performance of biomass sorghum hybrids assessed in the mato-grossense centro-south mesoregion . **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 11, n. 8, p. e6311830049, 2022. DOI: 10.33448/rsd-v11i8.30049. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/30049>. Acesso em: 24 oct. 2022.

Silva Martins, Anne. **Eficiência de adubação nitrogenada em diferentes estádios fenológicos da cultura do sorgo**, Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação Mestrado Acadêmico em Produção Vegetal) -- Câmpus-Ipameri, Universidade Estadual de Goiás, 2019.

Silva, A. F.; Rodrigues, J. A. S. (Ed.). **Sorgo: o produtor pergunta, a Embrapa responde**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 332 p. (Coleção 500 perguntas, 500 respostas), 2015.

Silva, A.G.; Rocha, V.S.; Cruz, C.D. et al. Adaptabilidade e estabilidade de cultivares de sorgo forrageiro semeados em diferentes épocas do ano. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.4, n.1, p.112-125, 2005

Simili, F. F., Lima, M. L. P., Moreira, A. L. et al. Forage mass production and grazing loss of sorghum hybrid in response to the density of the sowing and the spacing between planting lines. **Revista Brasileira de Zootecnia**, 40(7), 1474–1479. DOI:<https://doi.org/10.1590/S1516-35982011000700011>, 2011.

Shearman V.J.; Sylvester-Bradley R.; Scott R.K. et al. Physiological processes associated with wheat yield progress in the UK. **Crop Sci**, 45:175–185,2005.

Sousa Freitas, A. G. et al. MORFOFISIOLOGIA DA CULTURA DO AMENDOIM CULTIVADO SOB ESTRESSE SALINO E NUTRICIONAL. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada-RBAI**, v. 15, n. 1, 2021.

Tabosa, J. N. et al. **Importância do melhoramento genético de diferentes tipos de sorgo para as mesorregiões do Agreste, Sertão e afins do Semiárido Brasileiro**, 2019.

TABOSA, J. N. **Sorgo: Cadernos do Semiárido, riquezas & oportunidades**. Conselho Regional de Engenharia e Agronomia de Pernambuco – v.15, n.2, Recife: CREA-PE: Editora UFRPE, 2020.

Ximenes, L. F. **Tecnologias de Convivência com o Semiárido Brasileiro**. Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil, 2019. p. 1138. Disponível em <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/205051/1/Tecnologias-de-Convivencia-com-o-Semiarido-Brasileiro-2019.pdf> . Acessado: 28 out. 2022.

Teetor, V.H.; Duclos, D.V.; Young, K.M. et al. Effects of planting date on sugar and ethanol yield of sweet sorghum grown in Arizona. **Industrial Crops and Products**, Tucson, v. 34, n. 2, p. 1293-1300, 2011

Torres-Netto, A.; Campostrini, E.; Oliveira, J. G. et al. Portable chlorophyll meter for the quantification of photosynthetic pigments, nitrogen and the possible use for assessment of the photochemical process in Carica papaya L. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, 14(3), 203–210. 2002.

Torres-Netto A.; Campostrini E.; Oliveira JGd. et al. Photosynthetic pigments, nitrogen, chlorophyll *a* fluorescence and SPAD-502 readings in coffee leaves. **Sci Horti**, 104:199tic02 [https:// doi. org/ 10. 1016/j. scienta. 2004. 08. 013](https://doi.org/10.1016/j.scienta.2004.08.013), 2005.

Taiz, L.; Zeiger, E.; Møller, I.A. et al. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. (6. Ed) Porto Alegre: SC. 2017.

VASCONCELOS, E.S.D.; REIS, M.S.; SEDIYAMA, T. et al. **Estimativas de parâmetros genéticos da qualidade fisiológica de sementes de genótipos de soja produzidas em diferentes regiões de Minas Gerais**, [s.l], v. 33, n. 1, p. 65-76, 2012. DOI: <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2012v33n1p65>

Vencovsky, R.; Barriga, P. **Genética biométrica no fitomelhoramento**. Ribeirão Preto: Sociedade Brasileira de Genética, 1992. 496p

Verma, V.; Yadav, M. S.; Kumar, A. et al. Correlation and path analysis for seed yield and components traits in maize (*Zea mays* L.). **Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry**, v. 9, n. 1, p.2278-2280, 2020

Yamasaki T.; Yamakawa T.; Yamane Y. et al. Temperature acclimation of photosynthesis and related changes in photosystem II electron transport in winter wheat. **Plant Physiology**, 128:1087-1097, 2002.

Wright, S. Correlation and causation. **Journal of Agricultural Research**, v.20, p.557-585, 1921.