

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

Atividade do metabolismo antioxidante em genótipos de cana-de-açúcar submetidos a déficit hídrico induzido por Polietilenoglicol 6000 em fase inicial de desenvolvimento

Bruno Dias Amaral
Doctor Scientiae

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2024**

BRUNO DIAS AMARAL

Atividade do metabolismo antioxidante em genótipos de cana-de-açúcar submetidos a déficit hídrico induzido por Polietilenoglicol 6000 em fase inicial de desenvolvimento

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

Orientador: Marcio H. Pereira Barbosa

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2024**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

A485a
2024
Amaral, Bruno Dias, 1994-
Atividade do metabolismo antioxidante em genótipos de
cana-de-açúcar submetidos a déficit hídrico induzido por
Polietilenoglicol 6000 em fase inicial de desenvolvimento /
Bruno Dias Amaral. – Viçosa, MG, 2024.
1 tese eletrônica (125 f.): il. (algumas color.).

Inclui apêndices.

Orientador: Márcio Henrique Pereira Barbosa.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Agronomia, 2024.

Referências bibliográficas: f. 87-120.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2025.475>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Cana-de-açúcar - Melhoramento genético.
2. Cana-de-açúcar - Resistência à seca.
3. Enzimas.
4. Antioxidantes. I. Barbosa, Márcio Henrique Pereira, 1966-.
II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de
Agronomia. Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia.
III. Título.

CDD 22. ed. 633.612

BRUNO DIAS AMARAL

Atividade do metabolismo antioxidante em genótipos de cana-de-açúcar submetidos a déficit hídrico induzido por Polietilenoglicol 6000 em fase inicial de desenvolvimento

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

APROVADA: 28 de novembro de 2024.

Assentimento:

Bruno Dias Amaral
Autor

Marcio Henrique Pereira Barbosa
Orientador

Essa tese foi assinada digitalmente pelo autor em 01/08/2025 às 22:29:17 e pelo orientador em 04/08/2025 às 09:30:50. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse <https://siadoc.ufv.br/validar-documento>. No campo 'Código de registro', informe o código **I79F.6C8C.TJOL** e clique no botão 'Validar documento'.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado com o apoio das seguintes agências de pesquisa brasileiras: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

RESUMO

AMARAL, Bruno Dias, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, novembro de 2024. **Atividade do metabolismo antioxidante em genótipos de cana-de-açúcar submetidos a déficit hídrico induzido por Polietilenoglicol 6000 em fase inicial de desenvolvimento.** Orientador: Marcio Henrique Pereira Barbosa.

A cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) é uma das principais culturas do agronegócio brasileiro, no entanto, o déficit hídrico tem comprometido a produtividade de canaviais. O melhoramento genético é a ferramenta que mais tem contribuído com o aumento de produtividade, através do desenvolvimento de variedades como maior potencial produtivo sob condições limitantes. A variabilidade genética, o elevado número de indivíduos e o ciclo da cultura, entretanto, fazem com que o tempo para obtenção de variedades seja longo. Sob condições de déficit hídrico, metabolismo antioxidante enzimático e não enzimático tem sido uma das principais variáveis associadas a seleção de materiais genético tolerantes. No entanto, a complexidade de avaliação de tais indicadores torna o processo árduo e oneroso, por isso, identificar características chave é fundamental para os programas de melhoramento genético da cultura. Diante disso, objetivo do presente trabalho foi quantificar a atividade das enzimas Superóxido dismutase (SOD), Catalase (CAT) e Peroxidase (POX), e a quantificação da peroxidação lipídica, através da concentração de Malondialdeído (MDA) em variedades de cana-de-açúcar submetidas a condições de déficit hídrico. Para isso, 30 variedades de cana-de-açúcar foram cultivadas em solução nutritiva e posteriormente submetidas a condições de déficit hídrico induzido por Polietilenoglicol 6000. Com base nos resultados obtidos, foram preditos os valores genotípicos individuais (BLUP). A partir dessas informações, foram estimados os componentes principais para identificação das variáveis de maior relevância para o melhoramento genético da cana-de-açúcar. Pelo Teste T verificou-se diferenças significativas entre médias dos tratamentos sob déficit hídrico comparado a situação controle, para as variáveis SOD, POX e MDA. Sob condições de déficit hídrico as variedades RB 097217, RB 92579, RB 72454, RB 98710, SP 80-1842, CTC 4, RB 855453, RB 108519, RB 985476 e VAT 90-212, se destacaram com os menores conteúdos de Malondialdeído. Em relação ao índice SPAD, as variedades com maiores valores foram: RB 097217, RB 975033, RB 108519, CTC 9002, RB 127825, CTC 9003, RB 965902, RB 855156, RB 855536 e SP 80-3280. Sob condições de déficit hídrico, os Componentes Principais 1 e 2 abarcaram cerca de 69,8% da variabilidade genética existente, indicando como principais variáveis a atividade Peroxidase e o índice SPAD no CP1 e

conteúdo de Malondialdeído e atividade da Catalase no CP2.

Palavras-chave: seca; sucroenergético; melhoramento genético; enzimas antioxidantes; *Saccharum*; componentes principais; modelos mistos.

ABSTRACT

AMARAL, Bruno Dias, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, November, 2024.
Activity of antioxidant metabolism in sugarcane genotypes subjected to water deficit induced by Polyethylene Glycol 6000 in the early phase of development.
Adviser: Marcio Henrique Pereira Barbosa.

Sugarcane (*Saccharum* spp.) is one of the main crops in Brazilian agribusiness; however, water deficit has compromised the productivity of sugarcane fields. Genetic breeding is the tool that has most contributed to productivity gains through the development of varieties with higher yield potential under limiting conditions. Nonetheless, the genetic variability, large number of individuals, and the crop's growth cycle make the process of obtaining new varieties time-consuming. Under water deficit conditions, enzymatic and non-enzymatic antioxidant metabolism has been one of the main variables associated with the selection of drought-tolerant genotypes. However, the complexity of evaluating these indicators makes the process laborious and costly. Therefore, identifying key traits is fundamental for sugarcane breeding programs. In this context, the objective of the present study was to quantify the activity of the enzymes Superoxide Dismutase (SOD), Catalase (CAT), and Peroxidase (POX), as well as lipid peroxidation through the concentration of Malondialdehyde (MDA), in sugarcane varieties subjected to water deficit conditions. For this purpose, 30 sugarcane genotypes were grown in nutrient solution and later subjected to water deficit conditions induced by Polyethylene Glycol 6000 (PEG 6000). Based on the results obtained, individual genotypic values (BLUPs – Best Linear Unbiased Predictors) were predicted. Principal Component Analysis (PCA) was then conducted to identify the most relevant variables for sugarcane genetic improvement. A T-test revealed significant differences between treatment means under water deficit and control conditions for SOD, POX, and MDA variables. Under water deficit conditions, the varieties RB 097217, RB 92579, RB 72454, RB 98710, SP 80-1842, CTC 4, RB 855453, RB 108519, RB 985476, and VAT 90-212 stood out with the lowest Malondialdehyde contents. Regarding the SPAD index, the varieties with the highest values were RB 097217, RB 975033, RB 108519, CTC 9002, RB 127825, CTC 9003, RB 965902, RB 855156, RB 855536, and SP 80-3280. Under water deficit, Principal Components 1 and 2 explained approximately 69.8% of the total genetic variability, indicating Peroxidase activity and SPAD index as the most relevant variables in PC1, and Malondialdehyde content and Catalase activity in PC2.

Keywords: drought; sugar-energy sector; plant breeding; antioxidant

enzymes; *Saccharum*; principal components; mixed models.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	10
2.	OBJETIVOS.....	12
2.1.	OBJETIVO GERAL.....	12
2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	12
3.	REVISÃO DE LITERATURA.....	13
3.1.	Histórico da cana-de-açúcar no Brasil e Classificação botânica.....	13
3.2.	Melhoramento de cana-de-açúcar	14
3.3.	Déficit hídrico	21
3.4.	Mecanismos de tolerância	23
3.5.	Enzimas antioxidantes	31
3.6.	Análise de Componentes Principais	34
3.7.	Modelos Lineares Mistos	37
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	41
4.1.	Local, Período Experimental e Material Vegetal	41
4.2.	Condução em solução nutritiva.....	42
4.3.	Indução do déficit hídrico	42
4.4.	Análises Bioquímicas.....	43
4.4.1.	Metabolismo Oxidativo	43
4.4.1.1.	Enzimas antioxidantes	43
4.4.1.1.1.	Determinação da atividade da Dismutase do Superóxido (SOD, EC 1.15.1.1) 44	
4.4.1.1.2.	Determinação da atividade da Catalase (CAT, EC 1.11.1.6).....	45
4.4.1.1.3.	Determinação da atividade da Peroxidase (POX, EC 1.11.1.7)	45
4.4.1.2.	Quantificação de proteínas	45
4.4.2.	Peroxidação Lipídica	45
4.5.	Índice SPAD	46
4.6.	Delineamento experimental	46
4.7.	Análises estatísticas	46
4.7.1.	Detecção e eliminação de outliers	46
4.7.2.	Análise de Cluster	46
4.7.3.	Modelo estatístico	47
4.7.4.	Teste de significância.....	48
4.7.5.	Teste T	48
4.7.6.	Análise de componentes principais.....	48

4.7.7.	Análise de Cluster	48
4.8.	Softwares.....	49
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
5.1.	Tratamento dos dados e remoção de Outliers.....	50
5.2.	Respostas genótípicas à Indução de déficit hídrico com Polietilenoglicol 6000 50	
5.2.1.	Teste LRT	50
5.2.2.	Teste T.....	50
5.3.	Desempenho de genótipos sob condições de déficit hídrico induzido por Polietilenoglicol 6000.....	54
5.3.1.	Conteúdo Malondialdeído	55
5.3.2.	Atividade do sistema antioxidante enzimático.....	63
5.3.2.1.	Superóxido Dismutase.....	64
5.3.2.2.	Catalase.....	67
5.3.2.3.	Peroxidase.....	70
5.3.3.	Índice SPAD.....	73
5.3.4.	Análise de componentes principais sob condições de déficit hídrico	77
6.	CONCLUSÕES.....	86
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87
8.	MATERIAL SUPLEMENTAR I.....	121
9.	MATERIAL SUPLEMENTAR II.....	123

1. INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) foi introduzida no Brasil há aproximadamente 500 anos, sendo cultivada desde o período colonial, apresentando importância histórica e econômica (Machado & Habib, 2009). Atualmente, o Brasil destaca-se como o maior produtor mundial de cana-de-açúcar e de seus derivados, como o açúcar e o etanol (FAO, 2024). Além disso, o setor sucroalcooleiro encontra-se em franca expansão, impulsionado principalmente por fatores econômicos e ambientais relacionados à produção de açúcar e à geração de energias consideradas limpas, especialmente o etanol e a energia proveniente da queima de biomassa (Aguiar et al., 2021; Carvalho et al., 2017; Silva et al., 2012).

De acordo com a FAO (2024), a produtividade da cultura evoluiu de 42,6 t/ha em 1962 para uma produtividade média nacional máxima de 80,25 t/ha em 2009. No entanto, esses valores ainda estão aquém do potencial produtivo da cultura, sendo influenciados principalmente pela variedade plantada, temperatura e umidade do solo (Cardozo & Sentelhas, 2013).

O déficit hídrico é uma condição frequente nos sistemas agrícolas, sendo um dos principais fatores limitantes da produtividade das lavouras. Na cultura da cana-de-açúcar, a baixa disponibilidade hídrica é o principal fator associado à redução da produtividade, sendo considerado o principal estresse abiótico, e portanto, amplamente estudado na literatura (Fracasso et al., 2016; Morais et al., 2018; Singels et al., 2008; Teodoro et al., 2013; Verma et al., 2021; Jacomassi et al., 2024; Rani et al., 2024).

A estratégia mais viável para mitigar os efeitos da seca na canavicultura é o melhoramento genético, diretamente associado ao aumento da produtividade e da qualidade da matéria-prima para produção de açúcar, energia e etanol. No entanto, o processo de seleção e obtenção de novas variedades é longo, podendo levar mais de 14 anos, devido ao elevado número de clones gerados, ao ciclo longo da cultura, à necessidade de avaliações ao longo de múltiplos ciclos, à variação ambiental e à resistência a pragas e doenças, entre outros fatores (Barbosa et al., 2005).

Na cultura da cana-de-açúcar, a seleção baseada em caracteres secundários pode ser utilizada para inferir o desempenho de caráter principal

(Bressiani, 2001; Oliveira et al., 2011). A tolerância ao déficit hídrico, por sua vez, tem sido associada a diversas características, como a atividade do metabolismo antioxidante, o acúmulo de osmoprotetores e osmorreguladores, o controle de atividades fisiológicas, alterações biométricas, redução de trocas gasosas, produção de enzimas e eficiência no uso da água (Morais et al., 2013).

O déficit hídrico é uma característica complexa, determinada por múltiplos fatores morfológicos, fisiológicos e metabólicos. Durante o processo de seleção para tolerância à seca, muitas variáveis com pouca ou nenhuma contribuição podem ser consideradas, dificultando a identificação de genótipos superiores (Costa et al., 2013). Com isso, a análise e interpretação dos dados tornam-se desafiadoras e onerosas para os programas de melhoramento (Araújo & Coelho, 2009; Costa et al., 2013).

A análise de componentes principais (ACP) é uma ferramenta estatística que permite identificar as características mais relevantes e suas inter-relações, além de eliminar variáveis redundantes ou de baixa expressividade. Dessa forma, a ACP pode facilitar a avaliação de genótipos, reduzir custos e acelerar o processo de identificação de materiais promissores (Costa et al., 2013).

Adicionalmente, a utilização de metodologias estatísticas robustas para análise de dados desbalanceados é fundamental, considerando que a perda de parcelas é comum em experimentos agrícolas. Nesse contexto, os modelos lineares mistos têm se consolidado como uma estratégia eficiente no melhoramento genético de diversas culturas de importância econômica (Bastos et al., 2007; Eilert et al., 2020; Gonçalves et al., 2014).

Diante do exposto, o objetivo do presente trabalho foi quantificar as respostas do metabolismo antioxidante da cana-de-açúcar sob condições de déficit hídrico, simuladas com polietilenoglicol 6000, em fase inicial de desenvolvimento, e identificar as características de maior relevância para condições de seca.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Avaliar variáveis do metabolismo antioxidante associadas à maior tolerância à seca em variedades de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) submetidas a condições de déficit hídrico induzido por polietilenoglicol 6000.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar as diferenças no metabolismo antioxidante enzimático entre variedades de cana-de-açúcar submetidas ao déficit hídrico, em comparação ao tratamento controle.
- Selecionar variedades com menor grau de dano oxidativo sob condições de déficit hídrico.
- Identificar as variáveis mais relevantes para a seleção de variedades de cana-de-açúcar com maior tolerância ao déficit hídrico.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. Histórico da cana-de-açúcar no Brasil e Classificação botânica

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) é considerada uma espécie semiperene, que possui como centro de origem o Sudeste Asiático, mais precisamente a região central da Nova-Guiné e Indonésia a partir de onde foi disseminada para as demais partes do mundo (Daniels & Roach, 1987; Segato, et al., 2006). Todavia, não há consenso sobre a localização exata do surgimento deste gênero (Bezerra et al., 2018).

De acordo com classificação de Cronquist (1981) a cana-de-açúcar é uma gramínea pertencente a Divisão Magnoliophyta, Classe Liliopsida, Ordem Cyperales, Família Poaceae, subfamília Panicoideae, Tribo Andropogoneae, Subtribo Saccharininae, Gênero *Saccharum* e espécies *Saccharum officinarum*, *Saccharum barberi*, *Saccharum robustum*, *Saccharum spontaneum*, *Saccharum sinensis* e *Saccharum edule*. As variedades comerciais cultivadas atualmente são consideradas híbridos interespecíficos entre seis representantes do gênero *Saccharum* (Segato et al., 2006).

A cana-de-açúcar é plantada atualmente em cerca de 121 países, sendo o Brasil o maior produtor mundial da cultura, seguido pela Índia, Tailândia, China e Paquistão (FAO, 2024; Cunha et al., 2015).

No continente americano estudos revelam que a chegada da cana-de-açúcar ocorreu por volta de 1493, com mudas trazidas por Cristóvão Colombo da Ilha da Madeira – Portugal para a atual região da República Dominicana (Bremer, 1932; Deer, 1921; Dinardo-Miranda et al., 2010).

As características favoráveis de solo, relevo, hídricas e climáticas possibilitaram o pleno desenvolvimento da cana-de-açúcar no Brasil colônia, utilizando inicialmente mão-de-obra nativa (Rodrigues & Ross, 2020). A boa adaptação da espécie às condições de cultivo induziu o plantio em todas as Capitânicas da Colônia, principalmente na região Nordeste (Marcondes, 2005). Com isso, observou intenso aumento na construção de novos engenhos nessas localidades (Fontanetti & Bueno, 2017).

Os trabalhos de melhoramento genético associados às melhorias no manejo da cana-de-açúcar no Brasil contribuíram significativamente com o

incremento de produtividade das lavouras (Barbosa et al., 2008). Estima-se que o ganho tenha atingido 30% em 30 anos, visto que o tempo médio para obtenção de novas cultivares varia entre 10 e 15 anos (Gazaffi et al., 2010; Landell & Bressian, 2009).

Os trabalhos de pesquisa nas diferentes áreas da cadeia produtiva da cana-de-açúcar permitiram grandes avanços na produtividade, isso fica evidente ao analisarmos a evolução da produção média de colmo por hectare de canaviais no Brasil, onde, em 1961 esse volume era de 43,45 t/ha e em 2009 chegaram a marca de 80,26 t/ha (FAO, 2024; Morais et al., 2015b)

Atualmente o Brasil destaca-se como maior produtor mundial de cana-de-açúcar, sendo responsável por aproximadamente 40% da produção mundial (FAO, 2024).

3.2. Melhoramento de cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é uma planta alógama, que realiza fecundação cruzada. A alogamia acontece principalmente devido à macho-esterelidade presente no gênero (Barbosa & Silveira, 2018). Destes cruzamentos, são formados milhares de indivíduos, com elevada variabilidade genética.

De modo geral, os plantios comerciais são realizados via propagação vegetativa, por meio da brotação de gemas laterais (Morais et al., 2015a; Morais et al., 2015b). Todavia, a propagação seminífera também é utilizada, no entanto de forma restrita, destinadas a programas de melhoramento genético da cultura (Morais et al., 2015a).

Considera-se que o processo de domesticação da cana tenha se iniciado por volta de 9.000 – 8.000 a.C., sendo que posteriormente as diversas espécies que compõem o gênero surgiram em diferentes regiões do sudeste asiático (Horii, 2004). De acordo com Vieira (2007) a espécie *S. officinarum* teria surgido por volta de 2500 a.C. em Papua, Nova Guiné, onde era utilizada principalmente como planta ornamental devido às variações de tonalidade dos colmos e o caldo adocicado utilizado para alimentação (Brandes, 1956; Matsouka et al., 2005; Vieira, 2007). Nesse momento, a seleção dos genótipos era realizada por povos nativos e baseava-se na coloração dos colmos, no baixo teor de fibra e no sabor mais adocicados do caldo (Landell & Silva, 2004).

A partir de 700 a.C. a cana foi difundida para as demais regiões da Ásia e em 510 a.C. relatos indicam a descoberta da planta pelos Persas, que mais tarde se tornariam pioneiros no processo de cristalização do açúcar (Delgado & César, 1977; Vieira, 2007). A rápida disseminação da cana-de-açúcar pelo mundo ocorreu após a descoberta da especiaria pelos árabes em 600 d.C., todavia, os primeiros relatos da espécie na Europa foram datados somente em 1305 de onde foi disseminada para as demais regiões do mundo (Vieira, 2007).

Nas américas a cana-de-açúcar foi introduzida em 1493 e o genótipo utilizado era denominado “Crioula” que era resultado da hibridação natural entre *S. officinarum* e *S. barberi* (Bremer, 1932). Essa variedade foi cultivada durante aproximadamente 250 anos sendo posteriormente substituída por canas denominadas “Nobres” (*S. officinarum*), como a variedade “Bourbon”, amplamente cultivada até o início do século XX (Landell & Silva, 2004).

Os primeiros cruzamentos artificiais em cana-de-açúcar foram realizados por Soltwedel, e por Bovell e Harrison em Barbado, dando origem aos primeiros híbridos nos anos de 1887-1888 (Landell & Silva, 2004; Matsuoka et al., 2005). No Brasil, os estudos com cana-de-açúcar iniciaram-se na transição do século XIX para o XX, com a criação do Instituto Agrônomo de Campinas em 1887 por D. Pedro II, realizando pesquisas voltadas para as áreas de composição química dos solos, adubos e variedades, bem como avaliação e seleção de genótipos adequados aos ambientes de produção (Meloni, 2004; Barbosa et al., 2005).

Os primeiros trabalhos objetivando desenvolver variedades comerciais de cana foram conduzidos em Pernambuco em 1901, no Rio de Janeiro em 1918 e em Piracicaba em 1930, todavia, o de maior sucesso ocorreu em Miracatu – SP em 1934 (Figueiredo, 2010).

De acordo com Ming et al. (2006), as hibridações em cana-de-açúcar podem ser historicamente divididas em cinco períodos, são eles:

Primeiro período: Foi caracterizado pelo cruzamento entre “canas nobres” (*S. officinarum*) mantendo as características qualitativas da espécie;

Segundo período: Consistiu na nobilitação do cruzamento *S. officinarum* x *S. spontaneum*, mantendo características de interesse presentes *S. spontaneum*, com posterior resgate da qualidade da *S. officinarum* via retrocruzamento;

Terceiro período: Foi representado pela obtenção de híbridos através de cruzamentos entre cultivares nobilizadas;

Quarto período: Consistiu na realização cruzamentos entre híbridos para obtenção dos híbridos atuais;

Quinto período: Os cruzamentos realizados nessa fase objetivavam expandir a base genética.

Atualmente, as variedades de cana-de-açúcar plantadas são híbridos formados a partir de cruzamentos entre espécies do gênero *Saccharum*, principalmente: duas espécies consideradas selvagens, *S. spontaneum* L. ($2n = 40-128$) e *S. robustum* ($2n = 60-205$) e quatro espécies cultivadas *S. officinarum* L. ($2n = 80$), *S. barberi* ($2n = 81-124$), *S. sinensis*. ($2n = 111-120$), e *S. edule* ($2n = 60-80$) (Morais et al., 2015a; Segato et al., 2006). Todavia, os programas de melhoramento genético realizam a inserção genes de interesse presente em espécies sexualmente compatíveis via hibridação com intuito de obter variedades com características agronomicamente superiores (Bezerra et al., 2018; Heerdet, 2008).

Por se tratar de um complexo de espécies alógamas, sugere-se que cruzamentos entre indivíduos aparentados sejam evitados por manifestar efeitos deletérios sobre caracteres relacionados a produção (Hogarth, 1980). Ferreira et. al (2005) avaliando os efeitos da endogamia em famílias de cana-planta (1° Corte) e soca (2° Corte em diante) verificaram efeitos negativos em diversas características como toneladas de brix por hectare, toneladas de colmo por hectare, diâmetro, comprimento e peso médio de colmo.

Dentre as espécies que deram origem a cana, considera-se que a *S. spontaneum* e *S. officinarum* são as que mais contribuem com os trabalhos de melhoramento genético e conseqüentemente com o genoma dos híbridos cultivado atualmente (Bezerra et al., 2018; Morais et al., 2015a).

Os programas de melhoramentos atuais buscam desenvolver variedades de cana-de-açúcar com elevada produtividade, elevado teor de sacarose, tolerância ao déficit hídrico, elevada capacidade de produção de etanol e biomassa, elevado teor de fibras e com paredes celulares que sejam de fácil rompimento, o que contribui com a produção de etanol de segunda geração ou também chamado de lignocelulósico. Além disso, há a possibilidade de utilização

do bagaço para queima e geração de energia, e além disso, almejam plantas com elevada eficiência no uso de nutrientes (Morais et al., 2015a).

Segundo Gazaffi et al. (2010) diversos fatores devem ser considerados para que um programa de melhoramento genético de cana-de-açúcar alcance o sucesso, dentre eles destacam-se: escolha adequada de genitores para maximizar os ganhos com a seleção, utilização de recursos que reduzam o erro experimental, aumentando assim a precisão e as avaliações de caracteres corretos na época adequada e permitindo a estimar o efeito ambiental na expressão do fenótipo.

Dentre os caracteres avaliados para seleção de clones e/ou genitores de cana-de-açúcar destacam-se: a resistência a pragas e doenças, a produtividade tanto de colmo quanto de açúcar, a época de maturação, o teor e a qualidade da fibra, a velocidade de crescimento e perfilhamento, a ausência de florescimento, o hábito de crescimento, a despalha, a brotação e longevidade, a adaptabilidade e estabilidade e a tolerância a estresses abióticos (Landell & Silva, 2004; Morais et al., 2015a). De acordo com Wang et al. (2003) a obtenção de cultivares resistentes aos estresses abióticos requer um programa de melhoramento genético estratégico e racional e deve ser alicerçado em quatro etapas básicas: a) Seleção de genótipos que possuem características de interesse; b) Compreensão dos mecanismos específicos associados à tolerância e a susceptibilidade; c) Seleção e melhoramento genético dos materiais com base nos recursos e conhecimentos biotecnológicos; e d) Adequação do manejo às novas exigências do genótipo.

O primeiro ponto a ser considerado em um programa de melhoramento genético de cana-de-açúcar consiste na obtenção de variabilidade genética através de bancos de germoplasmas e do cruzamento entre indivíduos divergentes (Landell & Silva, 2004; Barbosa et al., 2005). Sendo assim, a caracterização dos genótipos disponíveis representa uma etapa fundamental no direcionamento dos cruzamentos a serem realizados (Santos et al., 2012).

A hibridação consiste na tentativa de associar em um único genótipo, características inicialmente presentes em dois ou mais indivíduos, e para isso, alguns fatores são desejáveis, como produção, teor de açúcar, resistência a doenças e pragas, adequação ao plantio e colheita mecanizada, dentre outras (Ming et al., 2006). Portanto, torna-se necessário dispor de materiais com

variabilidade genética que podem ser encontrados, em diversas instituições de pesquisa do Brasil, que realizam trabalhos associados à cadeia produtiva da cana-de-açúcar.

As principais instituições de melhoramento de cana-de-açúcar atualmente no Brasil são: A RIDESA com variedades representadas pela sigla RB; o Instituto Agrônomo de Campinas com variedade de sigla IAC; e o Centro de Tecnologia Canavieira cuja variedades recebem as letras CTC e SP das cultivares anexadas da Copersucar (Morais et al., 2015a).

A RIDESA – Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroenergético – é considerada a principal instituição de pesquisa canavieira no âmbito do Governo Federal, possuindo um acervo de cerca de 3.090 acessos diferentes entre espécies e híbridos (Morais et al., 2015a).

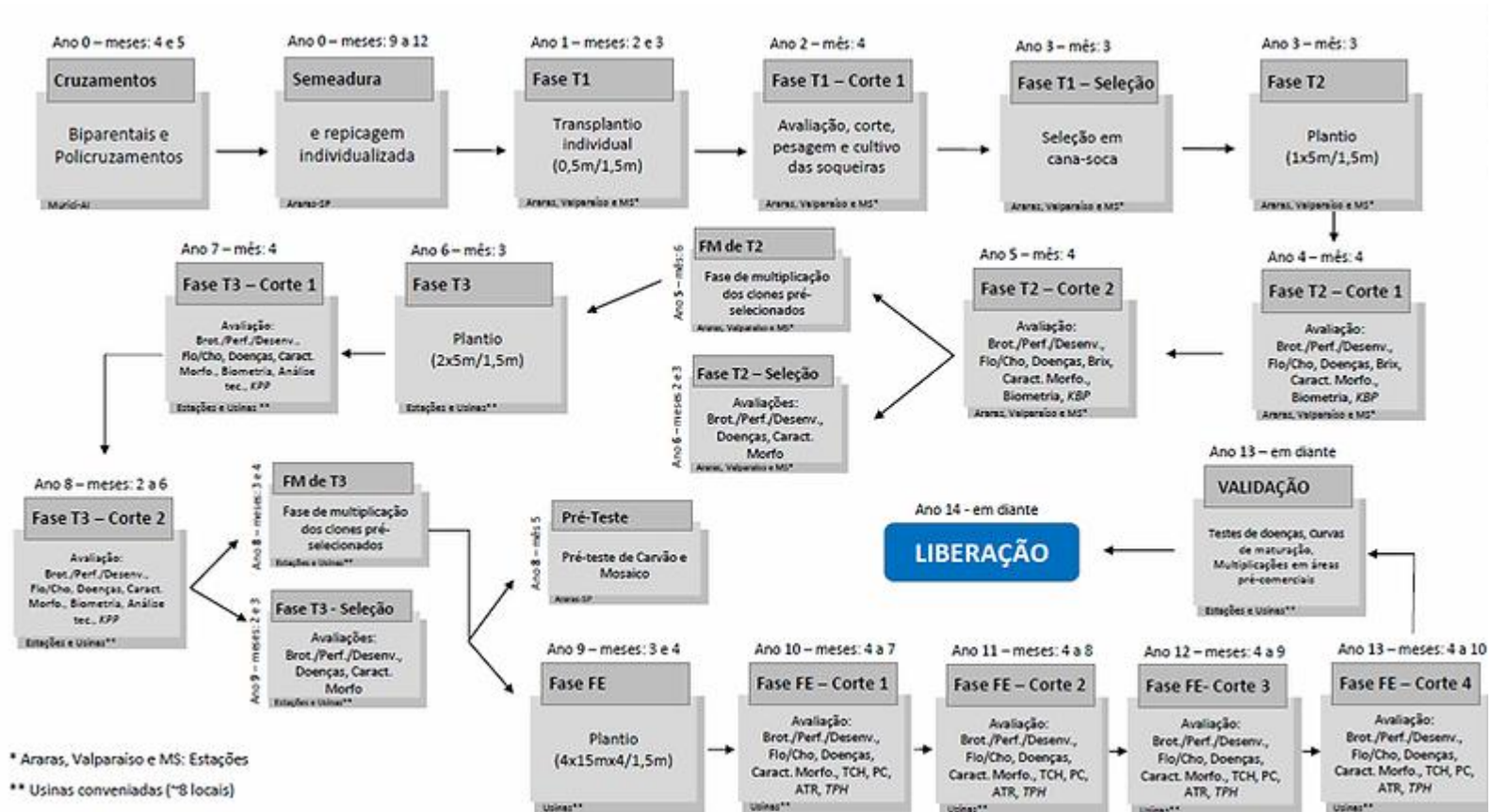
A RIDESA surgiu no ano de 1990 a partir da incorporação das unidades do extinto PLANALSUCAR às Universidades Federais, dando continuidade aos diversos trabalhos realizados com cana-de-açúcar.

Dentre as linhas de pesquisa, destacam-se: melhoramento genético, biotecnologia, fitossanidade, gestão ambiental, solos, nutrição e adubação, relações hídricas, produção energéticas, manejo e tratos culturais, administração, socioeconômica, diversificação de produtos, tecnologia industrial e controle de qualidade, difusão e transferência de tecnologia (RIDESA, 2021). As etapas realizadas no programa de melhoramento genético da cana-de-açúcar conduzido pela RIDESA podem ser resumidas conforme a figura 1.

De acordo com Silva et al. (2002) a etapa de estimativa dos componentes de variância dos genótipos é fundamental, portanto, caracterizar fenotípica e genotipicamente a população de trabalho permitirá ao melhorista escolher as estratégias que promoverão maiores ganhos.

A definição da herdabilidade permite ao programa de melhoramento uma maior eficiência operacional pois auxilia o melhorista na definição da melhor estratégia de seleção bem como predizer o ganho do caráter avaliado (Fehr, 1987). No entanto, é importante ressaltar que a herdabilidade varia de acordo com o caráter, com a população de estudo e com as condições ambientais nas quais os materiais são avaliados (Falconer, 1969; Fehr, 1987).

Figura 1. Fluxograma resumido das fases do programa de melhoramento genético da cana-de-açúcar realizado pelas Universidades que compõem a RIDESA.



Fonte: RIDESA (2015)

Um dos pontos importantes a serem avaliados na realização das hibridações é capacidade e o sincronismo no florescimento (BARBOSA et al., 2005). Estudos indicam que o florescimento é favorecido em temperaturas superiores a 18°C e máxima situada entre 32 e 35°C, com umidade e precipitações elevadas, além de solos deficientes e latitude localizada entre 10°N e 10°S (Levi, 1983 E 1992 apud Barbosa et al., 2005).

Existem atualmente no Brasil duas estações de cruzamento de cana-de-açúcar onde o florescimento é favorecido em condições naturais. A estação de cruzamento da Serra-do-Ouro localizada em Murici – AL, sob responsabilidade do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas no qual realiza hibridações e fornece sementes para a RIDESA (Barbosa et al., 2005). E o segundo ambiente que se destaca na realização de hibridações para programas de melhoramento de cana-de-açúcar localiza-se em Camamu na Bahia, o qual fornece sementes para o CTC (Centro de Tecnologia Canavieira) e para o IAC (Instituto agrônomo de Campinas (Barbosa et al., 2005).

De modo geral, os cruzamentos em cana-de-açúcar são realizados de duas formas, são elas: i) os cruzamentos biparentais ou também denominados simples, cujo processo permite conhecer o genitor masculino e feminino ou; ii) policruzamentos onde os indivíduos selecionados se inter cruzam, sendo o apenas o genitor materno conhecido (Barbosa et al., 2005; Morais et al., 2015a).

De acordo com o censo varietal realizado pela IAC (Instituto Agrônomo de Campinas) na safra de 2022/2023 no Brasil, as variedades RBs responderam por cerca de 54,9% das áreas de cultivo, sendo que somente a RB 867515 contribui com 14,02% do montante geral (Braga Junior et al., 2023).

O melhoramento genético da cana-de-açúcar é dinâmico, visto que os melhoristas selecionam diversas características simultaneamente. Em relação ao melhoramento da cana-de-açúcar praticado no mundo nos dias atuais, verifica-se que existem oportunidades de maiores aportes tecnológicos quando comparado à outras culturas como milho e arroz, no entanto, esse cenário tem se atualizado (Lu et al., 2024)

A aplicação de tecnologias como sequenciamento, biologia molecular, bioinformática e técnicas de análise de dados, tem contribuído grandemente com os avanços nos programas de melhoramento genético da cana e tem-se notado com maior frequência a adoção de tais tecnologias (Lu et al., 2024).

3.3. Déficit hídrico

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) é uma espécie originária do sudeste asiático, a partir de onde se disseminou para todo o mundo, desenvolvendo-se principalmente em regiões tropicais e subtropicais (Carneiro et al., 2015).

A cana é uma gramínea que possui metabolismo C4, portanto, realiza a fixação inicial de um composto de quatro carbonos, denominado oxalacetato (Segato et al., 2006; Taiz et al., 2017). Como características desse metabolismo, destaca-se a elevada eficiência de aquisição e utilização do CO₂ e alta taxa fotossintética (Segato et al., 2006).

De modo geral, considera-se que a cana seja uma planta bem adaptada às condições de alta intensidade luminosa e altas temperaturas, além disso possui certa tolerância à escassez de água, todavia, durante o ano estima-se que são demandados de 1500 a 2500 mm (Segato et al., 2006; Doorenbos & Kassam, 1979).

No Brasil, destacam-se como maiores regiões produtoras o Centro-Oeste e Sudeste, principalmente os Estados de São Paulo, Goiás, Minas Gerais e Mato Grosso do Sul (CONAB, 2024).

O plantio da cana-de-açúcar na região Centro-Sul do Brasil normalmente é realizado em duas épocas, sendo elas: de setembro a novembro, também chamada de “cana-de-ano” e a “cana de ano e meio”, plantada de janeiro a início de abril, sendo essa segunda modalidade a mais adotada atualmente (Segato et al., 2006; Silva et al., 2001).

Nas Regiões Centro-Oeste e Sudeste nota-se os efeitos dos sistemas tropicais e de latitudes médias, com isso, as estações são bem definidas com seca no inverno enquanto o verão normalmente é chuvoso (Quadro, 2021).

Já na região Nordeste, que também se destaca na produção de cana, a estação chuvosa é caracterizada pelo baixo índice pluviométrico, indicando o clima semiárido (Quadro, 2021).

Desta maneira, o principal fator limitante nas Regiões Centro-Oeste e Sudeste é o índice pluviométrico mal distribuído, ocorrendo geralmente déficit no período de abril a outubro e superávit de novembro a março, enquanto no Nordeste essa limitação ocorre durante todo o ano (Dias & Sentelhas, 2018).

De modo geral, as áreas de cultivo de cana têm sido ampliadas, todavia, não tem se notado grandes evoluções em relação a produtividade devido, principalmente,

às limitações que atingem a cultura, sobretudo fatores edafoclimáticos (Casagrande & Vasconcelos, 2010; Garofalo et al., 2020). Segundo Dias & Sentelhas (2018) o déficit hídrico é o principal fator limitante da produtividade em cana-de-açúcar, sendo responsável por cerca 73% de queda de produção.

A produtividade das espécies cultivadas pode ser limitada por diferentes fatores, tanto bióticos quanto abióticos (Taiz et al., 2017). O estresse pode ser definido como desvio da condição ambiental ótima para desenvolvimento da planta, onde o crescimento vegetal é limitado por fatores exógenos (Taiz et al., 2017). Nessas condições, o potencial genético máximo é limitado de acordo com o nível de estresse e à capacidade de respostas do genótipo sob tais condições (Blum et al., 1991).

O déficit hídrico se inicia quando a taxa de absorção de água é menor do que a de evapotranspiração, gerando uma redução do status hídrico foliar (Angelocci, 2002; Taiz et al., 2017). Essa desidratação ocorre devido ao menor potencial hídrico existente no solo quando comparado ao da planta, o que acentuado pela perda atmosférica, reduzindo o conteúdo de água na folha (Taiz et al., 2017).

Normalmente as plantas não se encontram completamente hidratadas devido a constante troca de água para a atmosfera, perdendo cerca de 97% da água absorvida (Taiz et al., 2017). Nos períodos de seca, o déficit hídrico se intensifica e provoca inibições do crescimento e da fotossíntese. De acordo com Taiz et al. (2017), a sensibilidade de determinado processo fisiológico ao déficit hídrico é normalmente resultado dos mecanismos da planta para contornar oscilações desse estresse. Segundo esses mesmos autores, o processo mais afetado pelo déficit hídrico é a expansão celular, que conseqüente reduz o crescimento e desenvolvimento da planta.

As alterações nas plantas desencadeadas pela dessecação se iniciam com a percepção da redução do potencial hídrico do vegetal, que irá promover uma série eventos moleculares que resultarão em modificações fisiológicas, anatômicas e metabólicas (Nepomuceno et al., 2001; Taiz et al., 2017).

Os efeitos primários do déficit hídrico são a redução do potencial hídrico, desidratação celular e resistência hidráulica, como efeitos secundário cita-se: a redução da expansão celular/foliar; redução das atividade celulares e metabólicas; fechamento estomático; inibição fotossintética; abscisão foliar; alteração na partição do carbono; citorrise; cavitação desestabilização de membranas e proteínas; produção de espécies reativas de oxigênio; citotoxicidade iônicas e; morte celular (Taiz et al., 2017).

É evidente que as plantas respondem diferentemente às condições de déficit hídrico, portanto, avaliar e mensurar quais mecanismo estão envolvidos no maior ou menor grau de tolerância de determinados genótipos a dessecação constitui parte fundamental do processo de seleção e melhoramento genético (Fritsche-Neto & Borém, 2011).

Uma planta tolerante a seca pode ser entendida como aquela que possui mecanismos capazes de fazê-la resistir, sobreviver e reproduzir mesmo que em condições adversas, portanto, suas funções vitais são mantidas mesmo em condições de deficiência (Ferrão et al., 2016; Verslues et al., 2006).

3.4. Mecanismos de tolerância

As plantas são organismos sésseis e por isso estão constantemente sujeitas a sofrerem pressões devido aos diversos fatores estressantes, tanto bióticos quanto abióticos (Baena-González, 2010; Taiz et al., 2017). Para que as espécies vegetais pudessem superar as adversidades, sobreviver e se reproduzir, foi necessário que desenvolvessem mecanismos capazes de contornar ou mitigar os danos decorrentes do ambiente estressante (Taiz et al., 2017).

As plantas, ao serem expostas a condições ambientais desfavoráveis ao seu desenvolvimento, ativam mecanismos fisiológicos e bioquímicos específicos em resposta ao estresse. Esse processo inicia-se com a percepção do estímulo ambiental, conhecido como sinal, por estruturas sensoriais especializadas. Em seguida, ocorre a transdução do sinal, que consiste em uma cascata de eventos moleculares responsáveis por amplificar e converter o sinal inicial em respostas intracelulares específicas. Esse processo envolve a atuação de moléculas sinalizadoras, como íons cálcio, espécies reativas de oxigênio (ROS), fitormônios e proteínas quinases, as quais modulam a expressão gênica e promovem alterações bioquímicas e morfofisiológicas nas células vegetais (Souza, 2012; Taiz et al., 2017; Vinocur & Altman, 2005).

Dessa forma, plantas capazes de ativar mecanismos adaptativos eficientes frente aos estresses ambientais estão sujeitas a pressões seletivas que direcionam o processo de adaptação evolutiva. Tais mecanismos, ao conferirem maior plasticidade fisiológica, permitem a sobrevivência, crescimento e reprodução mesmo sob condições adversas. Contudo, quando essas respostas não são suficientemente

eficazes para garantir a homeostase e o funcionamento celular, a aptidão ecológica da espécie é comprometida, restringindo sua distribuição geográfica e ecológica naquele ambiente (Ricklefs, 2003).

A variabilidade genética presente entre os organismos vegetais permite que os indivíduos se distribuam por diversos ambientes do globo terrestres, todavia, dentro de um mesmo genótipo pode-se notar alterações de diversos atributos com intuito de melhorar o desenvolvimento do indivíduo, as chamadas adaptações (Aoyama & Mazzoni-Viveiros, 2006; Grando, 2008).

As modificações em plantas podem ser divididas de duas maneiras em aclimatativas e adaptativas. As alterações aclimatativas representam mudanças temporárias na morfologia e/ou fisiologia, sendo reversíveis quando as condições se alterarem (Taiz et al., 2017). Já as alterações adaptativas são de ordem genética sendo formadas a partir das pressões ambientais seletivas ao longo de muitas gerações (Barreto & Barbosa, 2001; Taiz et al., 2017)

Com relação aos estresses abióticos estes podem ser de ordem química ou física, podendo variar ao longo do tempo e da localização geográfica. Diversos são os fatores abióticos que afetam o desenvolvimento vegetal, dentre eles cita-se: a luz (intensidade, qualidade e duração), a água (disponibilidade no solo e umidade), conteúdo e disponibilidade de nutrientes no solo, dióxido de carbono, oxigênio, temperaturas e toxinas (Taiz et al., 2017).

Os estresses causados por fatores abióticos são considerados os problemas que mais limitam a produtividade das culturas agrícolas em todo o mundo, reduzindo o rendimento médio em mais de 50% (Croteau et al., 2000; Elashamly & Nassar, 2023; Filippou et al., 2014; Lobell et al., 2011; Munns et al., 2011; Staniak et al., 2023). Em cana-de-açúcar o déficit hídrico pode causar perdas de até 73% (Basnayake et al., 2012; Dias & Sentelhas, 2018; Gentile et al., 2015; Jacomassi et al., 2024; Verma et al., 2021; Rani et al., 2024).

O déficit hídrico é considerado um dos principais estresses abióticos. Nota-se que esse problema tende a se intensificar devido a maior frequência de ocorrência de períodos de seca associado ao aumento da temperatura média do planeta. Além disso, tem se observado a expansão das lavouras para regiões marginais (Ahamed et al., 2019; Parry, 2019). Como consequência constata-se menor desenvolvimento das cultura e conseqüentemente menor rendimento produtivo (Ahmad et al., 2016; Silveira et al., 2010).

Segundo Artlip & Wisniewski (2002) a resistência ao estresse hídrico pode ser expressa de quatro maneiras diferentes, são elas: a) redução do crescimento como forma de reduzir a demanda por água; b) adaptações morfológicas; c) adaptações fisiológicas; e d) alterações metabólicas.

Alguns estudos revelam que essas respostas ao estresse variam de acordo com a fase fenológica da cultura (Inman-Bamber & Smith, 2005; Machado et al., 2009; Pimentel, 2004). No entanto, Härter (2018) comparando variáveis associadas ao déficit hídrico em diferentes fases verificou que há correlação positiva de aproximadamente 70% entre seleções praticadas na fase de plântula e na adulta.

A cana-de-açúcar possui certa tolerância ao déficit hídrico por conta de seu metabolismo C4 que otimiza a utilização de água em ambientes secos (Zingaretti et al., 2012). Todavia, o déficit hídrico é um dos principais fatores responsáveis pela perda de produtividade dos canaviais, uma vez que aproximadamente 70% da massa da planta é composta por água e os 30% restantes por matéria seca (Basnayake et al., 2012; Silva et al., 2008b; Vianna & Sentelhas 2014). A importância do déficit hídrico se torna ainda mais evidente ao se observar os dados do IEA (2015) que indicam que em cerca de 80% das áreas de cultivadas com cana no Brasil, a demanda hídrica mínima não é suprida.

Diante da importância desse estresse para as culturas, o melhoramento genético da cana-de-açúcar possui dentre os diversos enfoques, a obtenção de variedades tolerantes ao déficit hídrico, que pode favorecer o aumento na produtividade das lavouras brasileira (Basnayake et al., 2012; Morais et al., 2015a).

O melhoramento genético da cana-de-açúcar se inicia pela hibridação de genitores selecionados, que possuam as características de interesse, sendo necessário realizar a caracterização prévia dos materiais para estimar variabilidade genética e os parâmetros genéticos dos indivíduos (Morais et al., 2015a). O conhecimento acerca dos materiais genéticos permite o planejamento dos cruzamentos, buscando agrupar caracteres de interesse e explorar a heterose (Morais et al., 2015a).

A seleção dos germoplasmas representa uma etapa fundamental no melhoramento genético uma vez que diversos estudos já indicam a existência de variabilidade genética passível de ser explorada para a resistência ao déficit hídrico (Basnayake et al., 2012; Hemaprabha et al., 2004; Hemaprabha et al., 2006;

Hemaprabha et al., 2013; Inman-Bamber & Smith, 2005; Smit & Singels, 2006; Machado et al., 2009)

De acordo com Câmara et al. (2007) buscando selecionar genótipos de milho tolerantes ao déficit com base em parâmetros produtivos verificaram que as variáveis analisadas não são eficientes para avaliação, devido ao alto efeito da variância ambiental sobre a variância genotípica. Desta maneira, a seleção de genótipos com base em caracteres secundários associados com a tolerância ao déficit hídrico torna-se a ferramenta mais adequada para obtenção de novas variedades de cana-de-açúcar (Cushman & Bohnert, 2000).

Para desenvolver genótipos tolerantes aos estresses, é necessário entender os efeitos causados nas plantas, bem como suas possíveis respostas sob essas condições.

O estabelecimento dos estresses em plantas pode ser dividido nas seguintes fases de acordo com Larcher (2000): fase alarme, fase de resistência, fase final (Estádio de exaustão) e fase de regeneração. A velocidade de resposta ao estresse pode variar de segundos, minutos ou mesmo horas (Bray, 1997).

A fase de alarme é caracterizada pelo início do estresse, portanto ocorre um desequilíbrio das condições normais. Essa etapa é caracterizada pela perda de estabilidade de membranas e desequilíbrio dos processos celulares vitais, portanto, a atividade catabólica excede a anabólica, podendo tornar-se irreversível para casos maior intensidade (Larcher, 2000; Taiz et al., 2017)

A etapa de resistência representa o início dos processos de adaptação ao agente estressor quando não ocorrem alterações na intensidade do mesmo, portanto são desencadeados processos de reparo como a síntese proteica e/ou síntese “de novo” de substância protetoras (Larcher, 2000; Taiz et al., 2017).

Na fase final, caso não ocorra o reestabelecimento do desenvolvimento vegetal, seja pela atividade metabólica ou devido a mudanças no ambiente de desenvolvimento, pode ser desencadeado um estado de exaustão que acarretará a redução dos sistemas de defesa vegetal, tornando a planta susceptível ao ataque de patógenos e possivelmente acarretará um colapso prematuro (Bianchi et al., 2016; Larcher, 2000, Taiz et al., 2017).

Por fim, ocorre a fase de regeneração, onde ocorre a recuperação parcial ou completa das funções fisiológicas, quando o agente estressor é removido e/ou superado, favorecendo a recuperação dos danos (Larcher, 2000; Bianchi et al., 2016).

Outro ponto importante a ser destacado refere-se ao tipo de tolerância ao déficit hídrico. A redução do potencial hídrico do solo pode ser suportada pelas plantas de duas maneiras, através prevenção da desidratação e/ou por meio da tolerância a queda no potencial hídrico dos tecidos, podendo esses mecanismos ocorrerem de forma isolada ou simultânea (Blum, 2005; Kooyers, 2015; Levitt, 1972; Taiz et al., 2017).

A prevenção da desidratação refere-se aos mecanismos capazes de manter o status hídrico elevado na folha, seja pelo aumento na taxa de absorção de água ou pela redução da condução estomática (Blum, 2005; Kooyers, 2015). Desta maneira, a tolerância a desidratação engloba mecanismos que favorecem a manutenção das funções vegetais sob condições de estresse (Blum, 2005).

Normalmente a primeira resposta das plantas sob déficit hídrico evitar a desidratação dos tecidos, através de mecanismos que mantenham o conteúdo de água em níveis próximos ao adequado (Verslues et al., 2006).

A curto prazo, o fechamento estomático pode representar um mecanismo eficiente no combate a perda de água, e é considerada uma das primeiras respostas a redução do potencial hídrico vegetal (Verslues et al., 2006; Bohnert & Jensen, 1996). Desta maneira, a redução do potencial hídrico foliar se torna uma variável possível de ser avaliada para descrever o efeito da seca sobre os diferentes genótipos.

A síntese e a atividade de ácido abscísico são parâmetros importantes de serem avaliados devido seu efeito na abertura e no fechamento estomático (Bray, 1997; Taiz et al., 2017). Esse mecanismo é considerado fundamental para manutenção do turgor celular e funcionamento do metabolismo secundário sob condições de déficit hídrico (Yamaguchi-Shinozaki & Shinozaki, 2005).

O ácido abscísico é o principal fitormônio associado a tolerância a seca devido seu papel no controle da abertura e fechamento estomático, redução do crescimento foliar e caulinar, aprofundamento do crescimento radicular, aumento da condutividade hidráulica das raízes manutenção do potencial osmótico, produção de proteínas antioxidantes, redistribuição de assimilados e indução da senescência (Han & Yang, 2005; Taiz et al., 2017; Yamaguchi-Shinozaki & Shinozaki, 2005)

Apesar do metabolismo C4 favorecer a maior eficiência de fixação do carbono sob déficit hídrico, diversos trabalhos indicam que o fechamento estomático por longos períodos está associado a alterações nas distribuições de carbono e nitrogênio, reduções da taxa fotossintética e respiratória, menor concentração interna de CO₂,

modificações no fluxo de água e nutriente, que resultam em menor desenvolvimento da cultura (Basnayake et al., 2015; Bohnert & Jensen, 1996; Gonçalves et al., 2010; Lawlor & Tezara, 2009; Medeiros et al., 2013; Sales et al., 2012; Yordanov et al., 2003).

De acordo com Inman-Bamber & Smith (2005) e Inman-Bamber et al. (2012), além das alterações fisiológicas citadas, as respostas mais comuns ao déficit hídrico em cana-de-açúcar são o enrolamento foliar, fechamento estomático, senescência foliar, redução de área foliar, inibição do crescimento de caule e folhas, interrupção do alongamento, presença de tricomas e reduções na divisão celular. Todavia, a longo prazo, nota-se que há maior tendência no desenvolvimento de crescimento radicular, visando manter o suprimento adequado de água para a planta (Verslues et al., 2006).

Plantas que possuem plasticidade fenotípica, com capacidade de alterar atributos radiculares como biomassa, comprimento, densidade e profundidade, geralmente são mais tolerantes a dessecação por conseguirem extrair maiores quantidades de água do solo (Cury et al., 2014; Lisson, 2005; Vasconcelos et al., 2010).

Outra característica que favorece a manutenção do turgor celular está associada ao acúmulo de solutos, que auxiliam no ajuste osmótico das plantas (Carlin & Santos, 2009). Neste mecanismo de tolerância, o metabolismo vegetal realiza a biossíntese e acúmulo de solutos compatíveis no citosol e/ou vacúolo, e, portanto, atuam como osmoprotetores, e auxiliam na manutenção do equilíbrio hídrico, além de proteger proteínas, enzimas e membranas contra danos, garantindo a continuidade de atividades vitais. Devido às suas funções, essas substâncias são consideradas diferenciais para superação de diversos estresses (Abdul Jaleel et al., 2007).

De acordo com Verslues (2006) alguns artifícios são coordenados pelas plantas visando evitar a desidratação dentre eles o acúmulo de solutos e enrijecimento da parede celular. O ajustamento osmótico, através do acúmulo de solutos é considerado uma das principais respostas ao déficit hídrico, podendo ser utilizado com parâmetro para seleção de genótipos tolerantes a seca (Farooq et al., 2009). Com o acúmulo de solutos, ocorre a redução potencial osmótico e conseqüentemente do potencial hídrico, que resultará na entrada de água para o interior celular (Farooq et al., 2009).

Diversos autores têm selecionado variedades de cana-de-açúcar com base na capacidade de ajustamento osmótico como Carlin & Santos (2009); Queiroz et al. (2008) e Silva (2010). Segundo Farooq et al. (2009) o ajuste osmótico, a

osmoproteção, o metabolismo antioxidante e o sistema de defesa por eliminação são os principais aspectos que contribuem para a tolerância ao déficit. Diversas substâncias osmoprotetoras são conhecidas, dentre elas destacam-se a trealose, a glicina betaína e prolina (Carlin & Santos, 2009).

A prolina é um aminoácido sintetizado a partir da reação do ácido L-glutâmico via Δ^1 -pyrroline-5-carboxylate (P5C) catalisado pelas enzimas, P5C sintetase (P5CS) e P5C redutase (P5CR) que é desencadeada sob condições estresse hídrico. Durante esse processo ocorre a paralização da produção de proteína e aumento da proteólise, que por consequência gera maior conteúdo aminoácidos celulares como a prolina (Mittler, 2002). Este aminoácido é considerado osmólito chave para o ajuste osmótico, tendo destaque ainda como osmólito compatível em condições de déficit hídrico (Delauney & Verma, 1993; Mittler, 2002; Sodek, 2004).

Diante dessa importância, diversos autores avaliando plantas submetidas ao déficit hídrico sugerem a prolina como bom indicador para tolerância ao déficit hídrico, inclusive em variedades de cana-de-açúcar (Carlin & Santos, 2009; Kumar et al., 2011; Lum et al., 2014; Queiroz et al., 2008)

Com o prolongamento do período sob estresse hídrico, diferentes mecanismos precisam ser ativados com o intuito de tolerar os efeitos da desidratação, visto que todas as alternativas para impedir a perda de água não foram capazes de impedir a redução do status hídrico vegetal (Reddy et al., 2004).

As plantas submetidas a períodos prolongados de seca têm reduções na taxa fotossintética, devido a reduções nas trocas gasosas decorrentes do fechamento estomático pelo acúmulo de ácido abscísico (Taiz et al., 2017). Com a desidratação ocorre o desacoplamento dos fotossistemas e os elétrons livres deixam de ser transferidos para o NADP⁺ e passam para o oxigênio, formando as espécies reativas de oxigênio (EROs) (Taiz et al., 2017).

As EROs são moléculas altamente reativas geradas pela redução parcial do oxigênio, ocorrendo principalmente nas mitocôndrias, plastídios, peroxissomos e na parede celular (Taiz et al., 2017). Embora as EROs sejam continuamente produzidas durante os processos de respiração e fotossíntese nas plantas, mecanismos antioxidantes enzimáticos e não enzimáticos regulam suas concentrações para níveis não prejudiciais às células (Soares & Machado, 2007; Mittler, 2002). Além disso, as ERO atuam como moléculas sinalizadoras em processos de desenvolvimento e crescimento vegetal (Hung et al., 2005; Del Río et al., 2006).

Todavia, sob condições de estresse, ocorre um desequilíbrio entre a formação e a eliminação das EROs, gerando um acúmulo que por consequência acarretada danos às células. Em relação aos feitos das EROs, destaca-se a rápida reação de oxidação de diversos constituintes celulares por essas moléculas, dentre eles proteínas, DNA, RNA e lipídeos (Taiz et al., 2017). Desta maneira, pode-se dar início a um processo autocatalítico de oxidação de membranas, causando a degradação de organelas e da membrana plasmática (TAIZ et al., 2017). Dentre as formas de mais comuns de EROs em vegetais destacam-se: o superóxido ($O_2^{\cdot-}$); o oxigênio singletto (1O_2), peróxido de hidrogênio (H_2O_2) e radicais hidroxila (OH^{\cdot}) (Taiz et al., 2017)

A primeira linha de defesa dos vegetais contra os efeitos deletérios das ERO são os mecanismos de detoxificação, que podem ser tanto enzimáticos quanto não enzimáticos (Gratão et al., 2005). O complexo antioxidante não enzimático é composto por determinados lipídios de membrana, tocoferol (Vitamina E), glutathione (GSH), ascorbato (Vitamina C), β -caroteno (Barbosa et al., 2014; Noctor & Foyer, 1998; Foyer & Noctor, 2009). Efeitos positivos da prolina também podem ser notados na proteção de membranas contra os efeitos citotóxicos das EROs (Sharma & Dubey, 2005). Já o metabolismo antioxidante não enzimático é composto principalmente pela superóxido dismutase (SOD), a ascorbato peroxidase (APX), a glutathione peroxidase (GR), as peroxidases (POD), a catalase (CAT) e polifenoloxidasas (Barbosa et al., 2014; Noctor & Foyer, 1998).

Devido a severidade dos danos decorrentes do acúmulo de níveis elevados de EROs, a quantificação da eficiência dos mecanismos de desintoxicação torna-se uma ferramenta fundamental e efetiva na seleção de variedades de cana-de-açúcar tolerante ao déficit hídrico, sendo empregada em diversos trabalhos (Boaretto et al., 2014; Cia et al., 2012; Gomathi & Rakkiyapan, 2011; Morais et al., 2018; Morais et al., 2020 Vilela et al., 2017).

As avaliações do sistema antioxidante podem ser realizadas pela quantificação de enzimas e não enzimas ou indiretamente por meio da análise do acúmulo de malondialdeído (MDA), que indica o nível de danos às membranas (Gratão et al., 2005; Masia, 2003). Com isso, reflexos podem ser observados na taxa fotossintética, já que as EROs causam danos às membranas de pigmentos fotossintetizantes (Nxele et al., 2017; Silva et al., 2014).

Diversos trabalhos já comprovaram respostas diferenciadas entre variedade de cana-de-açúcar às espécies reativas de oxigênio, viabilizando a seleção de genótipos

de acordo com a eficiência do metabolismo antioxidante (Boaretto et al., 2014; Cia et al., 2012; Gomathi & Rakkiyapan, 2011; Jacomassi et al., 2024; Morais et al., 2018; Morais et al., 2020; Teixeira et al., 2022 Vilela et al., 2014).

3.5. Enzimas antioxidantes

Para que as plantas pudessem se adaptar ao ambiente terrestre, foi necessário que desenvolvessem mecanismos de tolerância capazes de permitir o crescimento mesmo diante dos diversos estresses a que poderiam estar expostas. Entre os principais desafios, destaca-se o déficit hídrico (Pimentel, 2004).

Nos dias atuais, o déficit hídrico é considerado o principal fator limitante da produtividade das plantas, afetando o crescimento e a produção agrícola. Estudos indicam que 90% das terras agricultáveis no mundo são afetadas pela seca (Fathi & Tari, 2016). Entre os principais efeitos do déficit hídrico estão a redução no desenvolvimento e produtividade das culturas, podendo em casos mais severos levar à morte das plantas.

Atualmente, a cana-de-açúcar é cultivada em diversas partes do mundo e o déficit hídrico é considerado o principal fator limitante da produtividade, sendo responsável por perdas de até 60% (Basnayake et al., 2012; Ferreira et al., 2017).

Diante desse cenário, encontra-se na literatura diversos estudos buscando estratégias de manejo visando reduzir as perdas de produtividade decorrente da seca, dentre eles cita-se: adoção de irrigação (Ascoli et al., 2021; Vianna & Sentelhas, 2014), aplicação de bioestimulantes (Costa et al., 2011; Torsian et al., 2020), aminoácidos, dentre outros produtos e manejos (Ferreira et al., 2017; Maia Júnior et al., 2021; Zilliani, 2015). Todavia, essas estratégias de manejo possuem impactos ambientais, e nos custos de produção da cultura.

O melhoramento genético vegetal tem contribuído significativamente com a obtenção de variedades com maior tolerância a estresses abióticos, ganho de produtividade, melhoria da qualidade da matéria-prima e tolerância a pragas e doenças (Barbosa et al., 2005).

A exposição de plantas a condições adversas, promove o aumento na síntese de EROs (Morais et al., 2018). Sob condições de déficit hídrico, a eficiência do metabolismo antioxidante tem sido associada a tolerância de variedades, sendo

inclusive adotado por melhorista como critério de seleção de materiais genéticos promissores (Boaretto et al., 2014; Cia et al., 2012; Vilela et al., 2017).

A depender dos níveis celulares, as EROs podem atuar como moléculas sinalizadoras, importantes para o desenvolvimento vegetal, quando em baixas concentrações ou causar danos às estruturas celulares quando os níveis se tornam elevados (Soares & Machado, 2007).

Os principais locais de formação das EROs são mitocôndrias, cloroplastos e peroxissomos (Karuppanapandian et al., 2011). As principais EROs conhecidas atualmente são radical superóxido ($O_2^{\bullet-}$), peróxido de hidrogênio (H_2O_2), radical hidroxila (HO^{\bullet}) e oxigênio singlete (1O_2). Normalmente, a formação dessas moléculas ocorre devido a sucessivas adições de elétrons à molécula de oxigênio, ou ainda devido a sua excitação (Barbosa et al., 2014).

Quando em elevados níveis, espécies reativas de oxigênio causam danos irreversíveis ao metabolismo vegetal, devido a oxidação de lipídeos das membranas, danos ao DNA e oxidação de proteínas (Carlin et al., 2012; Sales et al., 2013).

Em condições normais de desenvolvimento, há equilíbrio entre a formação e o consumo das EROs. Todavia, quando há algum fator causador de estresse ao vegetal, a formação supera a neutralização, dando início ao denominado estresse oxidativos (MITTLER, 2002; MILLER et al., 2010).

Em tais condições, nota-se aumento da atividade do metabolismo antioxidante, podendo este ser dividido em duas classes, o enzimático e o não enzimático. Ambas as classes atuam no combate às espécies reativas de oxigênio. No sistema antioxidante não enzimático destacam-se: ascorbato, alcalóides, flavonóides, glutathione, compostos fenólicos, prolina, glicina betaína, tocoferol e carotenóides (Gratão et al., 2005). Essas moléculas possuem ainda função osmorreguladora e osmoprotetora, atuando na estabilidade das membranas, reduzindo os danos do estresse oxidativos (Hoque et al., 2008).

No sistema de defesa antioxidante enzimático destacam-se a superóxido dismutase (SOD, EC 1.15.1.1), ascorbato peroxidase (APX, EC 1.11.1.11), glutathione reductase, peroxidases (EC 1.11.1.7), catalase (CAT, EC 1.11.1.6) e polifenoloxidase (El-Beltagi & Mohamed, 2013; Miller et al., 2010; Mittler, 2002).

A superóxido dismutase (SOD) está presente em plantas de três configurações isoenzimáticas distintas, sendo elas: Cu/Zn (Cu/Zn-SODs), Fe (Fe-SODs) e Mn (Mn-SODs) (Bowler et al., 1991). As Mn-SODs estão localizadas em mitocôndrias e

peroxissomos, já as Cu/Zn-SODs são encontradas em mitocôndrias, cloroplastos e peroxissomos (Del Rio et al., 2002). As Fe-SODs estão localizadas no cloroplasto de algumas plantas (Alscher et al., 2002; Ferreira et al., 2002).

A SOD é considerada a primeira linha de defesa vegetal contra as EROs, catalizando a reação de dismutação do $O_2^{\bullet-}$ em H_2O_2 e O_2 (Polle, 2001; Zelko et al., 2002).

Diversos autores têm relatado aumento da atividade da SOD associada a maior tolerância de variedades de cana-de-açúcar a seca (Hemaprabha et al., 2004; Jain et al., 2015; Sales et al., 2015; Santos et al., 2015). Sales et al. (2013) verificaram que a maior atividade da SOD na variedade IACSP94-2094 foi responsável pela mais rápida recuperação da taxa fotossintética após déficit hídrico. Jangpromma et al. (2012) concluíram ainda que variedades tolerantes à seca possuem maior atividade da SOD quando em condições de déficit hídrico.

A catalase (CAT, EC 1.11.1.6) é uma classe de enzimas que ficam localizadas nos peroxissomos e são responsáveis catalisar a oxidação do H_2O_2 a H_2O e O_2 (MITTLER et al., 2002). A CAT é responsável por converter as EROs formadas pela β -oxidação de ácidos graxos e/ou durante a fotorrespiração em água e oxigênio molecular (Holtman et al., 1994; Igamberdiev & Lea, 2002). Por possuir baixa afinidade pelo H_2O_2 , a reação da CAT com as EROs normalmente ocorre em condições de estresse oxidativos (Mittler, 2002; Gratão, 2005).

Morais et al. (2018) verificaram em variedades de cana-de-açúcar submetidas ao déficit hídrico e salino, menores reduções do peso fresco e do teor de clorofila, quando ocorreram aumentos na atividade das enzimas catalase e ascorbato peroxidase.

As peroxidases (POX, EC 1.11.1.7) são enzimas do grupo das oxirredutoras, responsáveis pela eliminação de H_2O_2 citotóxicos, portanto, possuem papel fundamental no equilíbrio redox (Mittler, 2002).

Ngamhui et al. (2015) avaliando variedades comerciais de cana-de-açúcar tolerantes e suscetíveis ao déficit hídrico associaram o melhor desempenho de determinados materiais sob tais condições devido ao aumento da atividade da ascorbato peroxidase e da peroxidase.

A determinação da eficiência do metabolismo antioxidante seja ele enzimático ou não enzimático, pode ser realizada através da determinação do conteúdo de malondialdéido (MDA). Essa variável é considerada um marcador para seleção de

genótipos, pois indica o nível de peroxidação lipídica da membrana celular (Sharma et al., 2012).

Sob condições de estresse biótico ou abiótico, dentre eles, o déficit hídrico, verifica-se o aumento dos níveis de MDA, sendo tais critérios utilizados para seleção genotípica, onde menores conteúdos indicam maior tolerância (Morais et al., 2018).

Morais et al. (2018) verificaram que as resposta do metabolismo antioxidante em variedades de cana-de-açúcar tolerante ao déficit hídrico foi mais eficiente no combate às EROs, diante disso, pode-se inferir que em tais materiais, houveram menores danos estruturais tanto às células quanto ao aparato fotossintético, refletindo maior desenvolvimento.

3.6. Análise de Componentes Principais

Os programas de melhoramento genéticos de cana-de-açúcar possuem em seu Banco Ativo de Germoplasma milhares de materiais genéticos, com elevada variabilidade genética, incluindo diferentes espécies do gênero *Saccharum* que são capazes de se inter cruzarem (Barbosa et al., 2005). Essa demanda ocorre devido a necessidade em se ter disponível variabilidade genética que possibilite recorrer para superar adversidade bióticas e abióticas que surgem ao longo dos anos, bem como melhorar características produtivas e industriais das variedades que se têm cultivadas atualmente (Morais et al., 2015).

Os cruzamentos direcionados por melhoristas têm como objetivo suprir as necessidades do setor e melhorar parâmetros relacionados à produtividade e qualidade da matéria-prima. Entre esses parâmetros estão: tolerância a pragas e doenças, tolerância a estresses abióticos, adaptação à colheita mecanizada, aumento do teor de sacarose, alta produção de biomassa e etanol. Para alcançar esses objetivos, são trabalhados aspectos relacionados à biotecnologia, ciência do solo, nutrição de plantas, climatologia, fisiologia, patologia, entomologia, economia, entre outros (Morais et., 2015).

Para as variedades de cana-de-açúcar cultivadas atualmente, observa-se uma maior contribuição para a formação do genoma das espécies *S. officinarum* e *S. spontaneum*. As *S. officinarum* são consideradas canas nobres, capazes de acumular altos teores de sacarose no colmo. Já as *S. spontaneum* se destacam pela maior

rusticidade, capacidade de perfilhamento e tolerância a pragas e doenças. (Morais et al., 2015; Garsmeur, 2017).

As principais características avaliadas por melhoristas para a obtenção de variedades de cana-de-açúcar são poligênicas. Isso significa que diversos genes estão associados às características de interesse (Capone et al., 2011; Michereff, 2001; Pedrozo et al., 2011). Desta maneira, ao selecionar um material genético, torna-se necessário avaliar várias características que, em conjunto, definirão o genótipo desejado. No caso da tolerância ao déficit hídrico, por exemplo, Larcher (2000) associa as variações observadas a fatores morfológicos, fisiológicos, bioquímicos e metabólicos, cada um subdividido em subparâmetros (Carlin & Santos, 2009; Ecco et al., 2014; Maia Júnior et al., 2018; Morais et al., 2018).

Além disso, tais características são altamente influenciadas pelo ambiente, fazendo com que possuam alta variabilidade fenotípica decorrente da variabilidade ambiental (Silva et al., 2015). Diante dessas considerações, fica evidente que tais análises e avaliações, com objetivo de selecionar materiais promissores se tornam complexas, demandando tempo, mão-de-obra e portanto, onerosas.

Para isso, as estratégias de estatística multivariada vêm sendo adotadas para analisar as diferentes características associadas ao objeto de seleção e, interpretar simultaneamente os diversos conjuntos de dados obtidos a partir das avaliações, sendo possível estabelecer relações entre elas (Hair et al., 2009; Resende, 2007).

A análise multivariada possui diversos métodos e técnicas que auxiliam na interpretação teórica de um conjunto de dados obtidos de experimentos (Moita Neto, 2004). No caso de análises em que o objetivo é apenas realizar inferências estatísticas, podem ser utilizados os métodos de teste de hipóteses, estimação de parâmetros, as análises de variância, covariância e regressão multivariada (Mingoti, 2007).

Para análises exploratórias com grandes volumes de dados, e onde se deseja sintetizar informações sem perder a qualidade dos dados, a literatura oferece diversas ferramentas. Entre elas estão: análise fatorial, análise de correlação canônica, análise de agrupamento, análise discriminante, análise de correspondência e análise de componentes principais.

A análise de componentes principais, termo oriundo do inglês Principal Component Analysis (ACP), é uma técnica de estatística multivariada utilizada para identificar inter-relações entre um grande número de variáveis de acordo com suas

dimensões individuais. A ACP se destaca como uma ferramenta relevante na seleção de genótipos devido a capacidade avaliar simultaneamente vários parâmetros e as correlações entre os dados avaliados (Hair et al., 2009)

Para isso, nesta ferramenta, os conjuntos de dados originais são transformados em um conjunto menor, denominados componentes principais (chamado também de CPs), que não estão correlacionadas. Todavia, os dados resumidos devem preservar as informações dos dados originais e não podem ocasionar perda de informações relevantes (Hongyu et al., 2015; Leite et al., 2016).

Para interpretação dos resultados, os CPs são convertidos em valores numéricos, denominados escores, que são estimados individualmente e agrupados de acordo com sua variância e com os demais indivíduos dentro da população amostral (Barbosa et al., 2013). Desta maneira, se torna possível realizar o agrupamento dos indivíduos de acordo com a variação de suas características (Barbosa et al., 2013). A partir dos resultados, são construídos planos onde os eixos ortogonais são os componentes principais, onde o primeiro plano é composto pelos 1º e 2º CPs, denominado plano principal, que possui a maior parte das informações (Araújo & Coelho, 2009; Vianna et al., 2013). Todavia, caso esses planos não sejam capazes de abarcar a maior proporção da variação total dos dados, é necessário examinar os demais planos, também denominados planos complementares.

Atualmente, a técnica de componentes principais para agrupamento de genótipos e avaliação da contribuição das variáveis para a variabilidade dos dados tem sido utilizada em diversas áreas e culturas, auxiliando pesquisadores e melhoristas nos trabalhos de seleção materiais promissores.

Assunção Filho et al. (2022) avaliando variedades criouladas de feijão-fava, adotaram a diferentes análises multivariadas, incluindo a ACP para identificação de relações entre raças potenciais do grupo “Boca de moça”, e com isso selecionar materiais agronomicamente superiores para agricultores e consumidores. Diante destes resultados, o tornou-se possível direcionar os cruzamentos entre materiais com maiores distâncias genéticas, bem como verificar aqueles que possuem características complementares.

Em cana-de-açúcar, diversos trabalhos vêm sendo conduzidos adotando análises de componentes principais, buscado identificar variáveis de maior variância e aquelas que mais contribuem com o objeto de estudo. Ruhoff et al. (2009) avaliando variáveis associadas à evapotranspiração em cana-de-açúcar no cerrado,

identificaram que a variação da oferta de energia, o processo de circulação atmosférica local, e as condições da vegetação, explicam 75 e 82% da variância dos dados, concluindo que estes são principais fatores associados a perda de água para a atmosfera.

Lopes et al. (2014) avaliando a divergência genética entre clones de cana-de-açúcar para direcionamento de cruzamentos em programas de melhoramento genético identificaram que os CPs 1 e 2 explicaram 96% da divergência genética encontrada, além disso, possibilitou a identificação dos materiais com maior divergência genética. Sendo as características: quilograma de brix por parcela, seguida por brix, massa de 10 colmos e número de colmos por parcela, as variáveis que mais contribuíram com a divergência genética. Diante destes resultados, têm-se a possibilidade, no melhoramento genético da cana, a recombinação de clones com maior divergência e maior produtividade com intuito de obter melhores indivíduos.

Ongala et al. (2016) adotando estratégias de análise multivariada para selecionar variedades de cana-de-açúcar com base em características fenotípicas de maior variabilidade genética identificou que das 19 características apenas 10 possuem relevância para o melhoramento genético, explicando cerca de 80,8% da variabilidade genéticas. Desta forma, as demais características podem ser descartadas por conta da similaridade entre variáveis e baixa relevância, reduzindo custos relacionados com a seleção dos materiais.

Trabalhos também estão sendo conduzidos buscando identificar variância genética associada a tolerância a doenças, como Mehareb (2020) analisando a variabilidade de características para tolerância a broca da cana-de-açúcar e doenças como carvão, estrias e mosaico em 18 genótipos de cana-de-açúcar e identificaram que % de colmo perfurados, % de entrenós perfurados, comprimento dos colmos, açúcar recuperável e rendimento de açúcar foram os mais relevantes no que se refere a variação genética. Por esse trabalho, foi possível estabelecer correlações positiva entre altura de planta e diâmetro do colmo, com a produtividade. De maneira contrária, ocorrência de estria, carvão, mosaico e broca, foi negativamente correlacionado com produtividade, rendimento de açúcar, % de sacarose, % pureza e % de recuperação.

3.7. Modelos Lineares Mistos

Os modelos estatísticos foram desenvolvidos com intuito de explicar respostas de uma variável dependente associadas diferenças atribuídas a uma outra série de

variáveis independentes. Esses efeitos podem ser denominados como fixos ou aleatórios (Searle et al., 1992)

Os efeitos fixos são aqueles onde o conjunto de tratamentos ou níveis são finitos e, portanto, as inferências ficam restritas aos fatores avaliados (Searle et al., 1992). Em relação aos fatores aleatórios, as inferências são realizadas sobre a população na qual o conjunto infinito de tratamentos foram aplicados. Diante da natureza dos dados, fixa e/ou aleatória, define-se qual o modelo estatístico apropriado para interpretação dos dados.

Para Duarte e Venconsky (2001) em programas de genética e melhoramento vegetal, os genótipos podem ser trabalhados considerando-os como efeitos aleatórios, enquanto que os demais fatores avaliados, devem ser fixos.

Com a evolução de sistemas computacionais, tornou-se possível desenvolver softwares estatísticos cada vez mais robustos, com capacidade de processar informações e metodologias de análise de dados mais complexas e robustas, capazes de trazer informações mais detalhadas e precisas (Resende et al., 2012).

A Análise de Variância (ANOVA) é um método de análise estatística utilizada para testar igualdade entre três ou mais médias populacionais com base na análise das variâncias amostrais. Apesar das contribuições já proporcionadas por tal metodologia, existem limitações como incapacidade de trabalhar com parcelas perdidas e possibilidade de avaliar apenas um efeito aleatório (Kutner et al., 2004)

Henderson (1949) desenvolveu a metodologia de Modelos mistos, inicialmente destinada a avaliação de bovinos, no entanto, foi apenas em 1973 que este mesmo autor, divulgou tais estudos, passando a ter maior visibilidade após 1982, impulsionado pelo aumento de capacidade dos processadores computacionais (Henderson, 1973; Resende, 2002).

A análise de modelos lineares mistos (MLMs), ou somente Modelos Mistos, são adotadas atualmente em estruturas onde se deseja avaliar alguns fatores fixos e aleatórios, ou seja, o modelo possui efeitos fixos e aleatórios, além da média e do erro.

No melhoramento genético vegetal, atualmente, essa metodologia está sendo aplicada em diversas áreas, incluindo seleção de genômica (Resende et al., 2012), análises em multiambientes (Silva et al., 2018), análises de medidas repetidas (Freitas et al., 2011), diversas outras aplicações.

Em relação às culturas aplicadas são encontrados trabalhos em culturas florestais (Missio et al., 2005; Resende et al., 2021; Rosado et al., 2009; Sá e Tambarussi, 2023), seringueira (Arantes et al., 2010); soja (Evangelista et al., 2021; Neitzke et al., 2024), milho (Costa, 2024; Santos et al., 2021), cana-de-açúcar (Bastos et al., 2007, Carvalho et al., 2020), milho (Viana et al., 2010) dentre outras culturas.

A análise de Modelos Lineares Mistos é uma ferramenta estatística que permite estimar simultaneamente efeitos fixos, aleatórios, além do erro. Pode ser descrito pela fórmula geral:

$$y_i = X_i\beta + Z_ib_i + e_i$$

Onde:

$(\beta)_{p \times 1}$: são efeitos fixos

$(b_i)_{q \times 1}$: são efeitos aleatórios

e_i : são resíduos.

O y_i é definido como o vetor de respostas de dimensão n_i , onde $i = 1, 2, 3, \dots, m$, X_i e Z_i são matrizes de delineamento conhecidas, de dimensões $(n_i \times p)$ e $(n_i \times q)$, respectivamente; β é um vetor p -dimensional contendo os efeitos fixos; b_i é um vetor q -dimensional contendo os efeitos aleatórios; e e_i é o vetor de dimensão n_i .

Dentre as vantagens da metodologia de Modelos Lineares Mistos devemos destacar a capacidade de analisar dados distribuídos ao longo do tempo (Kozak & Piepho, 2018), menores erros do tipo I devido a capacidade de se trabalhar com mais de um efeito aleatório (Godoy & Nunes, 2020), capacidade de se trabalhar com parcelas perdidas (Resende, 2007; Pires et al., 2007)

No caso da análise de Modelos Lineares Mistos, diferentemente daquilo que se pratica na ANOVA, os efeitos do modelo não são testados via Teste F e sim pelo teste da razão de verossimilhança (LRT), que pode ser resumido através de um quadro similar ao da ANOVA, mas que é denominado Análise de Deviance (ANADEV), onde a significância é testada pelo qui-quadrado, com um grau de liberdade (Resende et al., 2012).

Em Modelos Mistos, a metodologia RELM/BLUP (Máxima Verossimilhança Restrita/Melhor Predição Linear Não-Viesada) tem sido amplamente utilizada em programas de melhoramento genético. O REML/BLUP foi desenvolvido por Henderson (1975) para avaliações genéticas.

De acordo com Resende (2005), o REML/BLUP é considerado o procedimento ótimo para estimação dos componentes de variância por verossimilhança restrita

(REML) e a predição dos valores genéticos para melhor predição linear não viesada (BLUP).

Em cana-de-açúcar, trabalhos com Modelos Lineares Misto vêm sendo conduzidos visando selecionar variedades sob interação ambiental (Salinas-Ruíz, et al., 2022), avaliação e seleção de famílias (Oliveira et al., 2013; Silva et al., 2013), seleção de famílias de maturação precoce (Oliveira, 2007), tolerância ao frio (Härter et al., 2024), dentre outros.

Portanto, essa metodologia tem se mostrado promissora em programas de melhoramento genético vegetal por conta das vantagens citadas, sendo sua adoção cada vez mais frequente.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Local, Período Experimental e Material Vegetal

O experimento foi conduzido em casa de vegetação climatizada localizada na Unidade de Ensino, Pesquisa e Extensão Campo Experimental Professor Diogo Alves de Melo pertencente ao Departamento de Agronomia da Universidade Federal de Viçosa, no município de Viçosa, em Minas Gerais.

As coordenadas geográficas são: latitude 20°45'45", longitude 42°52'04", com altitude aproximada de 690m. De acordo com a classificação Köppen o clima da região é descrito como Cwa, com temperatura média anual de 20,4°C e pluviosidade de 1251 mm. No entanto, no ambiente do experimento, a temperatura se manteve controlada na faixa de 24 a 34°C, mediante ao uso de exaustores e aquecedores.

O período experimental foi de 30 de setembro de 2022 a 30 de janeiro de 2023. Foram selecionadas 30 variedades para avaliação conforme a relevância destas para a canavieira nacional. Foram elas: RB92579, SP80-1842, RB98710, RB966928, RB867515, CTC 2, RB965902, SP77-5181, RB855453, RB097217, SP80-1816, RB108519, RB975242, SP81-3250, RB72454, RB988082, CTC 4, RB127825, RB855536, RB855156, RB985476, SP80-3280, CTC 9002, CTC 9003, RB975033, VAT90-212, CT022994, RB056380, RB056351 e RB975201. Estas variedades compõem o campo varietal presente na Unidade de Ensino, Pesquisa e Extensão Professor Clibas Vieira, Viçosa – MG (UEPE – Aeroporto).

Para produção das mudas, o terço médio de canas com idade de 8 a 12 meses foram seccionados para retirada dos minitoletes com tamanho de 3 – 5 cm, contendo a gema e parte do entrenó.

Posteriormente, estas mudas foram tratadas termicamente a 52,5°C durante 30 minutos, após esse procedimento, os toletes foram resfriados ao ar livre e posteriormente foram submersos em solução contendo fungicida.

Em seguida, foi realizado o plantio em substrato comercial (Carolina Soil®) onde permaneceram por 30 dias.

Após esse período, o broto foi destacado do colmo para que não houvesse interferência do tecido de reserva no desempenho das plantas quando submetidas ao déficit hídrico. Posteriormente, os brotos foram plantados em substrato comercial para enraizamento onde permaneceram por mais 30 dias.

4.2. Condução em solução nutritiva

Após formadas, as mudas foram transferidas para solução nutritiva, onde permaneceram até o momento da retirada das amostras. Para isso, o sistema radicular foi lavado em água corrente para retirada do substrato aderido.

Foi utilizada a solução de Hoagland e Arnon (1950), com pH mantido entre 5,0 e 5,5, através da utilização de HCl ou NaOH, de acordo com a necessidade. Para isso, foi utilizado Medidor de pH Akso® Modelo AK-90 e Condutivímetro Akso® Modelo AK-51.

A solução nutritiva foi composta 136,09 g L⁻¹ de Fosfato Monobásico (KH₂PO₄), 101,11 de g L⁻¹ de Nitrato de Potássio (KNO₃), 236,16 g L⁻¹ de Nitrato de Cálcio (Ca (NO₃)₂.5H₂O), 247,47 g L⁻¹ de Sulfato de Magnésio (MgSO₄.7H₂O), 2,86 g L⁻¹ de Ácido Bórico H₃BO₃; 1,81 g L⁻¹ de Cloreto de Manganês (MnCl₂.4H₂O); 0,10 g L⁻¹ de Cloreto de Zinco (ZnCl₂); 0,04 g L⁻¹ de Cloreto de Cobre (CuCl₂); 0,02 g L⁻¹ de Ácido Molíbdico (H₂MoO₄H₂O); 0,08 g L⁻¹ de Ferro Quelatizado (Fe-EDDHA).

Para evitar os efeitos prejudiciais da depleção de nutrientes sobre o crescimento e desenvolvimento das plantas, as soluções nutritivas foram trocadas semanalmente, e o volume das mesmas nos vasos foi monitorado diariamente e completado quando necessário.

A aclimação das plantas foi realizada através do aumento gradativo da força iônica da solução, utilizando na primeira semana $\frac{1}{4}$ da força total, progredindo para $\frac{1}{2}$ deste valor na segunda semana e por fim, na terceira foi utilizada a solução completa.

Para aeração da solução, foi utilizado um compressor de com capacidade de 200 L, dotado de filtro para retenção de impurezas.

4.3. Indução do déficit hídrico

A simulação do estresse hídrico foi iniciada na quarta semana de cultivo em sistema hidropônico. Para isso, foi utilizado o reagente Polietilenoglicol 6000 (PEG – 6000) que atua reduzindo o potencial hídrico da solução. O PEG é um composto inerte, não iônico, que possui a capacidade de afetar a pressão osmótica, no entanto, não é absorvido pelas plantas devido ao tamanho da molécula (Xing e Wu, 2012).

Foram adotados dois tratamentos, sendo um controle e outro estressado. No tratamento submetido ao déficit hídrico (T1), o déficit hídrico foi induzido reduzindo

gradativamente o potencial hídrico da solução, já no tratamento (T2), as plantas foram conduzidas sem a imposição de nenhum fator estressante. Para isso, adicionou-se PEG 6000 para obtenção de potencial de -0,3 Mpa, posteriormente -0,6 Mpa, em seguida -0,9 Mpa e por fim -1,2 Mpa, com intervalo de 48 horas entre incrementos. O nível do potencial hídrico foi estimado com base na metodologia proposta por Villela et al. (1991). A coleta das amostras se iniciaram 48 horas após indução do estresse máximo (-1,2 Mpa) e teve duração 96 horas até o término.

4.4. Análises Bioquímicas

4.4.1. Metabolismo Oxidativo

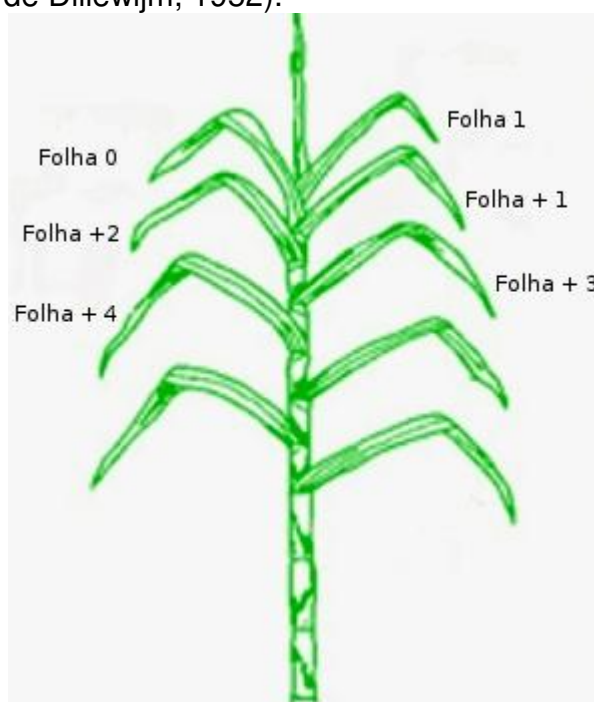
4.4.1.1. Enzimas antioxidantes

A determinação da atividade de enzimas antioxidantes, dismutase superóxido (SOD, EC 1.15.1.1), Catalase (CAT, EC 1.11.1.6) e Peroxidase (POX, EC 1.11.1.7) foi quantificada a partir de amostras de folhas +1 de acordo com a classificação Kujiper, conforme figura abaixo (Figura 2). Para isso, amostras de 0,3 g foram extraídas e armazenadas imediatamente em nitrogênio líquido, para preservação da integridade foliar. Posteriormente, essas folhas foram transferidas para ultrafreezer à -80°C onde permaneceram armazenadas até o momento das análises.

As amostras de folhas +1 foram maceradas e homogeneizadas em nitrogênio líquido, em seguida foram adicionados 2 ml de meio tampão de extração, composto de fosfato de potássio 0,1 M, pH 6,8, ácido etilenodiaminotetracético (EDTA) 0,1 mM, Fluoreto de Fenilmetilsulfonil (PMSF) 1 mM e Polivinilpirrolidona (PVPP) 1% (p/v) (Peixoto et al., 1999).

Após essa etapa, o homogeneizado foi centrifugado a 12.000 xg a temperatura de 4° C durante 15 minutos, formando o sobrenadante que foi utilizado como extrato enzimático, para quantificação da atividade das enzimas.

Figura 2. Sistema Kuijper de numeração de folhas de cana-de-açúcar (Adaptado de Dillewijn, 1952).



Fonte: Rosseto (2022)

4.4.1.1.1. Determinação da atividade da Dismutase do Superóxido (SOD, EC 1.15.1.1)

A determinação da atividade da SOD foi baseada na metodologia proposta por Giannopolitis & Ries (1977). Para isso, foi adicionado ao extrato, tampão fosfato de potássio 50 mM a pH 7,8 acrescidos de metionina 13 mM, nitro blue tetrazolium (NBT) 75 μ M, EDTA 0,1 mM e riboflavina 2 μ M.

O meio reação contendo o extrato enzimático e os reagentes para quantificação da SOD ocorreu a temperatura de 25°C durante 5 minutos em câmara reação sob iluminação, posteriormente, a absorbância foi medida a 560 nm em espectrômetro Thermo Scientific™ Multiskan™. A atividade da SOD é determinada de acordo com a inibição da redução do NBT, definindo uma unidade de atividade (1 U) como a quantidade de enzima necessária para inibir 50% da fotoredução, expressa em Unidades de SOD $\text{min}^{-1} \text{mg}^{-1}$ proteína (Beauchamp e Fridovich, 1971).

4.4.1.1.2. Determinação da atividade da Catalase (CAT, EC 1.11.1.6)

Para quantificação da atividade da CAT seguiu-se a metodologia proposta por Havir & Mchale (1987), para isso, foram adicionados ao extrato enzimático os reagentes tampão fosfato de potássio 50 mM a pH 7,0 e H₂O₂ 12,5mM. Após essa etapa, foi realizada leitura das absorvâncias a 240nm em espectrômetro Thermo Scientific™ Multiskan™ com temperatura de 30°C e o valor calculado com base no coeficiente e extinção molar de 36 M⁻¹ cm⁻¹ (Anderson et al., 1995), sendo os resultados expressos em μmol de H₂O₂ min⁻¹ mg⁻¹ proteína.

4.4.1.1.3. Determinação da atividade da Peroxidase (POX, EC 1.11.1.7)

A atividade da POX foi determinada a partir da adição de tampão fosfato de potássio 25 mM a pH 6,8, H₂O₂ em concentração de 20 mM e Pirogalol 20 mM. Posteriormente, foram realizadas leituras em espectrômetro Thermo Scientific™ Multiskan™ no comprimento de onda de 420 nm em temperatura de 25°C no primeiro minuto de reação, e o resultado calculado com base no coeficiente de extinção molar de 2,47 mM⁻¹ cm⁻¹ (Chance e Maehley, 1955) com resultados expressos em μmol de purporogalina min⁻¹ mg⁻¹ proteína.

4.4.1.2. Quantificação de proteínas

A determinação de proteínas foi realizada a partir do extrato enzimático de acordo com o método de Bradford (Bradford et al., 1976). Para isso, 200 μL do reagente Bradford foi adicionado a 20 μL do extrato enzimático, em seguida foi realizada a leitura em espectrômetro *Thermo Scientific™ Multiskan™* no comprimento de onda de 595 nm utilizando o BSA (*Bovine Serum Albumin*) como padrão.

4.4.2. Peroxidação Lipídica

A peroxidação lipídica foi quantificada por meio da concentração de uma substância reativa ao Ácido Tiobarbitúrico (TBARS – Thiobarbituric acid reactive substances), por meio da concentração de Malondialdeído (MDA).

Para essa quantificação, amostras de 0,2g de folhas +1 foram maceradas em nitrogênio líquido, seguida da homogeneização com 2 ml de etanol 80% (v/v). Após essa etapa foi realizada a centrifugação a 10.000 xg na temperatura de 4°C durante 10 minutos. Posteriormente, duas alíquotas de 0,5 ml do sobrenadante foram retiradas e separadas em tubos distintos. Na primeiro além do 0,5 ml do sobrenadante, foi

adicionado 1,5 ml do Ácido Tiobarbitúrico (TBA) a 0,65% (p/v) em Ácido Tricloroacético (TCA) 20% (p/v). No segundo tubo foram adicionados 0,5 ml do sobrenadante acrescido de TCA 20% (p/v).

Em seguida, ambos os tubos foram incubados a 95°C durante 30 minutos. O sobrenadante produto desta reação foi lido em espectrofotômetro Thermo Scientific™ Multiskan™ nas absorvâncias de 440, 532 e 600nm.

A concentração de MDA foi calculada conforme equações abaixo, e os resultados expressos em nmol de MDA g⁻¹MF (HODGES et al., 1999):

$$1) [(Abs\ 532_{+TBA} - Abs\ 600_{+TBA}) - (Abs\ 532_{-TBA} - Abs\ 600_{-TBA})] = A$$

$$2) [(Abs\ 440_{+TBA} - Abs\ 600_{+TBA})0,0571] = B$$

$$3) MDA\ (nmol\ ml^{-1}) = ((A - B)/157000)10^6$$

4.5. Índice SPAD

No dia da coleta das folhas para análise da atividade antioxidante, foi realizada a medição da intensidade de verde, para isso, foi utilizado um Clorofilômetro SPAD - 502[®] (Minolta, Japan). As medições foram realizadas em três pontos do terço médio de folhas +1.

4.6. Delineamento experimental

O experimento foi conduzido com Delineamento em Blocos Casualizados (DBC) em esquema fatorial (2 tratamentos x 5 repetições x 30 variedades), com 30 plantas por parcela, sendo uma por variedade, distribuída em cinco repetições e 2 tratamentos (Sem déficit hídrico e com déficit hídrico induzido).

4.7. Análises estatísticas

4.7.1. Detecção e eliminação de outliers

Para identificação e eliminação de outliers, adotou-se a metodologia de análise de resíduos e boxplot (Schwertman et al., 2004).

4.7.2. Análise de Cluster

Para identificar agrupamentos nos parâmetros com um padrão de resposta dos genótipos de Cana-de-açúcar ao déficit hídrico induzido por polietilenoglicol 6000, submetemos os dados à análise de cluster hierárquica (HCA) no programa R. Para a avaliação dos agrupamentos dos genótipos em cada variável (MDA, SOD, CAT, POX

e SPAD), utilizamos como entrada de dados, os mesmos dados obtidos em cada parâmetro. Para a avaliação da similaridade entre os parâmetros, os dados de foram transformados em log10. A matriz de distância foi calculada usando a distância euclidiana como métrica. O agrupamento hierárquico foi realizado usando o método de ligação de Ward e o dendrograma obtido foi analisado para identificar agrupamentos.

4.7.3. Modelo estatístico

A metodologia de modelo misto (máxima verossimilhança restrita/melhor preditor linear imparcial – REML/BLUP) foi utilizada para prever valores genotípicos, de acordo com (HENDERSON; QUAAS, 1976). O modelo estatístico para avaliar a interação entre os clones avaliados e os tratamentos PEG e Controle são representados por:

$$y = Xm + Zg + Wi + e$$

Onde $y_{(n \times 1)}$ é o vetor de dados fenotípicos; $m_{(j \times 1)}$ é o vetor do efeito de repetição e tratamentos (assumido como fixo), somado à média geral (intercepto); $g_{(i \times 1)}$ é o vetor de efeitos genotípicos (assumido como aleatório), $g \sim \text{NID}(0, \sigma_g^2)$; $i_{(i \times 1)}$ é o vetor da interação genótipos x tratamentos (assumido como aleatório), $i \sim \text{NID}(0, \sigma_{gt}^2)$; e $e_{(n \times 1)}$ é o vetor residual (aleatório), e $e \sim \text{NID}(0, \sigma_e^2)$. σ_g^2 é a variância genética, σ_{gt}^2 é a variância da interação genótipos x tratamentos, e σ_e^2 é a variância residual. As letras maiúsculas $X_{(n \times j)}$, $Z_{(n \times i)}$ e $W_{(n \times ij)}$ representam a matriz de incidência para os efeitos m , g , e i , respectivamente.

Para a avaliação dos tratamentos avaliados separadamente o modelo estatístico adotado foi:

$$y = Xm + Zg + e$$

Onde $y_{(n \times 1)}$ é o vetor de dados fenotípicos; $m_{(j \times 1)}$ é o vetor do efeito de repetição (assumido como fixo), somado à média geral (intercepto); $g_{(i \times 1)}$ é o vetor de efeitos genotípicos (assumido como aleatório), $g \sim \text{NID}(0, \sigma_g^2)$; e $e_{(n \times 1)}$ é o vetor residual (aleatório), e $e \sim \text{NID}(0, \sigma_e^2)$. σ_g^2 é a variância genética, e σ_e^2 é a variância residual. As letras maiúsculas $X_{(n \times j)}$, $Z_{(n \times i)}$ e representam a matriz de incidência para os efeitos m e g , respectivamente.

Foi utilizado o pacote estatístico “sommer” (Covarrubias-Pazarán, 2016) disponível no software estatístico R (R Core Team, 2021).

4.7.4. Teste de significância

A significância dos efeitos do modelo misto foi avaliada pelo Teste de Razão Verossimilhança (LRT). Essa metodologia estima a contribuição de efeitos aleatórios no modelo e determina o log da convergência (L) e o desvio do modelo com e sem o efeito a ser testado. O teste determina a diferença entre os desvios e compara a significância dessa diferença pelo método estatístico Qui-quadrado com um grau de liberdade e nível de probabilidade de 0,01.

4.7.5. Teste T

Para a comparação de médias, o teste T foi utilizado para comparação entre os tratamentos (Pimentel Gosmes, 2000). Foi testado a hipótese de igualdade entre as médias, $H_0: \mu_{trat1} = \mu_{trat2}$ e a hipótese alternativa $H_a: \mu_{trat1} \neq \mu_{trat2}$ para o nível de significância de 5% em que μ_{trat1} é a média do tratamento 1 sob condição de estresse e μ_{trat2} é a média do tratamento 2 na condição controle.

4.7.6. Análise de componentes principais

Ainda com base nas médias, foi realizada a análise de componentes principais (ACP). Para isso, os dados foram parametrizados para que todos pudessem ser comparados de acordo com a mesma grandeza. Foi utilizada uma matriz de dados, onde linhas eram compostas pelas variedades de cana-de-açúcar e colunas compostas pelas variáveis avaliadas para isso foi utilizada a função `prcomp` do software R.

4.7.7. Análise de Cluster

Para identificar agrupamentos nos parâmetros com um padrão de resposta dos genótipos de Cana-de-açúcar ao déficit hídrico induzido por polietilenoglicol 6000, submetemos os dados à análise de cluster hierárquica (HCA) no programa R. Para a avaliação dos agrupamentos dos genótipos em cada variável (MDA, SOD, CAT, POX e SPAD), utilizamos como entrada de dados, os mesmos dados obtidos em cada

parâmetro. Para a avaliação da similaridade entre os parâmetros, os dados de foram transformados em \log_{10} . A matriz de distância foi calculada usando a distância euclidiana como métrica. O agrupamento hierárquico foi realizado usando o método de ligação de Ward e o dendrograma obtido foi analisado para identificar agrupamentos.

4.8. Softwares

As análises estatísticas foram realizadas utilizando o software estatístico R (R Core Team, 2021).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Tratamento dos dados e remoção de Outliers

Os resultados obtidos foram avaliados, e os valores discrepantes (outliers) foram removidos em duas etapas, seguindo a metodologia de boxplot proposta por Schwertman et al. (2004), conforme descrito no Material Suplementar I.

No tratamento controle, na primeira etapa, foram identificados dois outliers nas variáveis MDA e CAT, e sete valores discrepantes para a variável POX. Na segunda etapa, foram detectados um outlier em SPAD, sete em CAT, seis em POX e cinco em MDA.

Para o tratamento com PEG 6000, na primeira etapa, foram identificados sete e dois outliers nas variáveis CAT e POX, respectivamente. Já na segunda etapa, foram detectados um outlier em SPAD, seis em CAT, trinta em SOD e dois em MDA.

5.2. Respostas genóticas à Indução de déficit hídrico com Polietilenoglicol 6000

5.2.1. Teste LRT

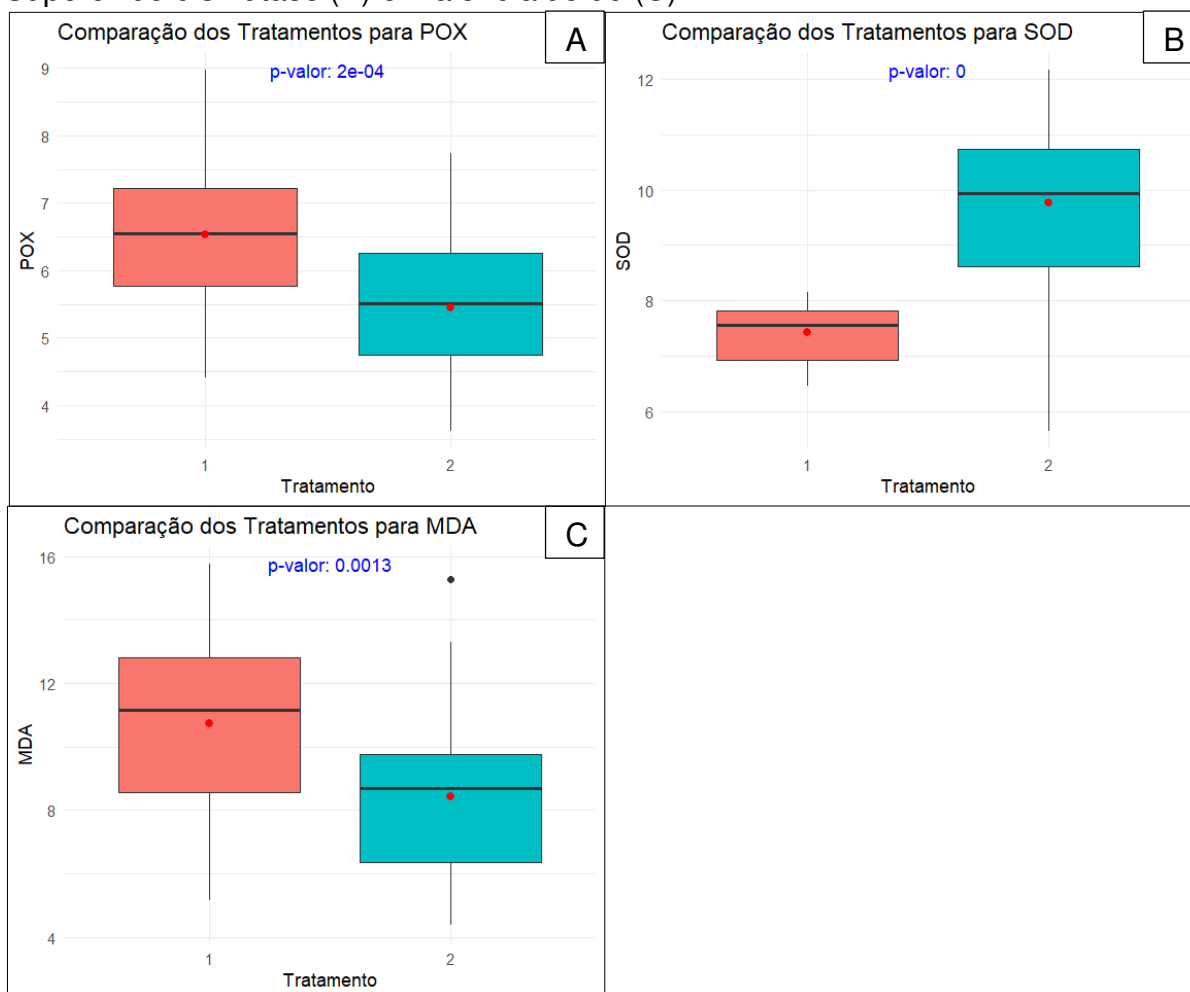
Por meio do teste de razão de verossimilhança (LRT), foi testada a hipótese nula com o objetivo de verificar a existência de diferença significativa entre o modelo completo e o modelo reduzido (sem o efeito que se pretendia testar). Com base nos resultados obtidos, não foi possível identificar diferenças significativas nas variáveis SPAD, POX, CAT, SOD e MDA quando submetidas às condições contrastantes, conforme apresentado no Material Suplementar II.

5.2.2. Teste T

Por meio do teste t, foi possível verificar diferenças significativas nas variáveis SOD, MDA e POX entre as médias genóticas dos tratamentos estressado e não estressado, conforme ilustrado na Gráfico 1.

Esses resultados indicam que o tratamento submetido ao déficit hídrico promoveu danos oxidativos às estruturas celulares, evidenciados pela significância da interação Tratamento:Clone.

Gráfico 1. Teste T entre médias genotípicas em 30 variedades de cana-de-açúcar sob condições de déficit hídrico induzido por polietilenoglicol 6000 (Tratamento 1) comparado ao tratamento controle sem déficit (Tratamento 2), peroxidase (A), Superóxido dismutase (B) e malondialdeído (C).



A concentração de MDA foi superior no tratamento submetido ao déficit hídrico em relação ao controle, indicando maior peroxidação lipídica nas plantas expostas ao estresse, e, conseqüentemente, danos oxidativos às estruturas celulares.

A determinação dos níveis de MDA é considerada uma das principais análises associadas à avaliação da tolerância ao estresse hídrico, sendo amplamente utilizada em estudos que comparam a eficiência dos metabolismos antioxidantes enzimático e não enzimático (Carvalho, 2008). O conteúdo de MDA é expresso em nmol g^{-1} por massa fresca (Health & Packer, 1968). Níveis elevados de MDA refletem maiores danos a componentes celulares, como proteínas, ácidos nucleicos, organelas e membranas, afetando negativamente o funcionamento da membrana plasmática e sua seletividade (Barbosa et al., 2023).

Apesar da formação de espécies reativas de oxigênio (EROs) ocorrer continuamente em plantas superiores, o acúmulo excessivo dessas moléculas pode causar danos às células. Em condições normais, as EROs são geradas em organelas como mitocôndrias, cloroplastos e peroxissomos, atuando como sinalizadores em processos fisiológicos (Karuppanapandian et al., 2011). As EROs são produtos de processos metabólicos dependentes de oxigênio, como respiração aeróbica, fotossíntese e fotorrespiração (Barbosa et al., 2014), incluindo oxigênio singleto ($^1\text{O}_2$), radicais superóxido ($\bullet\text{O}_2^-$), hidroxila ($\bullet\text{OH}$) e peróxido de hidrogênio (H_2O_2) (Sharma et al., 2012).

Sob condições fisiológicas normais, há um equilíbrio entre a produção e a desintoxicação das EROs, mediado pelos mecanismos de defesa antioxidante, tanto enzimáticos quanto não enzimáticos (Karuppanapandian et al., 2011). Nesses cenários, as EROs desempenham funções essenciais no crescimento, desenvolvimento e na regulação de processos metabólicos das plantas (Hung et al., 2005; Del Río et al., 2006; Kim & Kwak, 2010).

Contudo, sob condições de déficit hídrico, de acordo com os resultados do presente estudo, o sistema antioxidante não foi suficientemente eficiente para neutralizar o excesso de EROs, resultando em variações nos níveis de MDA. Isso sugere diferenças na eficiência do metabolismo antioxidante entre as variedades avaliadas (Anjum et al., 2016; Carvalho et al., 2008; Chakraborty & Pradhan, 2012).

Esses resultados corroboram os achados de Camargo (2013), que, ao avaliar duas variedades de cana-de-açúcar sob estresse hídrico — uma tolerante (IACSP94-2094) e outra suscetível (IACSP97-7065) —, observou um aumento significativo nos níveis de malondialdeído (MDA) em ambas, evidenciando a ocorrência de danos oxidativos às membranas celulares. De forma semelhante, Morais et al. (2013) reportaram o incremento da peroxidação lipídica em seis variedades de cana-de-açúcar submetidas simultaneamente ao déficit hídrico e estresse salino. Nesse estudo, os genótipos considerados tolerantes apresentaram níveis inferiores de MDA em relação às variedades suscetíveis, indicando uma maior eficiência dos mecanismos antioxidantes na contenção dos efeitos deletérios induzidos pelas EROs.

Assim, sob condições de déficit hídrico, são observadas variações significativas nos teores de MDA entre os diferentes genótipos, quando comparados ao tratamento-controle não estressado. Essa variação indica que a eficiência dos sistemas antioxidantes é inerente a cada material genético, refletindo diretamente na sua

capacidade de atenuar os efeitos citotóxicos associados à formação excessiva de EROs (Maia Júnior et al., 2019; Morais et al., 2018; Morais et al., 2020).

A expressão dos genes codificadores de enzimas antioxidantes varia entre os genótipos e é regulada de forma específica conforme a constituição genética de cada variedade, influenciando diretamente a capacidade de mitigação dos efeitos citotóxicos das EROs (Cyrne et al., 2003). A magnitude dos danos induzidos pelo déficit hídrico depende não apenas da intensidade e duração do estresse, mas também da interação com outros fatores ambientais e da base genética da planta, resultando em respostas fisiológicas diferenciadas entre os genótipos avaliados (McCree & Fernández, 1989; Morais et al., 2018).

Diversos estudos relatam que o estresse hídrico reduz significativamente a massa e o comprimento dos colmos, além do perfilhamento, impactando negativamente a produtividade (Abreu et al., 2013; Inman-Bamber & Smith, 2005; Oliveira et al., 2010).

Quanto às variáveis enzimáticas, os dados obtidos neste estudo indicam que a atividade média das enzimas POX e SOD apresentou diferença significativa entre os modelos completo e reduzido, segundo o teste t (Gráfico 1). O excesso de H_2O_2 não neutralizado por essas enzimas pode ser convertido pela glutatona ou pela catalase (CAT) (Ahmad et al., 2010).

Por outro lado, não foi possível identificar diferença significativa entre os tratamentos para a variável CAT, conforme o teste t.

As enzimas do grupo das peroxidases atuam na conversão do peróxido de hidrogênio (H_2O_2) em água, removendo um átomo de hidrogênio por meio de fenol, guaicol e compostos redutores (Passardi et al., 2004). Diversos autores indicam a atuação de enzimas desse grupo no combate às EROs formadas durante déficit hídrico (Camargo, 2013; Cia, 2011; Santos et al., 2014; Vilela, 2011).

Santos et al. (2014) verificaram que variedades de cana-de-açúcar tolerantes ao déficit hídrico apresentaram incremento na atividade da enzima ascorbato peroxidase (APX) quando em condições de seca, indicando participação dessa enzima no controle das EROS, atuando no sistema antioxidante vegetal frente. Além disso, os mesmos identificaram correlação positiva entre as enzimas ascorbato peroxidase, catalase e superóxido dismutase, na proteção das células contra as ROS.

5.3. Desempenho de genótipos sob condições de déficit hídrico induzido por Polietilenoglicol 6000

O déficit hídrico simulado pelo uso de polietilenoglicol 6000 (PEG 6000) é uma metodologia eficaz para avaliar a resposta de genótipos de cana-de-açúcar a condições de estresse osmótico em ambiente controlado. Essa técnica permite a indução de estresse hídrico sem comprometer outros fatores ambientais, possibilitando a análise direta do impacto da falta de água no metabolismo e desempenho das plantas (Verslues et al., 1998).

A atividade do metabolismo antioxidante em cana-de-açúcar tem sido associada à tolerância ao déficit hídrico, sendo descrita por vários autores (Boaretto et al., 2014; Ferreira et al., 2017; Morais et al., 2020; Sales et al., 2015; Vilela et al., 2017). Portanto, determinar qual fator é chave na eliminação das EROs pode auxiliar no processo de melhoramento genético e seleção de materiais promissores.

Neste estudo, diferentes genótipos foram submetidos a concentrações controladas de PEG 6000, visando a avaliação de parâmetros fisiológicos, bioquímicos e enzimáticos relacionados à tolerância ao déficit hídrico. Os resultados indicaram variações significativas entre os genótipos quanto à capacidade de manutenção da integridade celular, eficiência do sistema antioxidante e desempenho geral sob estresse (Morais et al., 2013).

O malondialdeído (MDA) é a variável utilizada como marcador para determinação do estresse oxidativo, sendo utilizada em vários trabalhos como critérios para seleção de genótipos tolerantes ao déficit hídrico (Morais et al., 2018).

Genótipos considerados mais tolerantes apresentaram menor acúmulo de MDA, indicando menor peroxidação lipídica e menor dano oxidativo às membranas celulares. Além disso, a atividade das enzimas antioxidantes SOD e POX foi significativamente na maior parte desses genótipos, sugerindo atuação do sistema antioxidante mais eficiente na neutralização das EROs (ANJUM et al., 2016).

Por outro lado, genótipos suscetíveis mostraram maior acúmulo de MDA e menor atividade antioxidante enzimática, evidenciando uma menor capacidade de defesa contra o estresse oxidativo induzido pelo déficit hídrico (CAMARGO, 2013).

Os parâmetros fotossintéticos, avaliados por meio do índice SPAD, também variaram entre os genótipos, com genótipos tolerantes apresentando manutenção

mais efetiva da clorofila sob estresse osmótico, o que contribui para a maior eficiência na captação de luz e manutenção do crescimento (MAIA JÚNIOR et al., 2019).

Esses resultados corroboram a importância da seleção de genótipos com sistemas antioxidantes robustos e capacidade adaptativa ao déficit hídrico para programas de melhoramento genético voltados à produção sustentável de cana-de-açúcar em condições de escassez hídrica (MORAIS et al., 2018).

5.3.1. Conteúdo Malondialdeído

O MDA é amplamente reconhecido como um marcador bioquímico da peroxidação lipídica, sendo utilizado como indicativo de danos oxidativos às membranas celulares sob condições de estresse abiótico, como o déficit hídrico. O acúmulo de MDA reflete a degradação de ácidos graxos insaturados das membranas, comprometendo a integridade estrutural e funcional das células vegetais.

Neste estudo, a concentração de MDA foi quantificada com o objetivo de estimar o grau de dano oxidativo em diferentes genótipos de cana-de-açúcar expostos ao estresse hídrico simulado por meio de PEG 6000, uma substância osmótica empregada para indução controlada de déficit hídrico em experimentos (Anjum et al., 2016).

Tabela 1. Conteúdo de malondialdeído (MDA) em trinta variedades de cana-de-açúcar submetida à deficit hídrico induzido por Polietilenoglicol 6000.

Ranking	Variedade	Conteúdo de MDA (nmol g ⁻¹ MF)	Ranking	Variedade	Conteúdo de MDA (nmol g ⁻¹ MF)
1	RB 855156	15.7577	16	RB 127825	11.0880
2	CTC 2	15.2613	17	CT022994	10.9629
3	RB 988082	14.7822	18	RB 975242	10.6274
4	RB 975201	14.6192	19	RB 056351	9.4717
5	SP 80-1816	13.5328	20	SP 81-3250	8.8342
6	RB 975033	13.5111	21	RB 097217	8.7832
7	SP 80-3280	12.8712	22	RB 92579	8.5983
8	RB 965902	12.8612	23	RB 72454	8.5757
9	CTC 9003	12.7316	24	RB 98710	8.3401
10	RB 966928	12.6224	25	SP 80-1842	8.1484
11	RB 867515	11.9419	26	CTC 4	7.7665
12	CTC 9002	11.4912	27	RB 855453	7.5084
13	RB 855536	11.4484	28	RB 108519	6.4124
14	SP 77-5181	11.3850	29	RB 985476	5.8439
15	RB 056380	11.2223	30	VAT 90-212	5.1619

A análise dos dados revelou que as dez variedades de cana-de-açúcar com os mais elevados níveis de peroxidação lipídica foram: RB855156, RB988082, CTC2, RB975201, SP80-1816, RB975033, SP80-3280, RB965902, CTC9003 e RB966928. Esses genótipos apresentaram, respectivamente, valores de 15,76; 14,78; 14,64; 14,62; 13,53; 13,51; 12,87; 12,86; 12,73 e 12,62 nmol de malondialdeído (MDA) por grama de matéria fresca (Tabela 1). Esses resultados indicam que tais variedades são potencialmente mais suscetíveis aos efeitos deletérios do estresse hídrico, uma vez que o acúmulo de MDA é reflexo direto da intensificação dos processos de oxidação lipídica nas membranas celulares.

No que se refere às variedades RB966928, RB975033 e RB855156, trata-se de materiais classificados como de maturação precoce, com colheita recomendada para o início da safra, no período compreendido entre março e julho. Nessa janela temporal, é comum a presença de umidade residual no solo, proveniente do regime de chuvas anterior, o que contribui para a atenuação dos efeitos do déficit hídrico sobre essas variedades. Assim, quando cultivadas em suas épocas ideais de colheita, tais cultivares tendem a não expressar de forma significativa os impactos negativos associados à seca, sendo favorecidas por condições edafoclimáticas mais amenas nesse estágio fenológico (RIDESA, 2021).

A variedade RB855156 tem sido descrita na literatura como tolerante ao déficit hídrico, apresentando a capacidade de manter a atividade metabólica mesmo sob condições de baixa disponibilidade hídrica no solo (Morais et al., 2018). Esses mesmos autores observaram, nessa variedade, menores teores de MDA e conteúdo relativo de água (CRA), sugerindo um mecanismo eficiente de regulação da perda de água para a atmosfera, por meio do controle do status hídrico foliar.

Corroborando esses achados, Junior et al. (2016) relataram que a RB855156 apresentou reduções mais acentuadas nas taxas de transpiração, condutância estomática, fotossíntese líquida e eficiência da carboxilação, o que resultou em uma maior eficiência no uso da água (EUA) quando comparada a outras variedades avaliadas. Esses resultados indicam que a RB855156 possui mecanismos fisiológicos adaptativos que contribuem para o seu desempenho sob condições de estresse hídrico, tornando-a uma cultivar promissora para ambientes com limitação hídrica.

Paula (2019) verificou que a variedade CTC2 apresentou maiores teores de MDA quando submetida ao déficit hídrico e ao estresse induzido por herbicida. Embora tenha sido observado um aumento na atividade das enzimas antioxidantes,

os elevados níveis de MDA indicam uma intensa peroxidação lipídica, sugerindo que o sistema antioxidante da variedade foi insuficiente para conter os danos oxidativos. Esses resultados apontam para uma baixa eficiência funcional do sistema enzimático antioxidante da CTC2 frente ao estresse combinado, tornando-a mais suscetível à degradação das membranas celulares induzida pelas ROS.

De acordo com a RIDESA (2021), a variedade RB988082 é recomendada para ambientes com alta fertilidade e boas condições edafoclimáticas, sendo classificada como responsiva à irrigação. Essa característica indica uma maior exigência hídrica, o que a torna menos adaptada a condições de déficit hídrico severo, reforçando sua dependência de disponibilidade adequada de água para alcançar alto desempenho produtivo.

A variedade RB975201 é indicada para ambientes que variam de favoráveis a intermediários, segundo a RIDESA (2021). No entanto, estudos de Silva et al. (2023) demonstraram que essa cultivar apresenta resposta positiva à aplicação de água, característica também observada na variedade RB92579. Esses resultados sugerem que, embora adaptada a diferentes condições edafoclimáticas, a RB975201 demonstra maior desempenho produtivo sob disponibilidade hídrica adequada, evidenciando resposta fisiológica sensível à irrigação.

Em relação à variedade SP80-1816, Raizer e Vencovsky (1999) relataram que essa cultivar apresenta bom desempenho sob condições limitantes, indicando certa capacidade adaptativa ao estresse abiótico. Complementando essa observação, Guimarães et al. (2008) identificaram, ao analisar a mesma variedade, elevados níveis de acúmulo de prolina sob condições adversas. Esse aminoácido atua como osmoprotetor, favorecendo a manutenção do potencial hídrico celular e, conseqüentemente, a absorção de água pelas raízes, contribuindo para a tolerância ao déficit hídrico.

Sordi et al. (2024) avaliaram o desempenho de 16 variedades de cana-de-açúcar, entre as quais a RB975033, e constataram que essa cultivar apresentou baixo potencial produtivo em condições ambientais limitantes. No entanto, segundo recomendações da RIDESA (2021), a RB975033 é indicada para ambientes restritivos, desde que sejam respeitadas as condições ideais de manejo, especialmente o período de colheita. Essa divergência entre o desempenho observado e a recomendação técnica pode estar relacionada a desvios no momento

da colheita, à intensidade do estresse ambiental, ou a fatores edafoclimáticos locais, que afetam diretamente a expressão do potencial produtivo da variedade.

As variedades SP80-3280 e RB965902 são frequentemente associadas à baixa tolerância ao déficit hídrico, sendo classificadas como suscetíveis ao estresse hídrico por diversos autores na literatura (Cacefo, 2017; Holanda et al., 2014; Silva et al., 2014). Esses genótipos apresentam, de modo geral, reduções expressivas em parâmetros fisiológicos e produtivos sob condições de limitação hídrica, o que compromete seu desempenho agrônômico em ambientes com disponibilidade irregular de água.

De acordo com o Centro de Tecnologia Canavieira (CTC), a variedade CTC9003 apresenta como uma de suas principais características a tolerância à seca. No entanto, os resultados obtidos no presente estudo revelaram índices elevados de malondialdeído (MDA) nessa variedade quando submetida a déficit hídrico, indicando a ocorrência de danos oxidativos às membranas celulares. Esse aparente contraste pode estar relacionado ao fato de que a tolerância dessa variedade não se expressa por meio da limitação do estresse oxidativo, mas sim pela capacidade de manter a atividade fotossintética mesmo sob baixa disponibilidade hídrica.

Esse mecanismo é descrito por Turner (1981) como tolerância à desidratação, a qual se caracteriza pela continuidade das funções metabólicas da planta mesmo sob condições de baixo status hídrico, sem que ocorra colapso fisiológico imediato. Assim, a CTC9003 pode ser considerada tolerante ao estresse hídrico, não necessariamente por evitar o estresse, mas por suportá-lo funcionalmente, mantendo a atividade metabólica essencial mesmo diante de um ambiente adverso.

A variedade de maturação precoce RB966928 também apresentou elevados índices de MDA, corroborando os resultados reportados por Moraes et al. (2018), que analisaram variedades submetidas simultaneamente ao estresse hídrico e salino. Esses dados indicam que, mesmo em cultivares de maturação precoce, os danos oxidativos decorrentes do estresse podem ser significativos, refletindo a complexidade dos mecanismos de tolerância em diferentes condições ambientais.

Em contrapartida, as variedades VAT90-212, RB985476, RB108519, RB855453, CTC4, SP80-1842, RB98710, RB72454, RB92579 e RB097217 apresentaram menores médias de MDA, indicando reduzida peroxidação lipídica. Esses resultados sugerem que tais cultivares possuem maior capacidade de mitigar

os danos oxidativos causados pelo déficit hídrico, sendo, portanto, consideradas mais tolerantes a condições de estresse hídrico.

As variedades RB097217 e RB108519 são materiais recentes lançados pela RIDESA, com poucos estudos científicos disponíveis acerca da resposta ao déficit hídrico. Conforme as recomendações da RIDESA (2021), a variedade RB097217 é indicada para ambientes de alta fertilidade, enquanto a RB108519 tem sido direcionada para locais com condições restritivas, sugerindo diferentes adaptações edafoclimáticas e potencial de resistência ao estresse hídrico entre esses genótipos.

A recomendação da variedade RB108519 para locais restritivos sugere que essa cultivar possui uma maior capacidade de sobrevivência em condições adversas. Essa adaptação provavelmente está associada à ativação eficiente de diversos mecanismos de defesa fisiológicos e estruturais. Entre esses mecanismos, destaca-se o acúmulo de osmólitos compatíveis, como prolina e açúcares solúveis, que auxiliam na manutenção da turgidez celular durante períodos de déficit hídrico. Além disso, observa-se um aumento na atividade das enzimas antioxidantes — superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT) e ascorbato peroxidase (APX) — que desempenham papel crucial na mitigação do estresse oxidativo causado pelas espécies reativas de oxigênio.

Outro fator importante é o ajuste estomático, o qual reduz a perda de água por transpiração, contribuindo para a conservação hídrica da planta. Finalmente, alterações morfológicas e anatômicas, como uma cutícula mais espessa e um sistema radicular mais profundo e desenvolvido, potencializam a absorção de água e limitam a evapotranspiração, reforçando a tolerância da RB108519 ao estresse causado pela restrição hídrica.

Embora a variedade VAT90-212 seja tradicionalmente recomendada para ambientes com melhores condições de produção, os resultados de Vinícius et al. (2017), que evidenciaram padrões fisiológicos típicos de genótipos tolerantes ao déficit hídrico — como a redução na perda de água — corroboram com os achados neste estudo. Aqui, a VAT90-212 apresentou baixos índices de MDA, indicando menor peroxidação lipídica e maior capacidade de manutenção da integridade celular sob estresse hídrico. Além disso, a pesquisa de Oliveira e Braga (2019), que observou respostas produtivas semelhantes entre diferentes variedades, incluindo a VAT90-212, sob diferentes lâminas de irrigação, reforça a possibilidade dessa cultivar apresentar uma adaptabilidade significativa a condições variáveis de disponibilidade

hídrica. Assim, os dados sugerem que, apesar de sua recomendação para ambientes favoráveis, a VAT90-212 pode exibir mecanismos eficazes de tolerância ao déficit hídrico, o que a torna uma opção promissora para regiões com irregularidade pluviométrica.

A variedade RB985476, liberada oficialmente pela RIDESA em 2015, é recomendada para ambientes que abrangem desde condições favoráveis até aquelas consideradas desfavoráveis, o que indica uma adaptabilidade relativamente ampla. Tradicionalmente, esse direcionamento sugere preferência por melhores condições de cultivo. No entanto, os achados de Medrado et al. (2023) evidenciaram que a RB985476 possui um sistema radicular mais profundo, fator que contribui para a maior capacidade de absorção de água em profundidades do solo menos suscetíveis à secagem rápida. Essa característica morfológica confere à cultivar uma vantagem significativa para enfrentar períodos de déficit hídrico, tornando-a mais resistente a estresses causados pela limitação do recurso hídrico.

Esse mecanismo de adaptação, relacionado ao aprofundamento radicular, é frequentemente observado em variedades consideradas tolerantes ao estresse hídrico, pois permite a exploração de reservas hídricas em camadas mais profundas do solo, sustentando a atividade metabólica e fotossintética mesmo durante períodos prolongados de seca. Além disso, a maior capacidade radicular pode estar associada a respostas fisiológicas complementares, como a regulação estomática eficiente e o aumento da atividade antioxidante, que atuam conjuntamente para minimizar os danos oxidativos e preservar a integridade celular sob estresse (Inman-Bamber and Smith, 2005).

Os resultados obtidos neste estudo em relação as variedades RB855453 e RB92579 corroboram achados anteriores da literatura, que também indicam a existência tolerância ao déficit hídrico nessas variedades. Estas foram classificadas como tolerantes por Holanda et al. (2014), ao apresentarem maior produção de matéria seca sob estresse hídrico. Essa característica é relevante, pois indica uma melhor manutenção do crescimento vegetativo mesmo em condições adversas.

Ademais, Maia Júnior et al. (2020) relataram que a variedade RB92579 apresentou acúmulo significativo de osmorreguladores durante o período de estresse, o que contribuiu para sua capacidade de tolerância e recuperação após a reidratação. Esses mecanismos fisiológicos reforçam a importância da seleção de genótipos com

respostas adaptativas eficientes ao déficit hídrico, como estratégia para a sustentabilidade da produção em ambientes sujeitos à limitação hídrica.

No presente estudo, a CTC 4 apresentou baixos níveis de MDA, o que indica uma menor peroxidação lipídica nas membranas celulares. Esse resultado sugere uma atuação eficiente do metabolismo antioxidante na variedade, contribuindo para a proteção celular frente ao estresse oxidativo induzido pelo déficit hídrico. Dessa forma, mesmo em condições adversas, a CTC 4 demonstra mecanismos fisiológicos que induzem à tolerância ao estresse hídrico.

Outra variedade indicada para ambientes de produção favoráveis que também apresentou baixo teor de MDA nas condições do presente estudo foi o genótipo SP80-1842. A menor concentração de MDA sugere uma redução na peroxidação lipídica, possivelmente associada à ação eficiente do sistema antioxidante da planta. Esses achados estão em consonância com os resultados de Dellabiglia et al. (2010), que, ao avaliarem dez variedades de cana-de-açúcar, incluindo a SP80-1842, identificaram neste genótipo características fisiológicas associadas à tolerância ao estresse hídrico, embora tenham observado apenas tolerância intermediária quando consideradas variáveis morfológicas. Tais evidências reforçam o potencial do genótipo SP80-1842 em situações de estresse moderado, especialmente sob a ótica da estabilidade fisiológica.

A variedade RB98710, desenvolvida pela RIDESA, apresenta restrições quanto ao ambiente de cultivo, sendo recomendada preferencialmente para ambientes de alta produtividade. De acordo com Gonçalves et al. (2010), essa cultivar demonstra elevada sensibilidade estomática, caracterizada por uma rápida redução da condutância estomática e da taxa de transpiração, o que contribui para uma menor perda de água para a atmosfera. Em contrapartida, Morais et al. (2018) observaram que a RB98710 apresenta uma relação inversamente proporcional entre o conteúdo relativo de água e os níveis de MDA, indicando que a manutenção do estado hídrico está associada à menor peroxidação lipídica. No presente estudo, no entanto, não foram observados aumentos significativos nos níveis de MDA, o que pode ser explicado pelo intervalo de tempo entre a indução do estresse hídrico e a coleta das amostras, possivelmente insuficiente para promover alterações perceptíveis nos marcadores de dano oxidativo.

Embora a variedade RB72454 seja tradicionalmente classificada como suscetível ao déficit hídrico, nas condições avaliadas no presente estudo foram

observados baixos teores de MDA, indicando baixa peroxidação lipídica. Este comportamento pode estar relacionado a uma resposta fisiológica rápida ao estresse, com fechamento estomático precoce, reduzindo a perda hídrica. Além disso, conforme apontado por Gonçalves et al. (2010), essa cultivar apresenta redução significativa na fluorescência da clorofila sob estresse hídrico, o que implica menor geração de energia livre e, por consequência, menor formação de espécies reativas de oxigênio (EROs). Esses mecanismos podem contribuir para a mitigação dos danos oxidativos, mesmo em variedades consideradas menos tolerantes.

De modo geral, os resultados obtidos no presente trabalho evidenciam que as respostas das variedades de cana-de-açúcar ao déficit hídrico variam de acordo com seus mecanismos fisiológicos de adaptação. As cultivares RB92579, RB855453 e SP80-1842 apresentaram baixos teores de MDA, indicando maior estabilidade da integridade das membranas celulares, possivelmente em decorrência de um metabolismo antioxidante mais eficiente. A variedade CTC 4 também se destacou pela baixa peroxidação lipídica, mesmo sendo recomendada para ambientes menos restritivos, sugerindo um bom desempenho fisiológico em condições adversas. Por outro lado, a RB98710, embora sensível à limitação hídrica em função da rápida resposta estomática, não apresentou elevação nos níveis de MDA, o que pode estar relacionado ao tempo de exposição ao estresse no experimento. Já a RB72454, considerada suscetível ao déficit hídrico, apresentou baixo acúmulo de MDA, o que pode ser explicado por mecanismos compensatórios, como fechamento estomático precoce e menor geração de EROs via redução na fluorescência da clorofila. Esses achados reforçam a importância da avaliação integrada de múltiplos parâmetros fisiológicos para a correta interpretação da tolerância ao estresse hídrico entre diferentes genótipos.

Em contraste às condições controle e com PEG 6000, as variedades RB988082, SP80-1816, SP77-5181, RB097217, RB855156, RB975242, RB975033, RB975201, RB127825 e RB965902 apresentaram os maiores incrementos relativos no conteúdo de MDA sob déficit hídrico, com aumentos de 61%, 58%, 53%, 50%, 50%, 41%, 41%, 39%, 29% e 28%, respectivamente. Esse aumento significativo evidencia maior peroxidação lipídica e, possivelmente, maior suscetibilidade ao estresse oxidativo nestes genótipos.

A análise de cluster hierárquica permitiu agrupar os genótipos avaliados em quatro grupos distintos, indicados pelas cores diferentes (Figura 3). Os agrupamentos

identificados em vermelho possuem baixa peroxidação lipídica, podendo essa característica estar associada a maior capacidade antioxidante e consequentemente tolerância ao déficit hídrico. O grupo identificado na cor azul, representado pelos genótipos RB 985476, RB 108519 e VAT 90-212 apresentaram um perfil ainda mais distinto, com menor peroxidação dentre todos os materiais genéticos avaliados, indicando maior tolerância deste ao déficit hídrico.

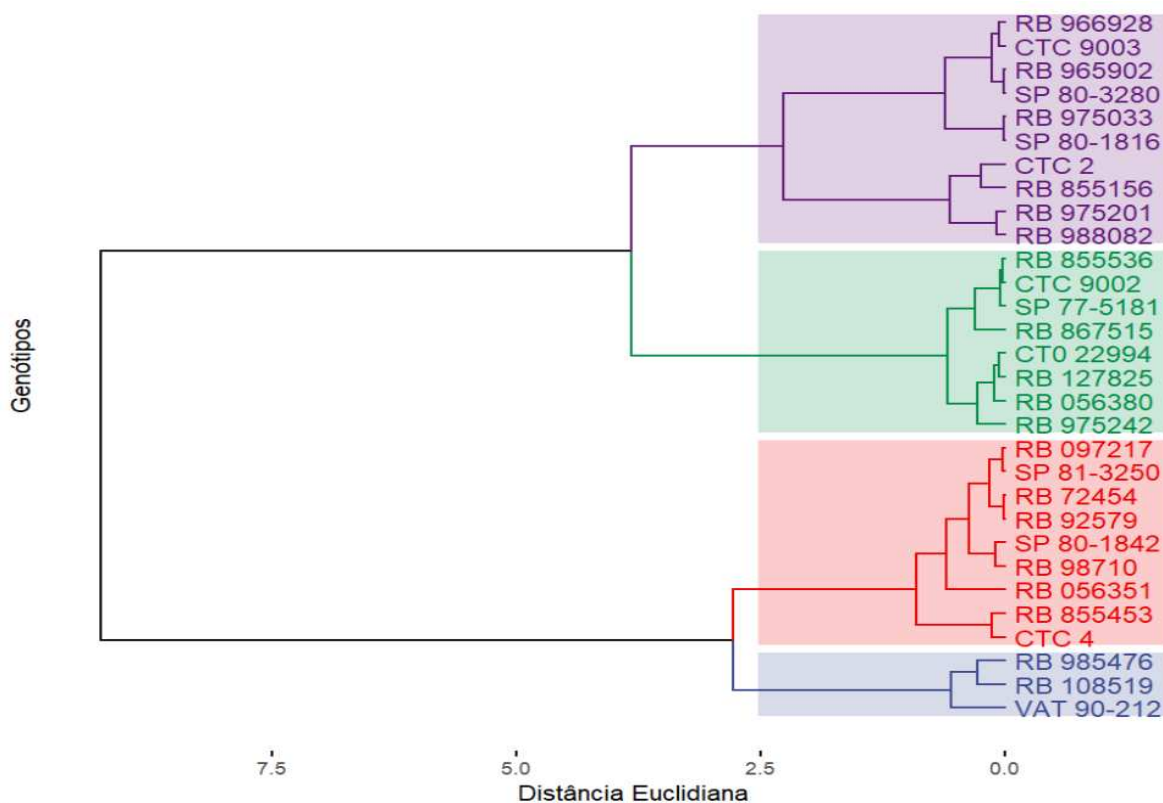


Figura 3. Dendrograma de agrupamento hierárquico dos genótipos de cana-de-açúcar em relação a avaliação da peroxidação lipídica (MDA) sob condições de déficit hídrico induzido por polietilenoglicol 6000. O dendrograma obtido com distância euclidiana, mostrou quatro principais agrupamentos da peroxidação lipídica nos genótipos em resposta ao déficit hídrico.

5.3.2. Atividade do sistema antioxidante enzimático

O acúmulo de MDA em tecidos vegetais é, de modo geral, um reflexo da atividade do sistema antioxidante, tanto enzimático quanto não enzimático, o qual atua na neutralização dos efeitos deletérios provocados pelas espécies reativas de oxigênio. Estudos como o de Moraes et al. (2018) demonstraram que, em variedades de cana-de-açúcar submetidas a estresses múltiplos, há uma relação inversamente proporcional entre a atividade do metabolismo antioxidante e os níveis de peroxidação

lipídica. Dessa forma, a quantificação do MDA, associada à avaliação da eficiência dos sistemas antioxidantes, torna-se uma ferramenta importante na identificação de genótipos com maior tolerância ao déficit hídrico. Tais informações são essenciais para programas de melhoramento que visam selecionar variedades com maiores níveis de tolerância frente à escassez hídrica em ambientes de produção.

5.3.2.1. Superóxido Dismutase

As enzimas do grupo superóxido dismutase (SOD, E.C. 1.15.1.1) exercem papel fundamental na defesa antioxidante de organismos vegetais, catalisando a dismutação do radical superóxido ($O_2^{\bullet-}$) em peróxido de hidrogênio (H_2O_2) e oxigênio molecular (O_2), minimizando assim os danos causados pelas EROs. Essas enzimas são classificadas com base no metal presente em seu centro ativo e na sua localização subcelular. As isoformas Cu/Zn-SOD, contendo cobre e zinco, localizam-se principalmente no citosol e nos cloroplastos; a Mn-SOD, contendo manganês, está presente nas mitocôndrias e peroxissomos; e a Fe-SOD, contendo ferro, atua predominantemente nos cloroplastos. A ação coordenada dessas isoenzimas é essencial para a neutralização de radicais livres gerados durante condições de estresse, como o déficit hídrico (Alscher et al., 2002).

Considerando a presença fundamental de íons metálicos na estrutura das enzimas antioxidantes, o déficit hídrico imposto às plantas pode ter afetado negativamente a conformação e, conseqüentemente, a atividade catalítica dessas biomoléculas, comprometendo os mecanismos de defesa antioxidante (Alejandro et al., 2020; Cakmak, 2000; Gill & Tuteja, 2010).

De modo geral, nas condições experimentais deste estudo, observou-se uma relação inversamente proporcional entre a peroxidação lipídica e a atividade da superóxido dismutase (SOD). Das dez variedades que apresentaram os menores teores de malondialdeído (MDA), seis destacaram-se pela elevada atividade da SOD (Tabela 2).

Morais et al. (2018) observaram que a elevação sincronizada das atividades das enzimas SOD, CAT e APX do sistema antioxidante está associada a uma maior proteção celular e aumento da tolerância ao estresse em plantas de cana-de-açúcar. Portanto, a coordenação eficiente entre essas enzimas antioxidantes é fundamental

para mitigar os efeitos do estresse ambiental em cana-de-açúcar, preservando a integridade celular e promovendo o desempenho fisiológico da planta.

Tabela 2. Atividade da enzima Superóxido Dismutase em trinta variedades de cana-de-açúcar submetida à déficit hídrico induzido por Polietilenoglicol 6000.

Ranking	Variedade	Unidades de SOD (min ⁻¹ mg ⁻¹)	Ranking	Variedade	Unidades de SOD (min ⁻¹ mg ⁻¹)
1	SP 80-3280	8.1489	16	CTC 9003	7.5475
2	RB 98710	8.1106	17	RB 127825	7.5200
3	RB 108519	8.1033	18	RB 966928	7.5008
4	RB 965902	8.1000	19	CTC 2	7.4676
5	RB 097217	7.9104	20	RB 855453	7.4063
6	RB 72454	7.8983	21	RB 988082	7.1626
7	RB 92579	7.8756	22	CT022994	6.9846
8	RB 975242	7.8284	23	SP 81-3250	6.8980
9	RB 985476	7.8144	24	RB 855156	6.8373
10	VAT 90-212	7.7840	25	RB 975033	6.8045
11	RB 975201	7.7521	26	RB 867515	6.6646
12	SP 80-1842	7.6737	27	SP 77-5181	6.5474
13	RB 855536	7.6392	28	CTC 9002	6.5391
14	RB 056380	7.6085	29	RB 056351	6.5069
15	CTC 4	7.5683	30	SP 80-1816	6.4636

Sales et al. (2012) avaliaram genótipos de cana-de-açúcar submetidos a condições de déficit hídrico e verificaram efeitos positivos na mitigação dos efeitos deletérios quando a enzima SOD possuía maior atividade.

Outros autores sugerem ainda que o aumento da atividade da SOD pode estar relacionado com aumento na atividade da Catalase e da Ascorbato Peroxidase, isso ocorre por conta da formação de H₂O₂ pela SOD, que também é citotóxica e precisa ser neutralizada, aumentando também a atividade da CAT que converte peróxido de hidrogênio em oxigênio molecular e água (Morais et al., 2018).

As variedades SP 80-3280, RB 98710, RB 108519, RB 965902, RB 097217, RB 72454, RB 92579, RB 975242, RB 985476 e VAT 90-212 apresentaram destaque em razão da elevada atividade da enzima SOD, um dos principais componentes do sistema antioxidante enzimático. Dentre essas, sete variedades — RB 98710, RB 108519, RB 097217, RB 72454, RB 92579, RB 985476 e VAT 90-212 — também exibiram os menores teores de MDA.

Esses resultados sugerem uma correlação inversa entre a atividade da SOD e a peroxidação lipídica, reforçando o papel protetor dessa enzima na mitigação dos danos oxidativos sob condições de déficit hídrico.

Essa relação inversa entre SOD e MDA tem sido amplamente reportada na literatura como indicativa de tolerância ao estresse oxidativo induzido pela seca. A SOD desempenha papel fundamental na desintoxicação de EROs, catalisando a conversão do ânion superóxido em peróxido de hidrogênio, o qual é posteriormente metabolizado por outras enzimas antioxidantes como a CAT e a APX (Gill & Tuteja, 2010; Mittler, 2002).

Morais et al. (2018) observaram que o aumento sincronizado das enzimas antioxidantes SOD, CAT e APX em genótipos de cana-de-açúcar foi determinante para maior proteção celular frente ao déficit hídrico. Silva et al. (2021) também destacaram que variedades com maior atividade da SOD apresentaram menores teores de MDA e maior integridade de membranas, reforçando a associação entre eficiência do sistema antioxidante e resistência à seca. Dessa forma, os resultados do presente estudo corroboram os achados prévios, indicando que a SOD pode atuar como marcador bioquímico confiável para a seleção de genótipos tolerantes à seca em programas de melhoramento da cana-de-açúcar.

Com base nos resultados obtidos para a atividade da SOD, foi construído um dendrograma por meio de análise de agrupamento hierárquico, no qual foi possível observar a formação de quatro grupos de genótipos distintos (Figura 4). A predominância de variedades em um mesmo agrupamento indica similaridade no desempenho fisiológico em termos de defesa contra espécies reativas de oxigênio, sendo esta enzima a primeira linha de defesa do sistema antioxidante enzimático. Além disso, muitas dessas variedades coincidem com as que apresentaram menores teores de MDA, reforçando a relação inversamente proporcional entre SOD e a peroxidação lipídica, já relatada na literatura (Morais et al., 2018; Gill & Tuteja, 2010).

O grupo destacado em roxo, por exemplo, reúne as variedades RB 975201, VAT 90-212, RB 985476, RB 975242, RB 72454, RB 097217, RB 92579, RB 965902, RB 108519, RB 98710 e SP 80-3280, as quais apresentaram as maiores atividades de SOD. Entre estas, sete variedades (RB 98710, RB 108519, RB 097217, RB 72454, RB 92579, RB 985476 e VAT 90-212) também se destacaram entre os menores teores de MDA, indicando forte associação entre a eficiência antioxidante e a redução da peroxidação lipídica.

Este resultado evidencia que o aumento da atividade de SOD, em conjunto com menor acúmulo de MDA, pode ser considerado um indicador de tolerância ao estresse oxidativo em cana-de-açúcar, corroborando estudos prévios que apontam a SOD como uma das principais enzimas de defesa contra espécies reativas de oxigênio (Gill & Tuteja, 2010; Morais et al., 2018). A formação de grupos distintos também permite inferir a existência de variabilidade genética quanto ao sistema antioxidante entre os genótipos avaliados, representando uma ferramenta valiosa para a seleção de cultivares com maior grau de tolerância ao déficit hídrico.

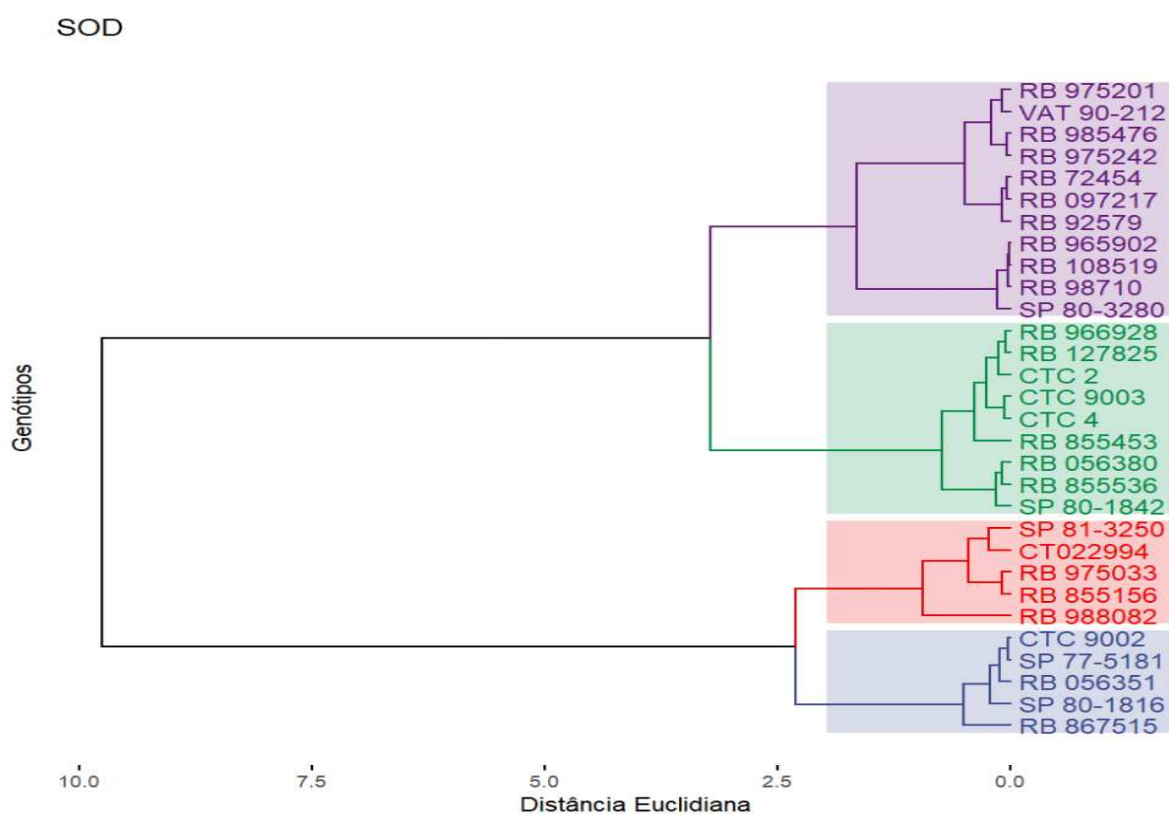


Figura 4. Dendrograma de agrupamento hierárquico dos genótipos de cana-de-açúcar em relação a avaliação da atividade da enzima superóxido dismutase sob condições de déficit hídrico induzido por polietilenoglicol 6000. O dendrograma obtido com distância euclidiana, mostrou quatro principais agrupamentos dos genótipos em resposta ao déficit hídrico.

5.3.2.2. Catalase

As enzimas pertencentes ao grupo das catalases (CAT) são oxidorrredutases localizadas principalmente nos peroxissomos, embora também possam ser encontradas nos glioxissomos. Essas enzimas exercem um papel fundamental no

metabolismo celular ao promoverem a desintoxicação do peróxido de hidrogênio (H_2O_2), uma ERO formada como subproduto da β -oxidação de ácidos graxos e, especialmente, da fotorrespiração. A CAT atua convertendo o H_2O_2 em água (H_2O) e oxigênio molecular (O_2), prevenindo a acumulação tóxica deste composto e, conseqüentemente, protegendo as células contra danos oxidativos (Holtman et al., 1994; Igamberdiev & Lea, 2002).

Os resultados evidenciam variações significativas na atividade da enzima entre os genótipos analisados. A variedade RB 975201 apresentou a maior atividade enzimática ($279,78 \mu\text{mol de H}_2\text{O}_2 \text{ min}^{-1} \text{ mg}^{-1}$ de proteína), seguida por CTC 2 (275,06) e SP 80-1842 (261,55), sugerindo maior capacidade antioxidativa e, possivelmente, maior tolerância ao estresse hídrico. Por outro lado, genótipos como VAT 90-212 (132,03), RB 056380 (161,27) e RB 98710 (191,08) apresentaram os menores níveis de atividade da CAT, o que pode indicar uma menor eficiência na eliminação do H_2O_2 sob condições de estresse (Tabela 3).

Esses dados reforçam a importância da CAT como um dos mecanismos de defesa contra o acúmulo de ROS em situações de limitação hídrica, sendo sua atividade um indicativo relevante para a seleção de genótipos mais tolerantes ao estresse abiótico.

Nas condições avaliadas neste trabalho, destacaram-se as variedades RB 975201, CTC 2, SP 80-1842, RB 108519, RB 867515, RB 855536, RB 056351, RB 127825, SP 80-1816 e RB 72454, que apresentaram as maiores atividades da enzima catalase (CAT) (Tabela 3). A elevada atividade desta enzima antioxidante sugere um maior potencial dessas variedades para o controle do acúmulo de espécies reativas de oxigênio (ROS), especialmente o peróxido de hidrogênio (H_2O_2), gerado sob condições de déficit hídrico induzido.

Corroborando esses achados, Morais et al. (2018), ao avaliarem variedades de cana-de-açúcar sob estresse hídrico, observaram uma relação sinérgica entre a atividade das enzimas CAT e SOD, cuja atuação coordenada esteve associada à redução dos níveis de peroxidação lipídica. Tal sincronismo entre os sistemas antioxidantes enzimáticos representa um mecanismo eficiente de tolerância ao estresse oxidativo, contribuindo para a manutenção da integridade celular sob condições adversas.

Tabela 3. Atividade da enzima Catalase em trinta variedades de cana-de-açúcar submetida á déficit hídrico induzido por Polietilenoglicol 6000.

Ranking	Variedade	$\mu\text{mol de H}_2\text{O}_2$ $\text{min}^{-1} \text{mg}^{-1}$ pro- teína	Ranking	Variedade	$\mu\text{mol de H}_2\text{O}_2$ $\text{min}^{-1} \text{mg}^{-1}$ pro- teína
1	RB 975201	279.7824	16	CTC 4	225.0787
2	CTC 2	275.0554	17	RB 975242	220.1694
3	SP 80-1842	261.5488	18	RB 965902	220.0949
4	RB 108519	257.3682	19	SP 77-5181	219.9329
5	RB 867515	256.1213	20	RB 855453	217.0898
6	RB 855536	254.2595	21	RB 92579	215.3006
7	RB 056351	239.5811	22	RB 988082	214.4692
8	RB 127825	238.143	23	CTC 9003	212.7144
9	SP 80-1816	236.9676	24	CTC 9002	210.6404
10	RB 72454	236.9326	25	CT022994	204.4359
11	SP 81-3250	236.757	26	RB 966928	202.0381
12	SP 80-3280	236.7059	27	RB 985476	199.1783
13	RB 855156	228.585	28	RB 98710	191.0759
14	RB 097217	227.974	29	RB 056380	161.268
15	RB 975033	227.8277	30	VAT 90-212	132.0294

Com base nos dados obtidos, foi construído um dendrograma (Figura 5) utilizando distância euclidiana e agrupamento hierárquico, permitindo a visualização da similaridade entre os genótipos com base na atividade da CAT. Observou-se a formação de quatro grupos distintos, evidenciando uma clara separação entre os genótipos com maior e menor atividade antioxidante.

O grupo identificado pela cor vermelha (RB 867515; RB 108519; RB 855536; SP 80-1842; CTC 2; RB 975201), por exemplo, abrange genótipos com elevada atividade de CAT, os quais podem ser considerados potenciais fontes de tolerância ao estresse hídrico. Já o grupo 4, identificado na cor azul, que inclui as variedades VAT 90-212 e RB 056380, apresentou os menores níveis de atividade enzimática, indicando uma maior susceptibilidade ao estresse oxidativo.

Esses resultados corroboram a relevância da CAT como marcador bioquímico de tolerância à seca e reforçam a importância da caracterização funcional de genótipos em programas de melhoramento voltados para ambientes com limitação hídrica (Morais et al., 2018).

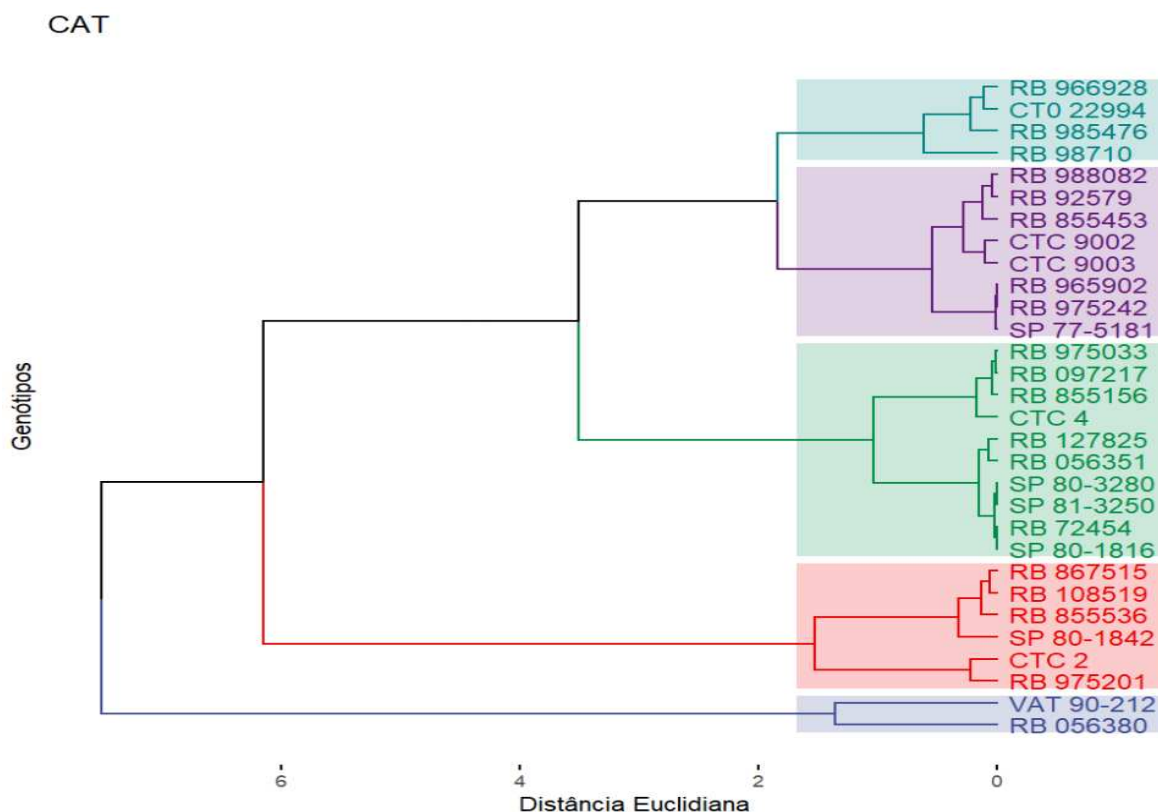


Figura 5. Dendrograma de agrupamento hierárquico dos genótipos de cana-de-açúcar em relação a avaliação da atividade da enzima catalase sob condições de déficit hídrico induzido por polietilenoglicol 6000. O dendrograma obtido com distância euclidiana, mostrou cinco principais agrupamentos dos genótipos em resposta ao déficit hídrico.

5.3.2.3. Peroxidase

As enzimas do grupo das peroxidases (POX) constituem um grupo importante de enzimas antioxidantes que participam da eliminação do peróxido de hidrogênio (H_2O_2), protegendo as células vegetais contra danos oxidativos. Estas enzimas atuam utilizando fenóis e outros compostos doadores de elétrons para catalisar a conversão do H_2O_2 em água, sendo, portanto, fundamentais na manutenção da homeostase redox, principalmente sob condições de estresse abiótico, como o déficit hídrico (Mittler, 2002; Passardi et al., 2005).

Sob condições de estresse hídrico induzido por PEG 6000, a atividade específica da POX apresentou variação significativa entre os 30 genótipos de *Saccharum spp.* avaliados, com valores oscilando entre 8,9694 e 4,4166 $\mu\text{mol min}^{-1} \text{mg}^{-1}$ de proteína (Tabela 4). Essa ampla amplitude de resposta evidencia diferenças marcantes na eficiência do sistema antioxidante enzimático entre os materiais genéticos testados.

Tabela 4. Atividade da enzima Peroxidase em trinta variedades de cana-de-açúcar submetida á déficit hídrico induzido por Polietilenoglicol 6000.

Ranking	Variedade	POX ($\mu\text{mol min}^{-1} \text{mg}^{-1}$ proteína)	Ranking	Variedade	POX ($\mu\text{mol min}^{-1} \text{mg}^{-1}$ proteína)
1	RB 965902	8.9694	16	RB 92579	6.3767
2	RB 72454	8.4392	17	RB 855156	6.3453
3	RB 108519	8.3426	18	VAT 90-212	5.8898
4	RB 097217	8.1116	19	RB 98710	5.8669
5	RB 855453	7.6589	20	RB 975242	5.8054
6	SP 80-3280	7.5477	21	RB 966928	5.7907
7	RB 127825	7.2440	22	RB 867515	5.7762
8	CTC 2	7.2305	23	RB 975201	5.7593
9	RB 855536	7.1628	24	SP 80-1816	5.7535
10	SP 80-1842	7.0506	25	RB 985476	5.6214
11	RB 975033	7.0233	26	CTC 9003	5.4063
12	CTC 4	6.9129	27	CT022994	5.1385
13	SP 81-3250	6.8906	28	RB 056351	4.9780
14	CTC 9002	6.7391	29	RB 988082	4.9393
15	RB 056380	6.7252	30	SP 77-5181	4.4166

A análise de agrupamento hierárquico com base nesses dados permitiu a formação de quatro grupos de similaridade fisiológica (Figura 6), demonstrando a existência de heterogeneidade quanto à capacidade de neutralização das ROS sob déficit hídrico.

O grupo identificado em verde, composto por RB 965902, RB 72454, RB 108519 e RB 097217, apresentou os maiores níveis de atividade enzimática, superiores a $8,1 \mu\text{mol min}^{-1} \text{mg}^{-1}$ de proteína. A elevada atividade de POX nestes genótipos sugere um sistema antioxidante altamente funcional, capaz de conferir maior proteção contra o estresse oxidativo e, por conseguinte, maior potencial de tolerância ao déficit hídrico.

O conjunto de variedades demarcado em roxo reuniu genótipos com atividade moderadamente elevada ($6,3$ a $7,6 \mu\text{mol min}^{-1} \text{mg}^{-1}$), tais como RB 975033, SP 80-1842, SP 80-3280, CTC 4, RB 127825, CTC 2, RB 855536, RB 855453, entre outros. Esses materiais apresentam uma resposta antioxidante relevante, que pode ser suficiente para suportar condições de estresse hídrico de intensidade moderada.

O grupo azul englobou genótipos com atividade de POX entre $5,1$ e $5,8 \mu\text{mol min}^{-1} \text{mg}^{-1}$, incluindo RB 985476, RB 975242, RB 966928, RB 975201, SP 80-1816, RB 867515, RB 98710, VAT 90-212 e CTC 9003. Este grupo apresenta uma

capacidade antioxidante intermediária a baixa, indicando eficiência fisiológica limitada frente à indução do estresse oxidativo.

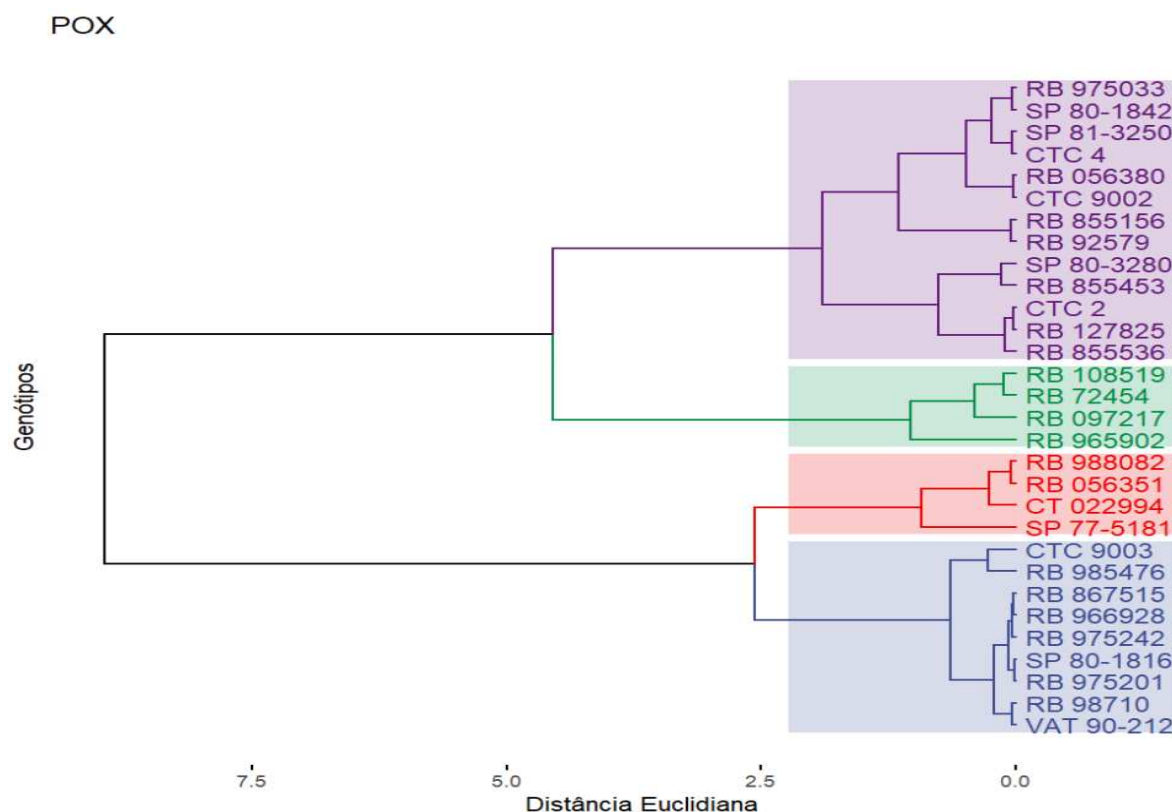


Figura 6. Dendrograma de agrupamento hierárquico dos genótipos de cana-de-açúcar em relação a avaliação da atividade da enzima peroxidase sob condições de déficit hídrico induzido por polietilenoglicol 6000. O dendrograma obtido com distância euclidiana, mostrou cinco principais agrupamentos dos genótipos em resposta ao déficit hídrico.

Já o grupo vermelho, formado por RB 988082, RB 056351, CT 022994 e SP 77-5181, apresentou as menores atividades enzimáticas ($< 5,0 \mu\text{mol min}^{-1} \text{mg}^{-1}$), sugerindo um sistema antioxidante pouco responsivo e, portanto, uma provável menor adaptabilidade às condições de déficit hídrico.

De acordo com os resultados de Rani et al. (2023), que identificaram correlação positiva entre a atividade da POX e o índice SPAD, além de observarem aumento da atividade de POX e redução da atividade CAT ao longo do tempo em plantas sob estresse hídrico progressivo. Esse comportamento reforça a hipótese de ajuste compensatório entre enzimas antioxidantes para manutenção do equilíbrio redox celular.

Além disso, foi observado neste estudo, em determinados casos, associação entre os níveis de POX e os teores de MDA, indicando que em alguns genótipos, a

maior atividade antioxidante induziu a uma menor peroxidação lipídica — resultado consistente com estudos prévios (Gomes et al., 2010; Moura et al., 2010). Tais evidências reforçam o papel da POX como componente funcional relevante na defesa contra o estresse oxidativo em plantas.

Dessa forma, a atividade da POX pode ser considerada um marcador bioquímico confiável para discriminação de genótipos quanto à tolerância ao estresse hídrico. A combinação de análises enzimáticas e estatísticas multivariadas, como a formação de grupos via análise de agrupamento, constitui uma abordagem eficaz no suporte à seleção assistida em programas de melhoramento genético voltados à tolerância à deficiência hídrica.

5.3.3. Índice SPAD

Em relação ao índice SPAD, diversos autores têm indicado essa variável como um parâmetro confiável para avaliação da tolerância das plantas ao déficit hídrico, uma vez que reflete indiretamente o teor de clorofila e, portanto, a integridade funcional do aparato fotossintético. Em condições de estresse, reduções acentuadas no valor do SPAD estão geralmente associadas à degradação de pigmentos, perda de eficiência fotossintética e acúmulo de EROs. Por essa razão, o índice SPAD tem sido amplamente recomendado como critério auxiliar na seleção de genótipos tolerantes ao déficit hídrico, especialmente em programas de melhoramento genético voltados à resiliência em ambientes restritivos (Silva et al., 2012; Rodrigues et al., 2015; Rani et al., 2023).

Silva et al. (2011), ao avaliarem parâmetros fisiológicos associados à tolerância ao déficit hídrico em cana-de-açúcar, destacaram o índice SPAD como um indicador promissor para a seleção de genótipos adaptados a condições de estresse hídrico. Os autores observaram que genótipos mais tolerantes apresentaram menores reduções nos valores de SPAD sob déficit hídrico, o que reflete maior estabilidade do conteúdo de clorofila e, conseqüentemente, da atividade fotossintética. Diante disso, sugerem o uso do SPAD como ferramenta prática e eficiente em programas de melhoramento genético, contribuindo para a seleção de materiais com maior resiliência fisiológica frente à limitação hídrica.

Gomathi et al. (2020) também observaram que genótipos de cana-de-açúcar capazes de manter padrões fisiológicos estáveis, mesmo sob condições de déficit

hídrico, apresentaram maior tolerância ao estresse. Dentre os parâmetros avaliados, o índice SPAD destacou-se como um dos mais consistentes, sendo mantido em níveis mais elevados nos genótipos tolerantes, o que indica preservação da integridade do aparato fotossintético e menor degradação de pigmentos. Esses resultados reforçam a utilidade do SPAD como indicador fisiológico sensível e eficiente para a seleção de materiais genéticos mais adaptados ao estresse hídrico.

No presente estudo, os valores do índice SPAD variaram de 53,91 a 42,64 entre os 30 genótipos de cana-de-açúcar avaliados sob estresse hídrico induzido por PEG 6000 (Tabela 5), indicando diferenças significativas na manutenção da integridade do aparato fotossintético entre os materiais genéticos. As variedades RB 097217, RB 975033, RB 108519, CTC 9002 e RB 127825 destacaram-se com os maiores valores de SPAD, superiores a 51,0, sugerindo maior capacidade de preservação do conteúdo de clorofila e, portanto, uma resposta mais eficiente ao estresse hídrico.

Esses genótipos apresentam características que podem estar associadas a um sistema antioxidante mais funcional, conforme já discutido com base na atividade da enzima peroxidase (POX). Por exemplo, RB 108519 e RB 097217 aparecem entre os primeiros colocados tanto em SPAD quanto em atividade de POX, o que reforça a hipótese de que a preservação da fotossíntese e o controle do estresse oxidativo são processos interdependentes em condições de restrição hídrica.

Em contrapartida, genótipos como RB 056380, RB 985476, RB 92579 e SP 77-5181, que apresentaram os menores índices SPAD ($< 45,0$), podem estar mais suscetíveis à degradação de pigmentos e danos ao sistema fotossintético, indicativos de maior sensibilidade ao estresse. Esses resultados corroboram os achados de Silva et al. (2011) e Gomathi et al. (2020), que destacam o SPAD como um critério prático e eficiente na seleção de materiais tolerantes ao déficit hídrico, dada sua relação com o desempenho fisiológico e a homeostase redox.

A associação entre altos valores de SPAD, maior atividade antioxidante (como observado para POX) e baixos níveis de MDA reforça a importância de integrar múltiplos indicadores fisiológicos na discriminação de genótipos tolerantes, conferindo maior robustez aos programas de seleção em ambientes com limitação hídrica.

Tabela 5. Índice SPAD em trinta variedades de cana-de-açúcar submetida á déficit hídrico induzido por Polietilenoglicol 6000.

Ranking	Variedade	Índice SPAD	Ranking	Variedade	Índice SPAD
1	RB 097217	53.91	16	CTC 2	47.63
2	RB 975033	52.81	17	RB 966928	47.46
3	RB 108519	52.23	18	CT022994	47.15
4	CTC 9002	51.76	19	SP 80-1816	46.49
5	RB 127825	51.30	20	RB 72454	45.99
6	CTC 9003	50.37	21	RB 975242	45.98
7	RB 965902	50.30	22	VAT 90-212	45.88
8	RB 855156	49.94	23	RB 056351	45.45
9	RB 855536	49.46	24	RB 98710	45.06
10	SP 80-3280	49.33	25	RB 867515	44.98
11	SP 81-3250	48.93	26	RB 975201	44.56
12	SP 80-1842	48.87	27	SP 77-5181	44.52
13	RB 988082	48.53	28	RB 92579	44.36
14	CTC 4	48.28	29	RB 985476	42.64
15	RB 855453	48.22	30	RB 056380	42.64

Com base nesses resultados, foi construído um dendrograma, permitindo a visualização da similaridade entre os genótipos quanto ao índice SPAD sob estresse hídrico, e possibilitando a formação de grupos fisiologicamente distintos em relação à preservação da clorofila foliar. Foram identificados quatro grupos principais, evidenciando a variabilidade genética na resposta ao déficit hídrico induzido por polietilenoglicol 6000 (Figura 7).

Os genótipos classificados no grupo identificado na cor verde — incluindo RB 097217, RB 108519, RB 975033, CTC 9002 e RB 127825 — apresentaram os maiores valores de SPAD, indicando elevada estabilidade fotossintética frente à limitação hídrica. Esses materiais coincidem, em parte, com os que também se destacaram pela alta atividade da enzima POX sugerindo um possível sinergismo entre resposta antioxidante e manutenção da integridade do aparato fotossintético.

O grupo demarcado na cor roxa, embora composto por genótipos com desempenho intermediário em SPAD, agrega materiais como SP 80-3280 e RB 855536, que também demonstraram desempenho destacado na atividade da POX. Isso reforça a hipótese de que genótipos com respostas antioxidantes eficientes tendem a preservar melhor seus mecanismos fotossintéticos, mesmo que os valores de SPAD não sejam os mais elevados.

Por outro lado, o grupo identificado em vermelho compreende variedades como RB 056380, RB 92579, RB 975201, SP 77-5181 e RB 056351, que apresentaram os

menores valores de SPAD, sendo indicativas de maior degradação de pigmentos e maior suscetibilidade ao estresse oxidativo.

Por fim, o grupo apresentado em azul, que possui valores intermediários a baixos de SPAD, com destaque para RB 72454 e RB 975242, e, embora alguns desses materiais tenham se destacado na atividade antioxidante, a redução do índice SPAD pode indicar que a eficiência fotossintética foi afetada, mesmo com o sistema de defesa parcialmente ativado.

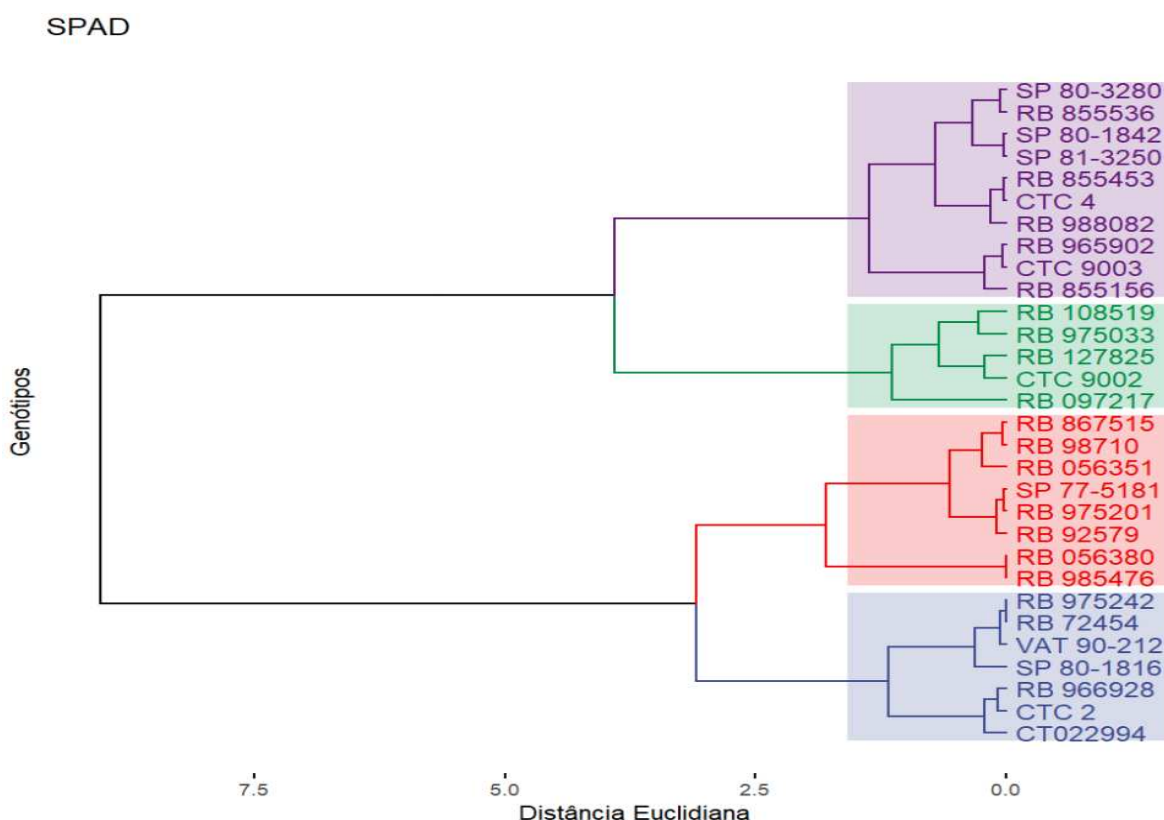


Figura 7. Dendrograma de agrupamento hierárquico dos genótipos de cana-de-açúcar em relação à avaliação do índice SPAD sob condições de déficit hídrico induzido por polietilenoglicol 6000. O dendrograma obtido com distância euclidiana, mostrou cinco principais agrupamentos dos genótipos em resposta ao déficit hídrico.

Essa análise integrativa demonstra que a combinação de indicadores fisiológicos e bioquímicos, como SPAD, POD e MDA, permite maior precisão na discriminação de genótipos tolerantes ao déficit hídrico, contribuindo para a seleção de materiais mais promissores em programas de melhoramento genético.

A organização dos genótipos em grupos distintos também corrobora os dados bioquímicos observados para a atividade da enzima peroxidase e os níveis de MDA, sugerindo que os mecanismos antioxidantes e a estabilidade fotossintética atuam de

forma complementar na modulação da tolerância ao estresse hídrico. Dessa forma, o uso combinado desses parâmetros permite uma caracterização mais robusta da resposta fisiológica das variedades e fornece subsídios para estratégias de seleção em programas de melhoramento genético.

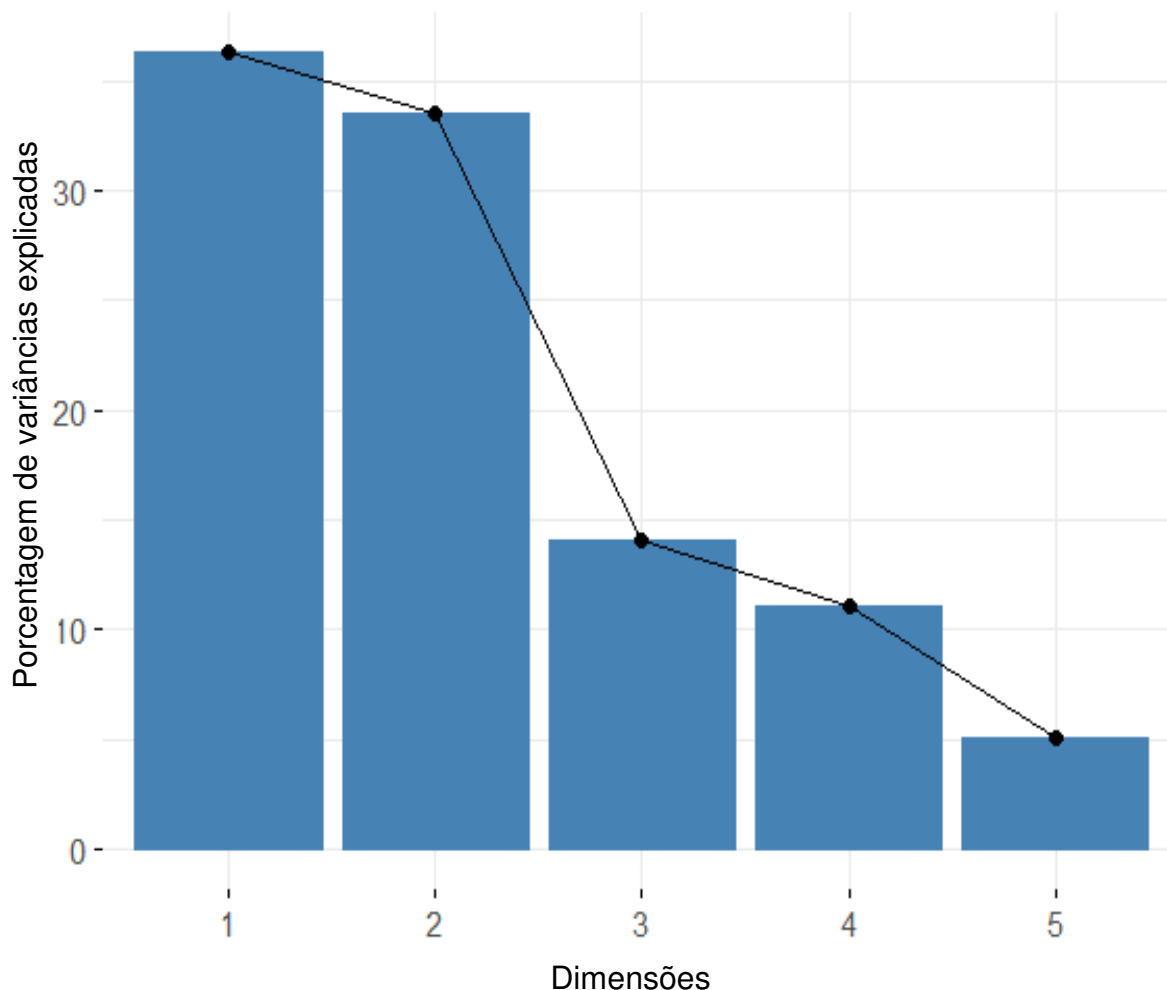
5.3.4. Análise de componentes principais sob condições de déficit hídrico

Após a confirmação de diferenças significativas nos teores de MDA entre os genótipos avaliados no modelo completo, procedeu-se à determinação da atividade de enzimas relacionadas ao metabolismo antioxidante. Essa etapa foi fundamentada na premissa de que os componentes do sistema antioxidante enzimático permitem distinguir os genótipos quanto à eficiência na neutralização das espécies reativas de oxigênio (EROs), sendo, portanto, indicativos da resiliência fisiológica frente ao estresse oxidativo induzido pelo déficit hídrico.

A análise de componentes principais (PCA) é uma técnica estatística multivariada amplamente utilizada para a redução da dimensionalidade de conjuntos de dados complexos, permitindo a visualização simultânea de múltiplas variáveis. Essa abordagem é particularmente relevante em programas de melhoramento genético, pois facilita a identificação de variáveis com maior contribuição para a variabilidade genética entre os genótipos avaliados, otimizando os critérios de seleção (Ongala et al., 2016).

De acordo com a análise de componentes principais (PCA), os cinco componentes (CP1 a CP5) explicaram conjuntamente 100% da variância total dos dados, sendo que CP1, CP2, CP3, CP4 e CP5 foram responsáveis por 36,28%, 33,54%, 14,09%, 11,03% e 5,05% da variabilidade, respectivamente (Gráfico 2). Esse resultado evidencia que os dois primeiros componentes principais acumulam 69,82% da variância total, permitindo a representação bidimensional dos dados com elevado poder explicativo. Com base nesse plano fatorial (CP1 × CP2), observou-se a distribuição dos genótipos em diferentes quadrantes (Gráfico 3), refletindo a diversidade fisiológica e bioquímica entre as variedades avaliadas quanto às variáveis

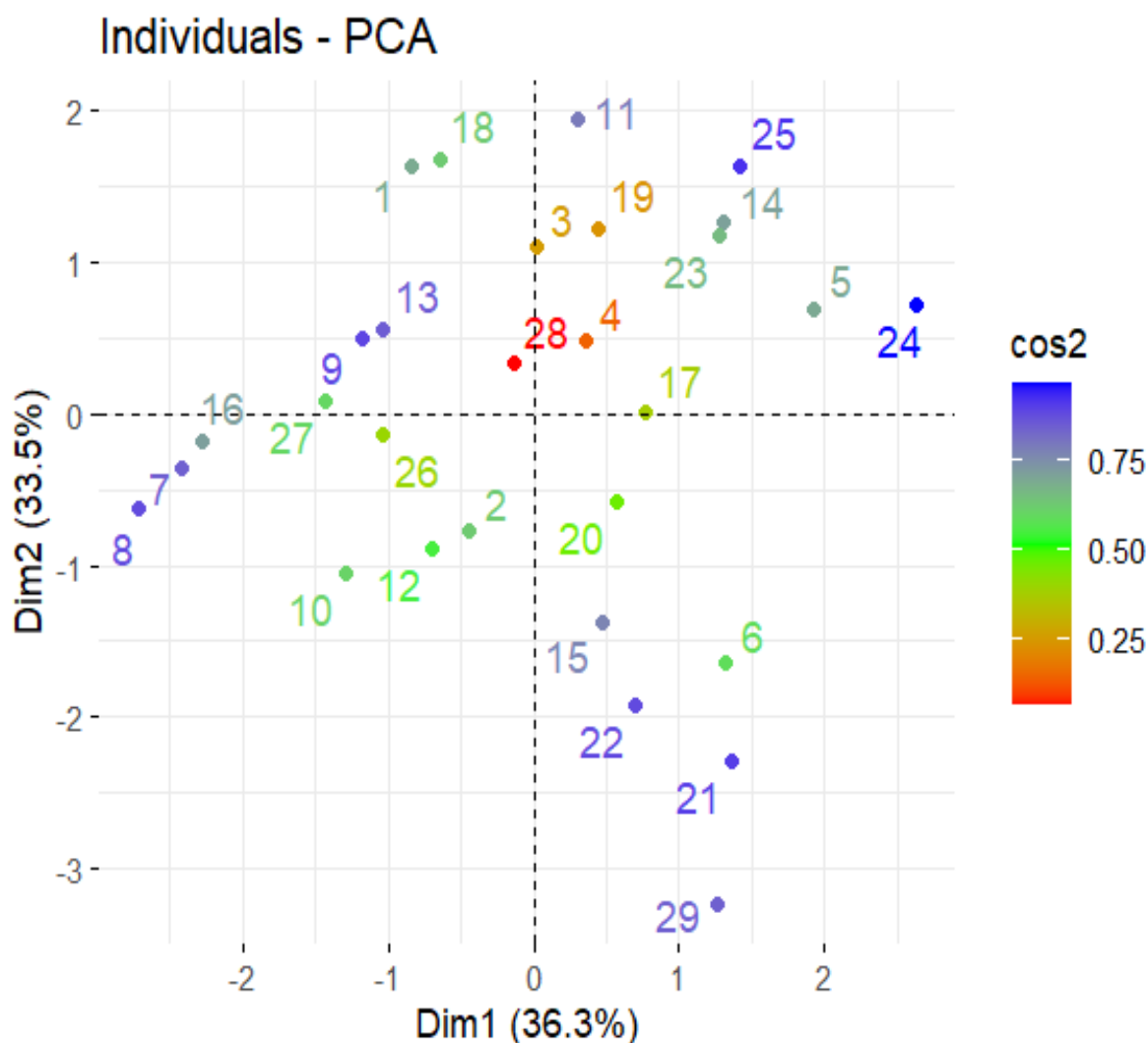
Gráfico 2. Porcentagem das variâncias explicadas pelos componentes 1 a 5 de acordo com a análise de componentes principais analisado em 30 variedades de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) submetidas a déficit hídrico induzido por Polietilenoglicol 6000.



De acordo com Hair et al. (2009), cada componente principal representa uma proporção da variabilidade total contida no conjunto de dados originais. Segundo Rencher (2002), recomenda-se que os dois primeiros componentes principais (CPs) expliquem, conjuntamente, pelo menos 70% da variância total, a fim de garantir uma representação adequada da estrutura dos dados no plano bidimensional. No presente estudo, os dois primeiros componentes explicaram conjuntamente 69,8% da variância, valor muito próximo ao limite recomendado, o que reforça a adequação da utilização do plano formado por CP1 e CP2 para a interpretação multivariada das variáveis.

Os demais componentes (CP3 a CP5) apresentaram contribuição progressivamente menor, com 14,09%, 11,03% e 5,05%, respectivamente, o que reforça a adequação da utilização de um plano bidimensional (CP1 × CP2) para a visualização e interpretação dos dados multivariados.

Gráfico 3. Análise de componentes principais em trinta variedades de cana-de-açúcar submetida a condições de déficit hídrico simulado por polietilenoglicol 6000.



Essa distribuição indica que as variáveis utilizadas possuem alta colinearidade entre si, sendo capturadas eficientemente pelos dois primeiros eixos da PCA. A adoção do plano CP1 × CP2, portanto, é estatisticamente justificada para representar a dispersão dos genótipos e a associação entre as variáveis bioquímicas e fisiológicas, possibilitando a identificação de padrões de tolerância ao estresse hídrico entre os materiais genéticos avaliados.

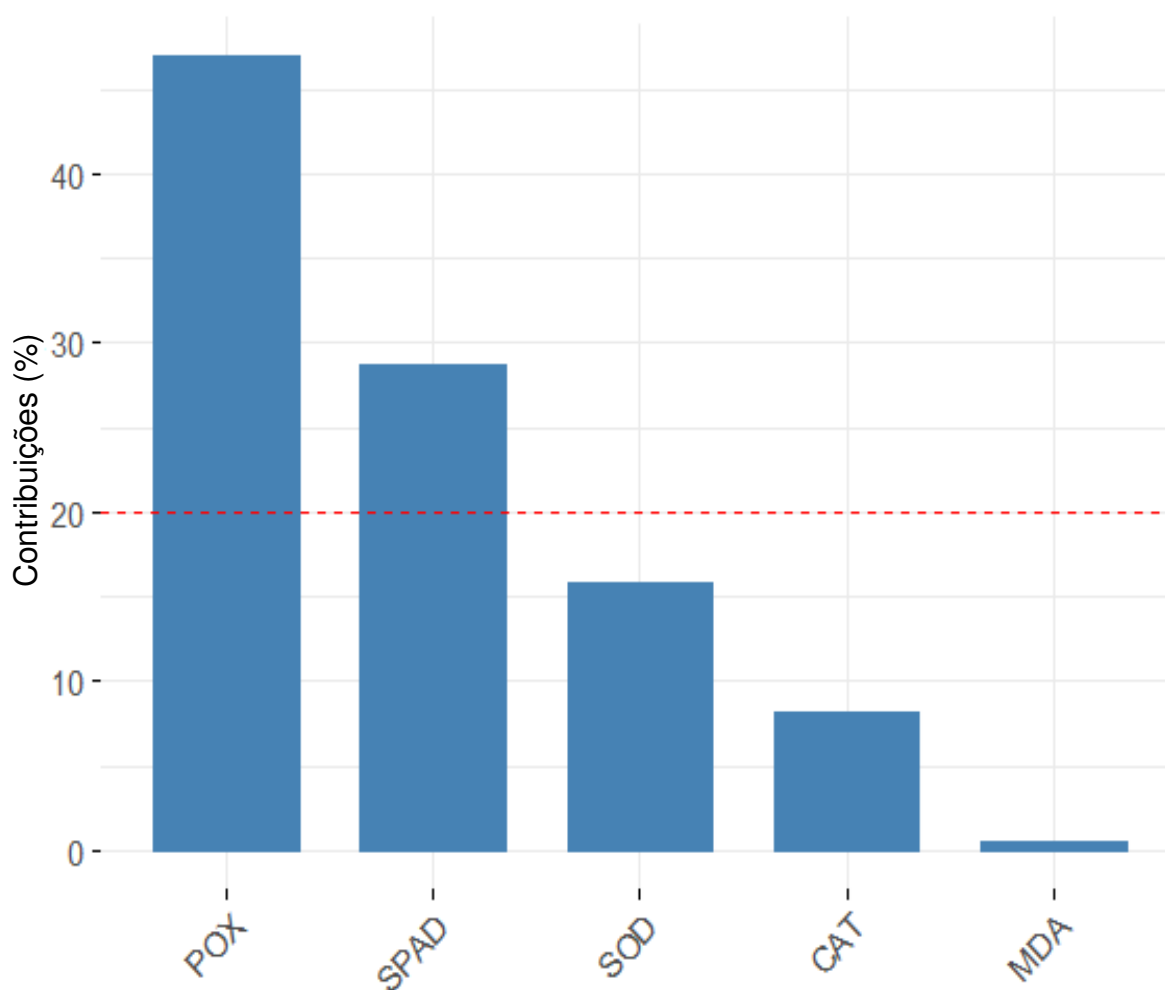
A distribuição dos 30 genótipos no plano bidimensional formado pelos dois primeiros componentes principais (Dim1 e Dim2), que juntos explicam 69,8% da variabilidade total dos dados, permitiu a diferenciação dos materiais quanto aos parâmetros bioquímicos e fisiológicos associados à tolerância ao estresse hídrico (Gráfico 3). A coloração dos pontos reflete os valores de \cos^2 , que indicam a qualidade da representação dos genótipos nos dois primeiros componentes. Valores mais próximos de azul ($> 0,75$) indicam melhor representação, enquanto os tons alaranjados e vermelhos correspondem a projeções menos explicativas.

Com base na análise das contribuições relativas das variáveis para a construção dos componentes principais (Gráfico 4), observou-se que a atividade da POX foi a variável com maior influência na variabilidade multivariada, contribuindo com mais de 46,94% para a formação dos componentes, seguida pelo índice SPAD (aproximadamente 28,68%). Ambas as variáveis situaram-se acima do limite médio de contribuição esperado (20%), destacado pela linha tracejada, sendo, portanto, os principais descritores na separação dos genótipos no plano bidimensional da PCA (Gráfico 4).

A atividade da SOD apresentou contribuição intermediária (~16%), enquanto CAT e, especialmente, MDA, tiveram baixa participação na explicação da variância, situando-se abaixo do limite de corte. Esses resultados reforçam a relevância funcional da POX e do SPAD na distinção entre genótipos quanto à tolerância ao estresse hídrico, sugerindo que tais parâmetros devem ser priorizados em estratégias de seleção assistida por caracteres fisiológicos e bioquímicos.

No contexto do metabolismo antioxidante, diversos autores têm associado a maior atividade da enzima POX à tolerância ao déficit hídrico em cana-de-açúcar, destacando seu potencial como marcador bioquímico em programas de melhoramento genético. Ngamhui et al. (2015) observaram que genótipos classificados como tolerantes apresentaram incrementos significativos na atividade da POX em comparação àqueles suscetíveis ao estresse hídrico, recomendando, portanto, a utilização dessa variável como critério de seleção para resistência fisiológica. Esses achados corroboram os resultados obtidos no presente estudo, em que a POX foi a variável de maior contribuição para a explicação da variância multivariada, conforme evidenciado pela análise de componentes principais.

Gráfico 4. Análise de componentes principais indicando a porcentagem de contribuição de variáveis POX (peroxidase), SPAD (índice SPAD), SOD (superóxido dismutase), CAT (catalase) e MDA (malondialdeído) com base no componente 1, avaliado em 30 variedades de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) submetidas a déficit hídrico induzido por Polietilenoglicol 6000.



Rani et al. (2024) também destacam a relação positiva entre a atividade da POX e parâmetros fisiológicos associados à tolerância ao estresse hídrico, como índice SPAD, estabilidade de membranas celulares e conteúdo relativo de água. Segundo os autores, o aumento na atividade dessa enzima está diretamente ligado à eficiência na eliminação de EROs, contribuindo para a proteção das organelas celulares, especialmente os cloroplastos. Como consequência, há menor degradação de pigmentos fotossintéticos e manutenção da integridade funcional do aparato fotossintético, refletida nos maiores valores de SPAD observados em genótipos com

atividade enzimática elevada. Tais evidências reforçam o papel funcional da POX como um importante componente do sistema antioxidante em condições de estresse abiótico, e sua utilidade como critério de seleção para resistência fisiológica.

Os dados obtidos no presente estudo corroboram os resultados relatados por Silva et al. (2014), os quais, ao avaliarem o conteúdo de pigmentos fotossintéticos em quatro variedades de cana-de-açúcar sob condições de déficit hídrico, observaram correlação significativa entre o teor de clorofilas e os valores do índice SPAD. Com base nesses achados, os autores recomendaram o uso do SPAD como indicador indireto e eficiente do conteúdo de clorofila, e, conseqüentemente, como ferramenta auxiliar na seleção de cultivares mais tolerantes ao estresse hídrico em programas de melhoramento genético da cultura.

Sob condições de baixa umidade do solo, Madhav et al. (2017), ao avaliarem duas variedades de cana-de-açúcar, observaram que os maiores acúmulos de biomassa ocorreram em materiais que apresentaram respostas mais expressivas das enzimas SOD e POX. Dessa forma, os autores recomendam a utilização dessas enzimas como critérios de seleção, em conjunto com a avaliação do conteúdo relativo de água.

É possível encontrar na literatura, em diversas culturas, evidências da importância das enzimas POX e SOD como critérios para a seleção de variedades tolerantes ao déficit hídrico, devido à sua contribuição na redução dos danos oxidativos. Moraes et al. (2018), por exemplo, destacam o papel dessas enzimas na diminuição dos danos oxidativos, avaliados por meio do conteúdo de MDA, observando que as variedades consideradas tolerantes apresentaram maior atividade das enzimas do metabolismo antioxidante.

Ao avaliar o Componente Principal 2 (PC2) da Análise de Componentes Principais (PCA), verifica-se que as variáveis MDA e CAT apresentaram as maiores contribuições individuais, com 40,00% e 25,89%, respectivamente (Gráfico 5). Essa predominância sugere que o dano oxidativo (representado pelo acúmulo de malondialdeído) e a capacidade antioxidante enzimática (representada pela atividade da catalase) foram os principais fatores responsáveis pela diferenciação das 30 variedades de cana-de-açúcar sob déficit hídrico induzido por polietilenoglicol (PEG 6000).

A elevada contribuição do MDA indica que o nível de peroxidação lipídica variou consideravelmente entre os genótipos, evidenciando diferentes graus de

suscetibilidade ao estresse hídrico. Por sua vez, a CAT desempenha papel crucial na eliminação do peróxido de hidrogênio (H_2O_2), um dos principais produtos tóxicos derivados do estresse oxidativo, o que reforça sua importância como indicador da eficiência do sistema de defesa antioxidante. Portanto, genótipos com menores níveis de MDA e maior atividade de CAT tendem a apresentar maior tolerância ao déficit hídrico, sendo candidatos promissores para programas de melhoramento genético visando ambientes de baixa disponibilidade hídrica.

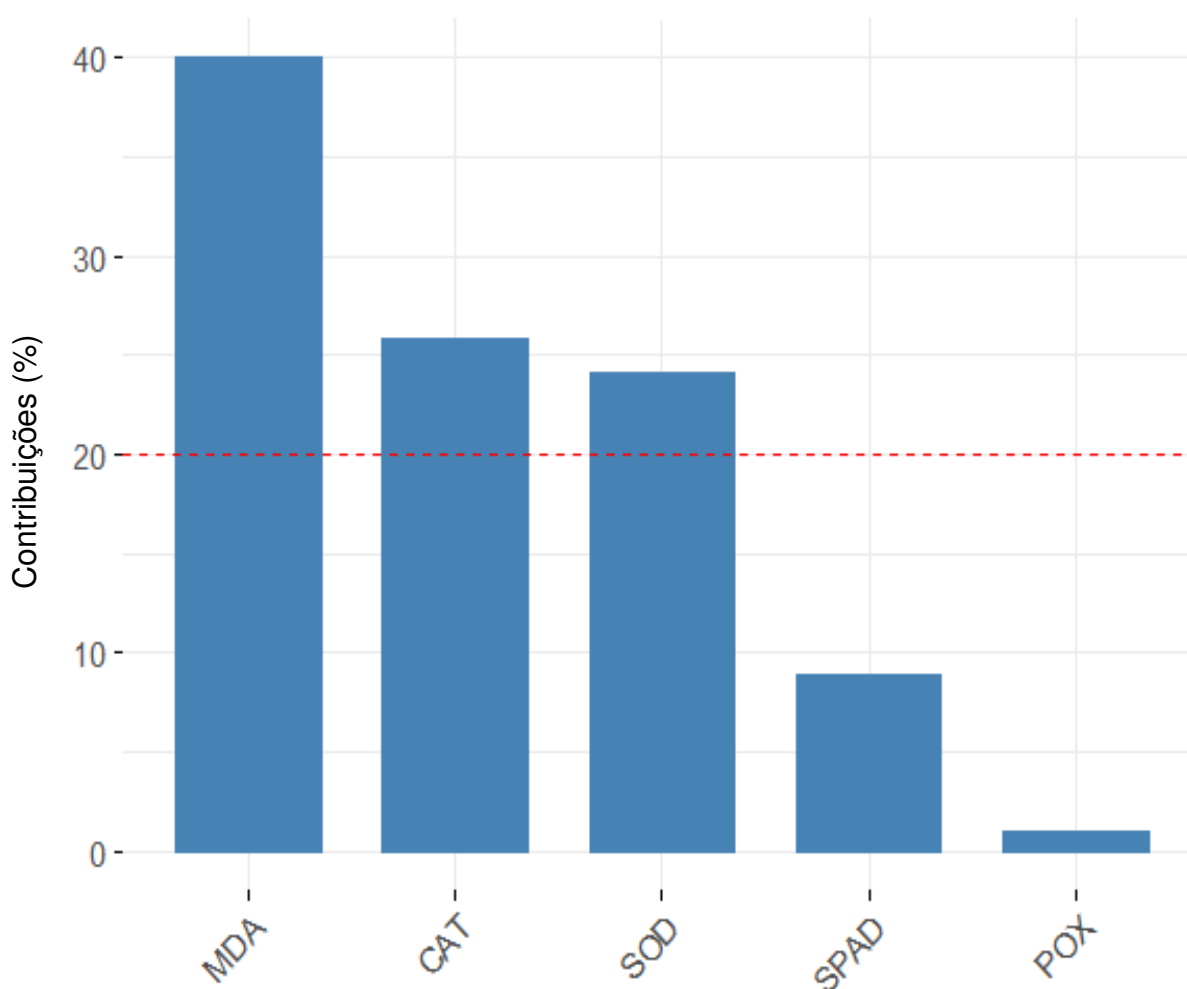
O MDA está diretamente associado ao nível de danos às estruturas celulares, sendo um dos principais produtos finais da peroxidação lipídica. Em condições de déficit hídrico, ocorre um desequilíbrio entre a geração e a inativação das EROs, o que resulta no acúmulo de formas tóxicas de oxigênio nos tecidos vegetais. Esse excesso de EROs pode comprometer membranas celulares, proteínas e ácidos nucleicos. Dessa forma, o MDA tem sido amplamente utilizado como um indicador confiável da intensidade do estresse oxidativo e da atividade do metabolismo antioxidante, englobando tanto os mecanismos enzimáticos quanto os não enzimáticos (Hodges et al., 1999; Shulaev e Oliver, 2006; Pagariya et al., 2012).

Na cultura da cana-de-açúcar, diversos autores têm adotado a seleção de variedades com maior tolerância ao déficit hídrico com base em menores níveis de MDA, uma vez que valores reduzidos indicam menor dano oxidativo (Cia et al., 2012; Sales et al., 2015). No entanto, essa variável é frequentemente considerada de baixa especificidade, por estar sujeita à influência de múltiplos fatores fisiológicos e bioquímicos, como a intensidade do estresse, o estágio fenológico da planta e a eficiência dos mecanismos de defesa antioxidante. Apesar dessas limitações, Abbas et al. (2014) ainda recomendam o uso da peroxidação lipídica como um critério válido e acessível para a seleção de genótipos tolerantes ao estresse hídrico, especialmente quando integrada a outras variáveis fisiológicas.

Estudos como o de Boaretto et al. (2014), conduzidos com plantas jovens de cana-de-açúcar, demonstraram que o déficit hídrico promove um aumento significativo no conteúdo de MDA, evidenciando intensificação do processo de peroxidação lipídica. Os autores também observaram que os níveis mais elevados de MDA foram detectados em variedades sabidamente mais suscetíveis ao estresse hídrico, o que reforça a correlação entre aumento do dano oxidativo e menor tolerância fisiológica. Esses achados sustentam a utilidade do MDA como um indicador da resposta

diferencial entre genótipos frente à escassez hídrica, ainda que sua especificidade seja limitada quando considerada isoladamente.

Gráfico 5. Análise de componentes principais indicando a porcentagem de contribuição de variáveis POX (Peroxidase), SPAD (índice SPAD), SOD (Superóxido Dismutase), CAT (Catalase) e MDA (Malondialdeído) com base no componente 2, avaliado em 30 variedades de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) submetidas a déficit hídrico induzido por Polietilenoglicol 6000.



Os níveis de MDA nas plantas são diretamente modulados pela atividade do metabolismo antioxidante, o qual pode ser dividido em dois grandes grupos: enzimático e não enzimático (Carvalho & Neto, 2016). O sistema não enzimático inclui compostos bioativos que atuam na neutralização de EROs, como prolina, ascorbato, glutatona, alcaloides, fenóis, tocoferóis e carotenoides, os quais desempenham papel

fundamental na proteção celular sob estresse abiótico. Por outro lado, o sistema enzimático é composto por enzimas antioxidantes responsáveis pela desintoxicação direta de EROs, destacando-se a SOD, CAT, POX e APX (Morais et al., 2018). O equilíbrio e a eficiência desses sistemas são determinantes na capacidade da planta em mitigar os efeitos deletérios do estresse oxidativo, o que influencia diretamente os níveis de peroxidação lipídica e, conseqüentemente, o acúmulo de MDA.

Na cultura da cana-de-açúcar, a atividade da enzima CAT tem sido amplamente investigada em virtude de sua importante função na neutralização das EROs, especialmente o peróxido de hidrogênio (H_2O_2). A quantificação da CAT e a sua persistência sob condições de estresse, tanto biótico quanto abiótico, têm se mostrado parâmetros relevantes na caracterização da capacidade antioxidante dos genótipos. Nesse sentido, níveis elevados e estáveis de atividade de CAT sob déficit hídrico são indicativos de maior eficiência na resposta fisiológica ao estresse, sendo, portanto, uma variável promissora para a seleção de variedades mais tolerantes em programas de melhoramento genético

De forma interessante, Teixeira et al. (2022) observaram que, sob condições de déficit hídrico severo, ocorreu uma redução na atividade da enzima catalase (CAT) nas variedades de cana-de-açúcar avaliadas. Esse comportamento foi também relatado por Ngamhui et al. (2015), que além da diminuição da CAT, verificaram um aumento compensatório na atividade da Ascorbato Peroxidase (APX). Esses resultados sugerem que, diante de condições extremas de estresse, a planta pode reorganizar seu sistema antioxidante enzimático, reduzindo a dependência da CAT e ampliando a participação de outras enzimas, como a APX, para manter o controle redox e a proteção celular. Tal plasticidade funcional pode ser decisiva na tolerância ao estresse hídrico, especialmente em genótipos mais resilientes.

Em estudo com variedades de cana-de-açúcar submetidas ao déficit hídrico, Cia et al. (2012) observaram que determinados genótipos foram capazes de manter níveis elevados de atividade da enzima CAT, enquanto outros apresentaram uma redução acentuada dessa atividade. Essa diferença no comportamento entre os genótipos pode estar relacionada à eficiência dos mecanismos antioxidantes intrínsecos de cada variedade. Assim, a manutenção da atividade de CAT em condições adversas pode representar um indicador fisiológico de maior tolerância ao estresse hídrico, sendo um atributo potencialmente útil para a seleção de materiais genéticos promissores em programas de melhoramento.

6. CONCLUSÕES

O presente estudo demonstrou que o tratamento com PEG 6000 foi eficaz na indução do déficit hídrico, evidenciado pelas diferenças significativas nas variáveis SOD, POX e MDA entre os genótipos avaliados. A resposta ao estresse oxidativo variou entre as variedades, com destaque para RB 097217, RB 92579, RB 72454, RB 98710, SP 80-1842, CTC 4, RB 855453, RB 108519, RB 985476 e VAT 90-212, que apresentaram menores níveis de MDA, indicando menor dano oxidativo. Contudo, a ocorrência de altos níveis de peroxidação também em variedades previamente reconhecidas como tolerantes ao déficit hídrico ressalta a complexidade da resposta fisiológica ao estresse, indicando que o MDA isoladamente não é suficiente para caracterizar a tolerância.

A análise de componentes principais revelou que 69,8% da variabilidade genética está concentrada nos dois primeiros componentes, com destaque para as variáveis Peroxidase, SPAD, MDA e Catalase, que apresentaram maior contribuição para a variabilidade observada. Esses parâmetros fisiológicos, portanto, se mostram promissores como critérios auxiliares na seleção de genótipos mais tolerantes ao déficit hídrico, devendo ser integrados a outras variáveis fisiológicas e bioquímicas em futuras análises. Estudos adicionais são recomendados para compreender melhor os mecanismos associados à tolerância, considerando a plasticidade e a interação entre os componentes antioxidantes enzimáticos e não enzimáticos.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDUL JALEEL, C.; MANIVANNAN, P.; KISHOREKUMAR, A.; SANKAR, B.; GOPI, R.; SOMASUNDARAM, R.; PANNEERSELVAM, R. Alterations in osmoregulations, antioxidant enzymes and indole alkaloid levels in *Catharanthus roseus* exposed to water deficit. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, v.59, p.150-157, 2007

ABREU, M.L.; SILVA, M.A.; TEODORO, I.; HOLANDA, L.A.; SAMPAIO NETO, G.D. Growth and productivity of sugarcane varieties as affected by water availability in the Coastal Tablelands of the Alagoas State, Brazil. *Bragantia* 72: 262-270, 2013.

AGUIAR, A.; MILESSI, T.S.; MULINARI, D.R.; LOPES, M.S.; COSTA, S.M.; CANDIDO, R.G. Sugarcane straw as a potential second generation feedstock for biorefinery and white biotechnology applications. *Biomass & Bioenergy*, v.144, p.105896, 2021.

AHMAD, P.; JALEEL, C.A.; SALEM, M.A.; NABI, G.; SHARMA, S. Roles of enzymatic and nonenzymatic antioxidants in plants during abiotic stress. *Critical Reviews in Biotechnology*, Boca Raton, v. 30, p. 161-175, 2010.

AHMED, I.; ULLAH, A.; UR RAHMAN, M. H.; AHMAD, B.; WAJID, S. A.; AHMAD, A.; AHMED, S. Climate change impacts and adaptation strategies for agronomic crops. In: *Climate change and agriculture*. IntechOpen. p. 1-14. 2019.

ALEJANDRO, S.; HÖLLER, S.; MEIER, B.; PEITER, E. Manganese in plants: from acquisition to subcellular allocation. *Frontiers in Plant Science*, v. 11, p. 300, 2020.

ALSCHER, R. G.; ERTURK N.; HEALTH, L. S. Role of superoxid dismutase (SODs) in controlling oxidative stress in plants. *Journal of Experimental Botany*, Oxford, v. 53, n. 372, p. 1331-1341, 2002.

ANDERSON, M.D.; PRASAD, T.K.; STEWART, C.R. Changes in isozyme profiles of catalase, peroxidase, and glutathione reductase during acclimation to chilling in mesocotylus of maize seedlings. *Plant Physiol* 109: 1247-1257.1995.

ANGELOCCI, L. R. Água na planta e trocas gasosas/energéticas com a atmosfera: introdução ao tratamento biofísico. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. 272p. 2002.

ANJUM, S. A.; TANVEER, M.; ASHRAF, U.; HUSSAIN, S.; SHAHZAD, B.; KHAN, I.; WANG, L. Effect of progressive drought stress on growth, leaf gas exchange, and antioxidant production in two maize cultivars. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 23, p. 17132-17141, 2016.

AOYAMA, E. M.; MAZZONI-VIVEIROS, S. C. Adaptações estruturais das plantas ao ambiente. São Paulo: Instituto de Botânica, 2006.

ARANTES, F.C.; GONÇALVES, P.S.; SCALOPPI JUNIOR, E.J.; MORAES, M.L.T.; RESENDE, M.D.V. Ganho genético com base no tamanho efetivo populacional de progênies de seringueira. *Pesquisa Agropecuária brasileira*, Brasília, v.45, n.12, 1419-1424p, 2010.

ARAÚJO, E.; SANTOS, J. O desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar no Brasil e sua relevância na economia nacional. *Revista Científica Facider*, n.4, set. 2013.

ARAUJO, W. O.; COELHO, C. J. Análise de componentes principais (PCA). University Center of Anápolis, Anápolis. 2009.

ARTLIP, T.S.; WISNIEWSKI, M.E. Induction of proteins in response to biotic and abiotic stresses. In: PESSARAKLI, M. (Ed.) *Handbook of plant and crop physiology*. New York: Marcel Dekker, p.657-679. 2002.

ASCOLI, A. A.; HERNANDEZ, F. B. T.; SENTELHAS, P. C.; TEIXEIRA, A. H. C.; AMENDOLA, E. C.; ASCOLI, R. T. Necessidade de irrigação na cultura da cana-de-açúcar em função da época de colheita. In: *Inovagri International Meeting, IV*. Fortaleza, CE, 2017. *Anais*. Fortaleza, CE: ABID, 10 p. 2017.

ASSUNÇÃO FILHO, J. R.; COSTA, M. F.; PINHEIRO, J. B.; CARVALHO, L. C. B.; GOMES, R. L. F.; ALMEIDA LOPES, A. C. Seleção de genótipos superiores de variedades crioulas de feijão-fava por abordagem multivariada. *Revista Caatinga*, 35(1), 87-95, 2022.

BAENA-GONZÁLEZ, E. Energy signaling in the regulation of gene expression during stress. *Molecular plant*, v. 3, n. 2, p. 300-313, 2010.

BASNAYAKE, J.; JACKSON, P. A.; INMAN-BAMBER, N. G.; LAKSHMANAN, P. Sugarcane for water-limited environments. Variation in stomatal conductance and its genetic correlation with crop productivity. *Journal of experimental botany*, v. 66, n. 13, p. 3945–3958, jul. 2015.

BASTOS, I. T.; BARBOSA, M. H. P.; DE RESENDE, M. D. V.; PETERNELLI, L. A.; DA SILVEIRA, L. C. I.; DONDA, L. R.; FORTUNATO, A. A.; COSTA, P. M DE A.; DE FIGUEIREDO, I. C. R. Avaliação da interação genótipo x ambiente em cana-de-açúcar via modelos mistos. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, p. 195-203, 2007.

BRANDES, E.W. Original, dispersal and use in breeding of the Melanesian garden sugarcanes and their derivatives *Saccharum officinarum* L. In: PROCEEDINGS OF INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGARCANE TECHNOLOGIST CONGRESS. Proceedings 9: 709-756. 1956.

BARBOSA, A.M., BROWN, J.A., REAL, R. modEvA an R package for model evaluation and analysis. Beta version, available upon request, 2013.

BARBOSA, G. V. S.; SILVA, P. P.; SANTOS, J. M.; CRUZ, M. M.; SOUSA, A. J. R.; RIBEIRO, C. A. G.; FERREIRA, J. L. C.; SAMPAIO FILHO, F.; SANTOS, T. W. T.; NASCIMENTO, B. F. C.; SILVA, W. T.; ALMEIDA, B. F. A. Desempenho agroindustrial e censo de variedades de cana-de-açúcar cultivadas no Estado de Alagoas. In: Congresso Nacional da Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil - STAB, 9., 2008, Maceió. Anais... Maceió: STAB Regional Leste, p. 464-470, 2008.

BARBOSA, M.H.P.; RESENDE, M.D.; SILVEIRA, L.C.I.; PETERNELLI, L.A. Estratégias de Melhoramento Genético da Cana-de-Açúcar em Universidades. In: IX Simpósio sobre seleção recorrente. Lavras: UFLA, ago. 2005.

BARBOSA, M. H. P.; SILVEIRA, L. C. I. MELHORAMENTO GENÉTICO E RECOMENDAÇÃO DE CULTIVARES. In: SANTOS, F.; BORÉM, A.; CALDAS, C. (Ed.). Cana-de-açúcar: bioenergia, açúcar e etanol: tecnologias e perspectivas. 3ª. ed. Viçosa, cap. 10. p. 211-224. 2018.

BARBOSA, M. R.; SILVA, M. M. de A.; ULISSES, L. W. C.; CAMARA, T. R. Geração e desintoxicação enzimática de espécies reativas de oxigênio em plantas. *Ciência Rural*, v. 44, p. 453-460, 2014.

BARBOSA, M. R.; SOUZA, L. M.; NASCIMENTO, K. R. P. ROS e o estresse oxidativo por seca em plantas. *Multidisciplinary Sciences Reports*, v. 3, n. 3, 2023.

BARRETO, A. F.; BARBOSA, J. K. A. Mecanismos de resistência à seca que possibilitam a produção em condições do semiárido nordestino. 3º Simpósio brasileiro de captação de água de chuva no semiárido. UFPB. Petrolina, PE, 2001.

BASNAYAKE, J.; JACKSON, P. A. N.; INMAN-BAMBER, G.; LAKSHMANAN, P. Sugarcane for waterlimited environments. Genetic variation in cane yield and sugar content in response to water stress. *J. Exp. Bot.* v. 63, p. 6023–6033, 2015.

BATISTA, E. L.; ZOLNIER, S.; RIBEIRO, A.; LYRA, G. B.; SILVA, T. G.; BOEHRINGER, D. Avaliação do efeito do estresse hídrico no crescimento de cultivares de cana-de-açúcar usando um sistema automático de fertirrigação. *Engenharia Agrícola*, v. 35, p. 215-229, 2015.

BEAUCHAMP, C.; FRIDOVICH, I. Superoxide dismutase: Improved assays and an assay applicable to acrylamide gels. *Anal Biochem* 44: 276–287. 1971.

BEZERRA, J. D. C.; FERREIRA, G. D. G.; DE OLIVEIRA, M. W.; CAMPOS, J. M. de S.; ANDRADE, A. P. de; JÚNIOR, J. R. do N. S. Cana-de-açúcar: Melhoramento genético e suas finalidades forrageiras. *Nucleus Animalium*, v.10, n.2, p.131-147, 2018.

BHATTACHARJEE, S. Sites of generation and physicochemical basis of formation of reactive oxygen species in plant cell. In: GUPTA, S.D. Reactive oxygen species and antioxidants in higher plants. Science Publishers Edenbridge. p.1-30, 2010.

BIANCHI, L.; GERMINO, G. H.; SILVA, M. A. Adaptação das Plantas ao Déficit Hídrico. *Acta Iguazu, Cascavel*, v. 5, n. 4, p. 15-32, 2016.

BLUM, A.; JOHNSON, J.W.; RAMSEUR, E.L. The effect of a drying top soil and a possible non-hydraulic root signal on wheat growth and yield. *Journal of Experimental Botany*, Oxon, v.42, n.243, p.1225-1231, 1991.

BLUM, A. Drought resistance, water-use efficiency, and yield potential - Are they compatible, dissonant, or mutually exclusive? *Australian Journal of Agricultural Research*, v. 56, n. 11, p. 1159–1168, 2005.

BOARETTO, L. F.; CARVALHO, G.; BORGIO, L.; CRESTE, L.; LANDELL, M. G. A.; MAZZAFERA, P.; AZEVEDO, R. A. Water stress reveals differential antioxidant responses of tolerant and non-tolerant sugarcane genotypes. *Plant Physiol. Biochem.* 74, 165-175, 2014.

BOHNERT, H. J.; JENSEN, R. G. Strategies for engineering water-stress tolerance in plants. *Trends in Biotechnology*, Oxford, v. 14, n. 1, p. 89-97, 1996.

BOSHKOVSKI, B.; TZERAKIS, C.; DOUPIS, G.; ZAPOLSKA, A.; KALAITZIDIS, C.; KOUBOURIS, G. Relationship between physiological and biochemical measurements with spectral reflectance for two *Phaseolus vulgaris* L. genotypes under multiple stress. *Int. J. Remote Sens.* 42, 1230–1249. 2021.

BOYER, J.S. Plant productivity and environment. *Science*, 218:443-448, 1982.

BRAIBANTE, M.E.F.; PAZINATO, M.S.; ROCHA, T.R.; FRIEDRICH, L.S.; NARDY, F.C. A cana-de-açúcar no Brasil sob um olhar químico e histórico: uma abordagem interdisciplinar. *Química Nova na Escola*, v. 35, n. 1, p. 3-10, 2013.

BRADFORD, M.M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Anal Biochem* 72: 248– 254. 1976.

BRAGA JUNIOR, R.L. do C.; LANDELL, M.G. de A.; XAVIER, M.A.; KANTHACK, R.A.D.; SILVA, D.N; BIDÓIA, M.A.P.; SILVA, T.N.; SILVA, V.H.P. da; RODRIGUES, P.E.; CARREGARI, H.R.; ANJOS, I. A. dos. Censo varietal IAC de cana-de-açúcar no Brasil - Safra 2022/23. Série Tecnologia APTA. Boletim Técnico IAC, 235. 2023.

BRANDES, E.W. Original, dispersal and use in breeding of the Melanesian garden sugarcanes and their derivatives *Saccharum officinarum* L. In: PROCEEDINGS OF INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGARCANE TECHNOLOGIST CONGRESS. Proceedings 9: 709-756. 1956.

BRASIL. Lei nº 76.593/1975. Institui o Programa Nacional do Álcool e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, 1975.

BRAY, E. A. Plant responses to water deficit. Trends in Plant Science, v. 2, p. 48-54, 1997.

BREMER, G. On the somatic chromosome numbers of sugarcane forms of endogenous cane. Proceedings of the ISSCT, v. 4, p. 30, 1932

BRESSIANI, J. A. Seleção seqüencial em cana-de-açúcar 2001. 134p. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, Piracicaba.

CACEFO, V. Estudo das vias de descarboxilação da fotossíntese C4 em cana-de-açúcar submetida ao déficit hídrico. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade do Oeste Paulista – Unoeste, Presidente Prudente, SP, 2017.

CAKMAK, I. Possible roles of zinc in protecting plant cells from damage by reactive oxygen species. *New Phytologist*, v. 146, n. 2, p. 185–205, 2000.

CÂMARA, T. M. M.; BENTO, D.A.V.; ALVES, G.F.; SANTOS, M.F.; MOREIRA, J.U.V.; SOUZA JÚNIOR, C.L. Parâmetros genéticos de caracteres relacionados à tolerância à deficiência hídrica em milho tropical. *Bragantia*, v.66, p.595-603, 2007.

CAMARGO, I.A. Sistema antioxidante de cana-de-açúcar em resposta à seca. Dissertação (Mestrado). Piracicaba, CENA. 2013.

CAPONE, A.; LUI, J. J.; SILVA, T. R.; DIAS, M. A. R.; MELO, A. V. Avaliação do comportamento de quinze cultivares de cana-de-açúcar na Região Sul do Tocantins. *Journal of Biotechnology and Biodiversity*, 2011, 2, 3, 72-80.

CARDOZO, N. P.; SENTELHAS, P. C. Climatic effects on sugarcane ripening under the influence of cultivars and crop age. *Sci. agric. (Piracicaba, Braz.)*, Piracicaba, v. 70, n. 6, p. 449-456, Dec. 2013.

CARLIN, S. D.; SANTOS, D. M. M. Indicadores fisiológicos da interação entre déficit hídrico e acidez do solo em cana-de-açúcar. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 44, n. 9, p. 1106-1113, 2009.

CARLIN, S. D.; RHEIN, A. F. L.; SANTOS, D. M. M. Simultaneous effect of water deficiency and aluminum toxicity in the soil in cultivar IAC 91-5155 of sugarcane. *Semina: Ciências Agrárias*, v. 33, n. 2, p. 553-564, 2012.

CARNEIRO, V. A.; CASAROLI, D.; SANTOS, F. C. V dos. CANA-DE-AÇÚCAR: Uma abordagem climática. *Revista Mirante (ISSN 1981-4089)*, v. 8, n. 3, p. 33-47, 2015.

CARVALHO, I. R.; SZARESKI, V. J.; SILVA, J. A. G.; NUNES, A. C. P.; ROSA, T. C.; BARBOSA, M. H.; MAGANO, D. A.; CONTE, G. G.; CARON, B. O.; SOUZA, V. Q. Multivariate best linear unbiased predictor as a tool to improve multi-trait selection in sugarcane. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 55, 1–8, 2020.

CARVALHO, J.L.N.; NOGUEIROL, R.C.; MENANDRO, L.M.S., BORDONAL, R. DE O., BORGES, C.D.; CANTARELLA, H.; FRANCO, H.C.J. Agronomic and environmental implications of sugarcane straw removal: a major review. *GCB Bioenergy*, 9 (7). Pages 1181-1195. 2017.

CARVALHO, M. H. C. Drought stress and reactive oxygen species: production, scavenging and signaling. *Plant Signaling & Behavior*, v. 3, p. 156-165, 2008.

CARVALHO, V.; NETO, A. A. C. Espécies reativas de oxigênio em plantas. In: Miguel Pena, H (et al.) (org.). *VI Botânica no Inverno*. São Paulo: Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo, Departamento de Botânica. 2016.

CASAGRANDE, A. A.; VASCONCELOS, A. C. M. Fisiologia da parte aérea. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A. (Ed.). *Cana-de-açúcar*. Campinas: Instituto Agrônomo, p. 57-78. 2008.

CESNIK, R. Melhoramento da cana-de-açúcar: marco sucro-alcooleiro no Brasil. Embrapa Meio Ambiente. 2007. Disponível em: <http://www.cnpma.embrapa.br/down_hp/344.pdf>. Acesso em: 15 fevereiro de 2024.

CHAKRABORTY, U.; PRADHAN, B. Oxidative stress in five wheat varieties (*Triticum aestivum* L.) exposed to water stress and study of their antioxidant enzyme defense system, water stress responsive metabolites and H₂O₂ accumulation. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, v. 24, n. 2, p. 117-130, 2012

CHANCE, B.; MAEHLEY, A.C. Assay of catalase and peroxidase. *Met in Enzymo* 2: 755-764. 1955.

CIA, M. C.; GUIMARÃES, A. C. R.; MEDICI, L. O.; CHABREGAS, S. M.; AZEVEDO, R. A. Antioxidant responses to water deficit by drought tolerant and-sensitive sugarcane varieties. *Annals of Applied Biology*, v.161, p.313-324, 2012.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. Boletim da safra de Cana-de-açúcar. Disponível: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana/boletim-da-safra-de-cana-de-acucar>>. Acesso em: 25 de fevereiro de 2024.

COSTA, N.L.; DAROS, E.; MORAES, A. Utilização de bioestimulantes na cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.). *PUBVET*, Londrina, V. 5, N. 22, Ed. 169, Art. 1137, 2011.

COSTA, K. D. S.; DE CARVALHO, I. D. E.; SANTOS, L. D. S.; DOS SANTOS, P. R.; DA SILVA, J. W. Selection of descriptors in cane sugar by means of principal components. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, 8: 207-210. 2013.

COSTA, N. Estimativas De Parâmetros Genéticos E Predição De Ganho Genético Em Populações De Milho. *ENCICLOPEDIA BIOSFERA*, v. 21, n. 47, p. 113-128, 2024.

COVARRUBIAS-PAZARAN, G. Genome-assisted prediction of quantitative traits using the *r* package sommer. *PloS one*, Public Library of Science San Francisco, CA USA, v. 11, n. 6, p. e0156744, 2016.

CRONQUIST, A. An integrated system of classification of flowering plants. New York: Columbia University Press, 1262p, 1981.

CROTEAU, R.; KUTCHAN, T. M.; LEWIS, N. G.; BUCHANAN, B.; GRUISSEM, W.; JONES, R. Biochemistry and molecular biology of plants. American Society of Plant Physiologists, Rockville, MD, p. 1250-1318, 2000.

CUNHA, B.A.D.B. da; MARTINS, P. K.; KOBAYASHI, A.K.; MOLINARI, H.B.C. Biotecnologia aplicada ao sistema de produção de cana-de-açúcar. Sistema de produção mecanizada da cana-de-açúcar integrada a produção de energia e alimentos, 2015.

CURY, T.N.; DE MARIA, I.C.; BOLONHEZI, D. Biomassa radicular da cultura de cana-de-açúcar em sistema convencional e plantio direto com e sem calcário. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.38, p.1929-1938, 2014.

CUSHMAN, J.C.; BOHNERT, H.J. Genomic approaches to plant stress tolerance. Curr. Opin. Plant Biol., v.3, p.117-124, 2000.

CYRNE, L.; MARTINS, L.; FERNANDES, L.; MARINHO, H.S. Regulation of antioxidant enzymes gene expression in the yeast *Saccharomyces cerevisiae* during stationary phase. Free Radic. Biol. Med., 34(3): 385- 393, 2003.

DANIELS, J.; ROACH, B. T. Taxonomy and evolution. In: HEINZ, D. J. (Ed.). Sugarcane improvement through breeding. Amsterdam: Elsevier, 1987.

DEER, N. Sugarcane. Norman Rodger, 644p. 1921.

DELAUNEY, A. J.; VERMA, D.P.S. Proline biosynthesis and osmoregulation in plants. Plant J 4:215–223. 1993.

DELGADO, A. A.; CÉSAR, M. A. A. Elementos de tecnologia e engenharia do açúcar de cana. Piracicaba: ESALQ, Departamento de Tecnologia Rural. 212 p. 1977.

DELLABIGLIA, W. J.; SILVA, M. A.; PINCELLI, R. P.; RHEIN, A. F. L.; ARANTES, M. T.; SANTOS, C. M.; SORRILLA, P. F.; BASSETTO, S. C. Avaliação de tolerância à seca em cultivares comerciais de cana-de-açúcar por meio de marcadores morfofisiológicos. ISBN: 978-85-7029-093-9. Anais, 4º Congresso Internacional de Iniciação Científica – CIIC, Instituto Agrônomo-IAC, Campinas/SP. 2010.

DEL RÍO, L. A.; SANDALIO, L. M.; CORPAS, F. J.; PALMA, J. M.; BARROSO, J. B. Reactive oxygen species and reactive nitrogen species in peroxisomes: production, scavenging, and role in cell signaling. *Plant Physiology*, v. 141, p. 330-335, 2006.

DIAS, H. B.; SENTELHAS, P. C. Sugarcane yield gap analysis in Brazil – A multi-model approach for determining magnitudes and causes. *Science of The Total Environment*, 637-638, 1127–1136. 2018.

DILLEWIJN, C. Botany of sugarcane. Waltham: Chronica Botanica, 371 p., 1952.

DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M. V.; LANDELL, M. G. de A. (Ed.). *Cana-de-açúcar*. Campinas: IAC, 882 p. 2010.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. Efeito da água no rendimento das culturas. Campina Grande: UFPB, 1994. p. 222-226.

ECCO, M.; SANTIAGO, E. F.; LIMA, P. R. Respostas biométricas em plantas jovens de cana-de-açúcar submetidas ao estresse hídrico e ao alumínio. *Comunicata Scientiae*, v. 5, 59-67. 2014.

ELSAYED, A.; RAFUDEEN, M.; GOMAA, A.; HASANUZZAMAN, M. Exogenous melatonin enhances the reactive oxygen species metabolism, antioxidant defense-related gene expression, and photosynthetic capacity of *Phaseolus vulgaris* L. to confer salt stress tolerance. *Physiol. Plant.* 1–13. 2021.

EMBRAPA. *Aquecimento Global e Cenários Futuros da Agricultura*. Coordenadores: ASSAD, E.; PINTO, H. S. Cepagri/Unicamp, São Paulo, 2008.

EVANGELISTA, J. S. P. C.; ALVES, R. S.; PEIXOTO, M. A.; RESENDE, M. D. V.; TEODORO, P. E.; SILVA, F. L.; BHERING, L. L. Produtividade, estabilidade e adaptabilidade da soja por meio de metodologia de modelo misto. *Ciencia rural*, v. 51, n. 2, p. 4, 2021.

FALCONER, D.S. *Introdução à genética quantitativa*. Viçosa, MG: UFV, 1987. 279p.

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. Crops and livestock products. Disponível em: <<https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>> Acesso em: 11 de fevereiro de 2024

FAROOQ, M.; WAHID, A.; KOBAYASHI, N.; FUJITA, D.; BASRA, S. M. A Plant drought Stress: Effects, mechanisms and management. *Agronomy for Sustainable and Development*, v. 29, n. 01, p. 185-212, 2009.

FATHI, A.; TARI, D. B. Effect of drought stress and its mechanism in plants. *International Journal of Life Sciences*, v. 10, n. 1, p. 1–6, 2016.

FAUSTO, B. *História Concisa do Brasil*. 2. ed. São Paulo: Edusp, 2006.

FEHR, W.R. Breeding methods for cultivar development. In: WILCOX, J.R. (Ed.). *Soybeans: improvement, production and uses*. 2.ed. Madison: ASA/CSSA/SSSA, p.249-293. 1987.

FERRÃO, M. A. G.; MOREIRA, S. O.; FERRAO, M. A. G.; RIVA, E. M.; ARANTES, L. O.; COSTA, A. de F. S. Genética e melhoramento: desenvolvimento e recomendação de cultivares com tolerância à seca para o Espírito Santo. *Incaper em Revista*, v. 7, p. 51-71, 2016.

FERREIRA, R. R.; FORNAZIER, R. F.; VITÓRIA, A. P.; LEA, P. J.; AZEVEDO, R. A. Changes in antioxidant enzyme in soybean Under cadmium stress. *Journal of Plant Nutrition*, Philadelphia, v. 25, n. 2, p. 327-342, 2002.

FERREIRA, F. M.; BARBOSA, M. H. P.; CASTRO, R. D.; PATERNELLI, L. A.; CRUZ, C. D. Effects of inbreeding on the selection of sugar cane clones. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, Brasil, v.5 p. 174-182, 2005.

FERREIRA, T.H.S.; TSUNADA, M.S.; BASSI, D.; ARAÚJO, P.; MATTIELLO, L.; GUIDELLI, G.V.; RIGHETTO, G.L.; GONÇALVES, V.R.; LAKSHMANAN, P.; MENOSSI, M. Sugarcane Water Stress Tolerance Mechanisms and Its Implications on Developing Biotechnology Solutions. *Front. Plant Sci.* 8:1077, 2017.

FIGUEIREDO, P. Breve história da cana-de-açúcar e do papel do Instituto Agronômico de Campinas no seu estabelecimento no Brasil. In: DINARDO-MIRANDA, L.; VASCONCELOS, A. C. M. de; LANDELL, M. G. A. (Org.). *Cana-de-Açúcar*. Campinas: Instituto Agronômico, p. 31-44. 2010.

FILIPPOU, P.; BOUCHAGIER, P.; SKOTTI, E.; FOTOPOULOS, V. Proline and reactive oxygen/nitrogen species metabolism is involved in the tolerant response of the invasive plant species *Ailanthus altissima* to drought and salinity. *Environmental and Experimental Botany*, v.97, p.1-10, 2014.

FONTANETTI, C. S.; BUENO, O. C. *Cana-de-açúcar e seus impactos: uma visão acadêmica*. 1. ed. Bauru: Canal 6, 2017. Disponível em: <http://www.canal6.com.br/livros_loja/Ebook_Cana.pdf > Acesso em: 28 de fevereiro de 2024

FOYER, C.; NOCTOR, G. Redox regulation in photosynthetic organisms: signaling, acclimation and practical implications. *Antioxid Redox Signal*, v.11, p. 1–45, 2009.

FRACASSO, A.; TRINDADE, L.; AMADUCCI, S. Drought tolerance strategies highlighted by two *Sorghum bicolor* races in a drydown experiment. *Journal of Plant Physiology*, v. 190, p.1-14, 2016.

FRITSCHÉ-NETO, R.; BORÉM, A. *Melhoramento de plantas para condições de estresses abióticos*. Visconde do Rio Branco: Suprema, 2011, p. 29-38, 2011.

FURTADO, C. *Formação econômica do Brasil*. São Paulo: Nacional, 1969.

GAROFALO, D.; PACKER, A.; RAMOS, N.; KONDO, V.; MATSUURA, M. D. S.; CABRAL, O. *Dinâmica na cultura da cana-de-açúcar no Brasil: 1990 a 2018*. Embrapa Meio Ambiente-Documents (INFOTECA-E). 2020. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/216303/1/Packer-Dinamica-cultivo-2020.pdf>> Acesso em: 25 de março de 2021

GARSMEUR, O. A Reference Sequence of the Monoploid Genome of Sugarcane. In: *INTERNATIONAL PLANT AND ANIMAL GENOME XXV*, 2017. CIRAD, Montpellier: France, 2017.

GAZAFFI, R.; OLIVEIRA, K.M.; SOUZA, A.P.; GARCIA, A.A.F. *Melhoramento genético e mapeamento da cana-de-açúcar*. In: CORTEZ, L. A. B. (Coord.). *Bioetanol de cana-de-açúcar: P&D para produtividade e sustentabilidade*. São Paulo: Blucher, p. 333-344. 2010.

GENTILE, A.; DIAS, L. I.; MATTOS, R. S.; FERREIRA, T. H.; MENOSSI, M. MicroRNAs and drought responses in sugarcane. *Frontiers in plant science*, v. 6, n. February, p. 58, 2015.

GIANNOPOLITIS, C.N.; RIES, S.K. Superoxide dismutases: I. Occurrence in higher plants. *Plant Physiol* 59: 309–14. 1977.

GILL, S. S.; TUTEJA, N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, v. 48, n. 12, p. 909–930, 2010.

GODOY, M. C.; NUNES, M. A. Uma comparação entre ANOVA e modelos lineares mistos para análise de dados de tempo de resposta. *Revista da ABRALIN*, v. 19, n. 1, pp. 1–23, 17 jul. 2020.

GOMATHI, R.; RAKKIYAPAN, P. Comparative lipid peroxidation, leaf membrane thermostability, and antioxidant system in four sugarcane genotypes differing in salt tolerance,” *International Journal of Plant Physiology and Biochemistry*, vol. 3, no. 4, pp. 67–74, 2011.

GOMATHI, R.; KRISHNAPRIYA, V.; ARUNKUMAR, R.; GOVINDARAJ, P.; RAM, B. Physiological traits imparting drought stress tolerance to promising sugarcane (*Saccharum* spp.) clones. *Plant Physiology Reports*, v.25, p.509-515, 2020.

GONÇALVES, E. R.; FERREIRA, V. M.; SILVA, J. V.; ENDRES, L.; BARBOSA, T. B.; DUARTE, W. G. Trocas gasosas e fluorescência da clorofila a em variedades de cana-de-açúcar submetidas à deficiência hídrica. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.14, n.4, p.378-386, 2010.

GONÇALVES, G. M.; VIANA, A. P.; AMARAL JUNIOR, A. T. D.; RESENDE, M. D. V. D. Breeding new sugarcane clones by mixed models under genotype by environmental interaction. *Scientia Agricola*, 71:66-71, 2014.

GRANDO, C. As adaptações das plantas às condições do cerrado brasileiro. USP/ESALQ. Programa de Pós-Graduação em Genética e Melhoramento de Plantas. 2008. Disponível em <http://www.genetica.esalq.usp.br/pub/seminar/CGrando200801-Resumo.pdf>. Acesso em: 13 de março de 2024

GRATÃO, P. L.; POLLE, A.; LEA, P. J.; AZEVEDO, R. A. Making the life of heavy metalstressed plants a little easier. *Functional Plant Biology*, v. 32, p. 481-494, 2005.

GUIMARÃES, E. R.; MUTTON, M. A.; MUTTON, M. J. R.; FERRO, M. I. T.; RAVANELI, G. C.; DA SILVA, J. A. Acúmulo de prolina em cana-de-açúcar sob estresse hídrico ou submetida ao ataque de cigarrinha-das-raízes. *Scientia Agricola*, 65(6), 628-633. 2008.

HAIR, J. F.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L. *Análise multivariada de dados*. 6.ed. Porto Alegre: Bookman, 679p. 2009.

HALDER, B.; RANA, B.; JUNENG, L.; PANDE, C. B.; ALSHEHERY, S.; ELSAHABI, M.; YADAV, K. K.; SAMMEN, S.S.; NAGANNA, S. R. Cloud computing-based estimation of Peninsular India's long-term climate change impacts on rainfall, surface temperature, and geospatial indices. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, v. 15, n. 1, p. 2381635, 2024.

HAN, C.; YANG, P. Studies on the molecular mechanisms of seed germination. *Proteomics*, v. 15, 1671–1679. 2015.

HÄRTER, A. Seleção avançada em cana-de-açúcar para tolerância ao déficit hídrico. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Produção Agrícola Familiar). Universidade Federal de Pelotas. Pelotas, p.84. 2018.

HAVIR, E.A.; MCHALE, N.A. Biochemical and Developmental Characterization of Multiple Forms of Catalase in Tobacco Leaves. *Plant Physiol* 84: 450–455. 1987.

HEERDT, E. Indução da embriogênese somático em cana-de-açúcar. 2008. 39. Dissertação (Magister Scientiae) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2008.

Hemaprabha, G.; Nagarajan, R.; Alarmelu, S.; Response of sugarcane genotypes to water deficit stress. *Sugar Tech* 6: 165-168, 2004.

EILERT, J. B.; POLETINE, J. P.; BRONDANI, S. T.; ANTÔNIO, M.; BARELLI, A.; SILVA, V. P. da. Melhoramento e seleção de feijoeiro comum por meio de modelos mistos para resistência/tolerância à seca. *Journal of Agronomic Sciences*. ISSN: 2316-1809. Umuarama, v.9, n. especial, p. 246-268, 2020.

HEMAPRABHA, G.; NAGARAJAN, R.; ALARMELU, S. Response of sugarcane genotypes to water deficit stress. SugarTech. V. 6, p. 165-168, 2004.

HEMAPRABHA, G.; NAGARAJAN, R.; ALARMELU, S.; NATARAJAN, U. S. Parental potential of sugarcane clones for drought resistance breeding. Sugar Tech, v. 8, n. 1, p. 59-62, 2006.

HEMAPRABHA, G.; SWAPNA, S.; LAVANYA, D. L.; SAJITHA, B.; VENKATARAMANA, S. Evaluation of drought tolerance potential of elite genotypes and progenies of Sugarcane (*Saccharum* sp. hybrids). Sugar Tech, v. 15, pag. 9–16. 2013.

HENDERSON, C. R. Estimation of changes in herd environment. Journal of Dairy Science, v. 32, p. 709, 1949.

HENDERSON, C. R. Sire evaluation and genetic trends. In: ANIMAL BREEDING AND GENETICS SYMPOSIUM IN HONOR OF J. LUSH, Champaign. Proceedings. Champaign: America Society of Animal Science, 1973. p.10-41, 1973.

HENDERSON, C.R. Best Linear Unbiased Estimation and Prediction under a Selection Model. Biometrics, Vol. 31, n. 2, 423-447p, 1975.

HÄRTER, A.; ANTUNES, W. R.; DE AZEREDO, A. A. C.; DOS ANJOS, S. D.; DE OLIVEIRA, R. A. "Screening" precoce quanto à tolerância ao frio no melhoramento de cana-de-açúcar. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 58, n. AA, p. 02711, 2024.

HOAGLAND, D. R.; ARNON, D. L. The water culture methods for growing plants without soil. California: The College of Agriculture, University of California, Agriculture Experiment Station, 32 p, 1950.

HODGES, D.M.; DELONG, J.M.; FORNEY, C.F.; PRANGE, R.K. Improving the thiobarbituric acidreactive-substances assay for estimating lipid peroxidation in plant tissues containing anthocyanin and other interfering compounds. Planta 207: 604–611. 1999.

HOGARTH, D.M. The effect of occidental selfing on the analysis of a diallel cross with sugarcane. Euphytica, Dordrecht, v. 29, p. 737-746, 1980.

HOLANDA, L.A.; SANTOS, C.M.; SAMPAIO NETO, G.D.; SOUSA, A.P.; SILVA, M.A. Variáveis morfológicas da cana-de-açúcar em função do regime hídrico durante o desenvolvimento inicial. *Irriga* 19, 573-584, 2014.

HOLANDA, S. B. Raízes do Brasil. 26. ed. São Paulo: Companhia das Letras, 1995.

HOLTMAN, W.L.; HEISTEK, J.C.; MATTERN, K.A.; BAKHUIZEN, R.; DOUMA, A.C. Betaoxidation of fatty acids is linked to the glyoxylate cycle in the aleurone but not in the embryo of germination barley, *Plant Science*, v. 99, n. 1, p. 43-53, 1994.

HONGYU, K., SANDANIELO, V. L. M., DE OLIVEIRA JUNIOR, G. J. Análise de componentes principais: resumo teórico, aplicação e interpretação. *E&S Engineering and Science*, 5: 83-90, 2016.

HOQUE, M.A.; BANU, M.N.A.; NAKAMURA, Y.; SHIMOISHI, Y.; MURATA, Y. Proline and glycinebetaine enhance antioxidant defense and methylglyoxal detoxification systems and reduce NaCl-induced damage in cultured tobacco cells. *Journal of Plant Physiology*, v. 165, n. 8, p. 813-824, 2008.

HORII, J. A cana-de-açúcar como matéria-prima. Piracicaba: ESALQ, Departamento de Agroindústria, Alimentos e Nutrição, 27p. 2004.

HUNG, S. H.; YU, C. W.; LIN, C. H. Hydrogen peroxide functions as a stress signal in plants. *Botanical Bulletin of Academia Sinica*, v. 46, p. 1-10, 2005.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Produção de Cana-de-açúcar. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/cana-de-acucar/br>> Acesso em: 11/02/2024

IEA - Instituto de Economia Agrícola. Banco de dados. São Paulo: IEA. Disponível em: <<http://www.iea.sp.gov.br/out/verTexto.php?codTexto=13601>> Acesso em: 19 de fevereiro de 2024.

IGAMBERDIEV, A.U.; LEA, P.J. The role of peroxisomes in the integration of metabolism and evolutionary diversity of photosynthetic organism, *Phytochemistry*, v. 60, n. 7, p. 651- 674, 2002.

INMAN-BAMBER, N.G.; SMITH, D.M. Water relations in sugarcane and response to water deficits. *Field Crops Research*, v.92, p.185-202, 2005.

INMAN-BAMBER, N. G.; LAKSHMANAN, P.; PARK, S. Sugarcane for water-limited environments: Theoretical assessment of suitable traits. *Field Crops Research*, v. 134, p. 95- 104, 2012.

IQBAL, N.; HUSSAIN, S.; RAZA, M.A.; YANG, C.; SAFDAR, M.E.; BRESTIC, M.; AZIZ, A.; HAYYAT, M.S.; ASGHAR, M.A.; YANG, W. Drought tolerance of soybean (*Glycine max L. Merr.*) by improved photosynthetic characteristics and an efficient antioxidant enzyme system under a split-root system. *Front Physiol.*10:786. 2019.

JACINTHO, H. Agronegócio emprega mais de 28 milhões de brasileiros. *Forbes Brasil*. Disponível em: <<https://forbes.com.br/forbesagro/2023/08/agronegocio-emprega-mais-de-28-milhoes-de-brasileiros/>> Acesso em:10 de abril de 2024.

JACOMASSI, L. M.; PACOLA, M.; MOMESSO, L.; VIVEIROS, J.; JÚNIOR, O. A.; SIQUEIRA, G. F. D.; CAMPOS, M. DE; CRUSCIOL, C. A. C. Foliar Application of Amino Acids and Nutrients as a Tool to Mitigate Water Stress and Stabilize Sugarcane Yield and Bioenergy Generation. *Plants*, 13(3), 461. 2024.

JANGPROMMA N.; THAMMASIRIRAK S.; JAISIL P.; SONGSRI P. Efeitos da seca e recuperação do estresse hídrico no crescimento acima do solo e das raízes, e eficiência do uso da água na cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum L.*). *Aust. J. Crop Sci.* 6, 1298–1304, 2012.

Jain, R.; Chandra, A.; Venugopalan, V.K.; and Solomon, S. Physiological changes and expression of SOD and P5CS genes in response to water deficit in sugarcane. *Sugar Tech* 17, 276-282, 2015.

KANG, J.; VOOTHULURU, P.; HOYOS-MIERNYK, E.; ALEXANDER, D.; OLIVER, M.J.; SHARP, R.E. Antioxidant metabolism underlies the different metabolic strategies for primary root growth maintenance under water stress in cotton and maize. *Antioxidants* 2022, 11, 820.

KARUPPANAPANDIAN, T.; MOON, J.; KIM, C.; MANOHARAN, K.; KIM, W. Reactive oxygen species in plants: their generation, signal transduction, and scavenging mechanisms. *Australian Journal of Crop Science*, v. 5, p. 709-725, 2011.

KIM, Y.H.; KWAK, S.S. The role of antioxidant enzymes during leaf development. In: GUPTA, S.D. *Reactive oxygen species and antioxidants in higher plants* Enfield: Science Publishers, 2010. p.129-150.

KOOYERS, N. J. The evolution of drought escape and avoidance in natural herbaceous populations. *Plant Science*, v. 234, p. 155–162, maio 2015.

KOZAK, M.; PIEPHO, H. P. What's normal anyway? Residual plots are more telling than significance tests when checking ANOVA assumptions. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2018. v. 204, n. 1, p. 86–98.

KUMAR, R. R.; KARAJOL, K.; NAIK, G. R. Effect of polyethylene glycol induced water stress on physiological and biochemical responses in pigeon pea (*Cajanus cajan* L. Mill sp.). *Recent Research in Science and Technology, Kerala*, v. 3, n.1, p. 148-152, 2011.

KUTNER MH, NACHTSHEIM CJ, NETER J, LI W. *Applied linear statistical models*. 5th ed. Chicago: Irwin; 2004.

LANDELL, M.G.A.; SILVA, M.A. As estratégias de seleção da cana em desenvolvimento no Brasil. *Visão Agrícola*, v.1, p.18-23, 2004.

LANDELL, M. G. A. BRESSIANI, A. Melhoramento genético, caracterização e manejo varietal. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A.C. M.; LANDELL, M. G. A. (Ed.). *Sugarcane*. Campinas: Agronomic Institute, 2008. p. 101-155.

LANDELL, M.G.A.; SILVA, M.A. As estratégias de seleção da cana em desenvolvimento no Brasil. *Visão Agrícola*, v.1, p.18-23, 2004.

LAWLOR, D. W.; TEZARA, W. Causes of decreased photosynthetic rate and metabolic capacity in water-deficient leaf cells: a critical evaluation of mechanisms and integration of processes. *Annals of Botany, London*, v.103, p. 561-579, 2009.

LARCHER, W. *Ecofisiologia vegetal*. Rima Artes e Textos. 531p. São Carlos 2000.

LEITE, W. D. S., UNÊDA-TREVISOLI, S. H., SILVA, F. M. D., SILVA, A. J. D., MAURO, A. O. D. Identification of superior genotypes and soybean traits by multivariate analysis and selection index. *Rev. Ciênc. Agron.*49: 491-500, 2018.

LEVITT, J. *Responses of Plants to Environmental Stresses*. New York: Academic Press. 1972.

LISSON, S. N. The historical and future contribution of crop physiology and modeling research to sugarcane production systems. *Field Crops Research*, v. 92, p. 321- 335, 2005.

LOBELL, D. B.; SCHLENKER, W.; COSTA-ROBERTS, J. Climate trends and global crop production since 1980. *Science*, Washington, D. C., v. 333, n. 6042, p. 616-620, 2011.

LOPES, V.R.; BESPALHOK FILHO, J.C.; DAROS, E.; OLIVEIRA, R.A.; GUERRA, E.P. 2014. Divergência genética entre clones de cana-de-açúcar usando análise multivariada associada a modelos mistos. *Semina: Ciências Agrárias*, 35(1):125-134.

LUCCHESI, A. A. SUGARCANE (In Brazilian). In: CASTRO, P. R. C.; KLUGE, R. A. (Ed.). *Ecophysiology of extractive crops: sugarcane, rubber, coconut, oil palm and olive*. Piracicaba: Cosmópolis Stoller do Brasil, 2001. v. 1. p. 13-45.

LUM, M. S.; HANAFI, M. M.; RAFII, Y. M.; AKMAR, A. S. N. Effect of drought stress on growth, proline and antioxidant enzyme activities of upland rice. *The Journal of Animal & Plant Sciences*, Lahore, v. 24, n. 1, p. 1487-1493, 2014.

Luo, H.; Xing, P.; Liu, J.; Pan, S.; Tang, X.; Duan, M. Selenium improved antioxidant response and photosynthesis in fragrant rice (*Oryza sativa* L) seedlings during drought stress. *Physiol Mol Biol Plants* 27:1–10. 2021.

LU, G.; LIU, P.; WU, Q.; ZHANG, S.; ZHAO, P.; ZHANG, Y.; QUE, Y. Sugarcane breeding: a fantastic past and promising future driven by technology and methods. *Frontiers in Plant Science*, v. 15, p. 1375934, 2024.

MACHADO, R. S.; RIBEIRO, R. V.; MARCHIORI, P. E. R.; MACHADO, D. F. S. P.; MACHADO, E. C.; LANDELL, M. G. A. Respostas biométricas e fisiológicas ao déficit

hídrico em cana-de-açúcar, em diferentes fases fenológicas. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.44, p.1575-1582, 2009.

MACHADO, L. A.; HABIB, M. Perspectivas e impactos da cultura de cana-de-açúcar no Brasil. Disponível em: <http://www.infobibos.com/Artigos/2009_2/Cana/index.htm> Acesso em: 18/02/2024

MADHAV, T.V.; BINDHU, G.S.M.; KUMAR, M.V.; NAIK, C.S. Analysis of anti-oxidant enzyme activity in sugarcane varieties under moisture stress. Curr J Appl Sci Technol 23:1–6, 2017.

MAIA JÚNIOR, S. O.; SILVA, J. A. C.; SANTOS, K. P. O.; CORDEIRO, D. R.; SILVA, J. V.; ENDRES, L. Respostas morfológicas e fisiológicas de cultivares de cana-de-açúcar sob estresse hídrico no segundo ciclo de cultivo. Revista Brasileira de Agricultura Irrigada, v. 12, n. 3, p. 2661, 2018.

MAIA JÚNIOR, S DE O.; ENDRES, L.; SILVA, J. V.; ANDRADE, J. R. D. An efficient antioxidant system is associated with lower photosynthesis photoinhibition and greater tolerance to drought in sugarcane cultivars. Biosci. J. 35:3. 2019.

MAIA JÚNIOR, S. O.; DE ANDRADE, J. R.; DOS SANTOS, C. M.; SILVA, A. L. J.; ENDRES, L.; SILVA, J. V.; DOS SANTOS SILVA, L. K. Osmoregulators' accumulation minimizes the effects of drought stress in sugarcane and contributes to the recovery of photochemical efficiency in photosystem II after. Acta Physiologia Plantarum, 42, 62, 2020.

MAIA JÚNIOR, S. de O.; ANDRADE, J. R. de; DUTRA, A. F.; SANTOS, A. F. da S.; BARROS, J. M. T. de M.; SILVA, A. C. S. da. Respostas da aplicação foliar de glicina betaína em cana-de-açúcar submetida a estresse hídrico e reidratação. Revista de Ciências Agroveterinárias, v. 20, n. 2, p.128-133, 2021.

MARCOS, F.C.C.; SILVEIRA, N.M.; MARCHIORI, P.E.R.; MACHADO, E.C.; SOUZA, G.M.; LANDELL, M.G.A.; RIBEIRO, R.V. Drought Tolerance of Sugarcane Propagules Is Improved When Origin Material Faces Water Deficit. PLoS ONE 2018, 13, e0206716.

MARCONDES, S. Brasil, amor à primeira vista! São Paulo: Peirópolis, 343 p. 2005.

MARTINEZ, H. E. P.; CLEMENTE, J. M. O uso do cultivo hidropônico de plantas em pesquisa. Viçosa: UFV, 2011. 76p.

MASIA, A. Physiological effects of oxidative stress in relation to ethylene in postharvest produce. In: Hodges DM (ed) Post-harvest oxidative stress in horticultural crops. Food Products Press. New York, pp 165–197, 2003.

MATSUOKA, S.; GARCIA, A.A.F.; ARIZONO, H. Melhoramento da cana-de-açúcar. In: BOREM, A. Melhoramento de espécies cultivadas. Viçosa: Editora UFV, p. 225-274. 2005.

McCREE, K.J.; FERNÁNDEZ, C.J. Simulation model for studying physiological water stress responses of whole plants. *Crop Science*, Madison, v.29, p.353-360, 1989.

MEDEIROS, D. B.; SILVA, E. C.; NOGUEIRA, R. J. M. C.; TEIXEIRA, M. M.; BUCKERIDGE, M. S. Physiological limitations in two sugarcane varieties under water suppression and after recovering. *Theoretical and Experimental Plant Physiology*, v. 25, n. 3, p. 213-222, 2013.

MEDRADO, L. C.; SANTOS, G. G.; CORRECHEL, V.; SILVA, G. C.; FLORES, R. A.; SEVERIANO, E. C.; MESQUITA, M.; FIGUEIREDO, C. C. Evaluation of Sugarcane Root Growth Through Images Obtained via the Minirhizotron Method in a Ferralsol in the Midwest Region of Brazil. *Sugar Tech*, v. 25, n. 3, p. 638-652, 2023.

MEHAREB, E. M.; EL-MANSOUB, M. M. A. Genetic parameters and principal components analysis biplot for agronomical, insect and pathological traits in some sugarcane genotypes. *SVU-International Journal of Agricultural Sciences*, 2 (2): 60-77, 2020.

MELONI, R. Ciência e produção agrícola: a imperial Estação Agronômica de Campinas - 1887/1897. São Paulo: Ed. Humanitas FFLCH/USP, 2004.

MICHEREFF, S. J. Controle genético de doenças de plantas. In: MICHEREFF, Sami J (Eds.). Fundamentos da fitopatologia. Recife: UFRPE. p. 1- 10. 2001.

MILLER, G.; SUZUKI, N.; CIFTCI-YILMAZ, S.; MITTLER, R. Reactive oxygen species homeostasis and signaling during drought and salinity stresses. *Plant, Cell & Environment*, v. 33, p. 453-467, 2010.

MING, R.; MOORE, P.; WU, K.; D'HONT, A.; GLASZMANN, J. C.; TEW, T. L.; MIRKOV, T. E.; SILVA, J.; JIFON, J.; RAI, M.; SCHNELL, R. J.; BRUMBLEY, S. M.; LAKSHMANAN, P.; COMSTOCK, J. C.; PATERSON, A. H. Sugarcane improvement through breeding and biotechnology John Wiley & Sons, Inc. 104 p. 2006.

MINGOTI, A.S. Análise de dados através de métodos de estatística multivariada. Belo Horizonte, Editora UFMG, 295p. 2007.

MISSIO, R.F., SILVA, A.M., DIAS, L.A.S., MORAES, M.L.T., RESENDE, M.D.V. Estimates of genetic parameters and prediction of additive genetic values in *Pinus kesya* progenies. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 394-401p, 2005.

MITTLER, R. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. *Trends Plant Science*, v.7, n.9, p.405-410, 2002.

MOITA NETO, M.J. (2004) Estatística multivariada. Disponível em: <http://www.mat.ufrgs.br/~viali/cursos/ceea/multi/textos/Moita_Neto.pdf> Acesso em: 15 de maio de 2024.

MORAIS, L. K. de; CURSI, D. E.; SANTOS, J. M. dos; SAMPAIO, M.; CAMARA, T. M. M.; SILVA, P. de A.; BARBOSA, G. V.; HOFFMANN, H. P; CHAPOLA, R. G.; FERNANDES JUNIOR, A. R.; GAZAFFI, R. Melhoramento genético da cana-de-açúcar. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2015a.

MORAIS, L. K.; AGUIAR, M. S.; SILVA, P. A.; CÂMARA, T. M. M.; CURSI, D. E.; FERNANDES JUNIOR, A. R.; CHAPOLA, R. G.; CARNEIRO, M. S.; BESPALHOK FILHO, J. C. Breeding of Sugarcane, In: CRUZ, V. M. V.; DIERIG, D. A. (Ed.). *Industrial Crops: breeding for bioenergy and bioproducts*. New York, USA: Springer, 444 p. 2015b.

MORAIS, M. B.; AZEVEDO, R. A.; WILLADINO, L. G. Metabolismo antioxidativo em variedades de cana-de-açúcar sob estresse hídrico e salino. DEPARTAMENTO DE

AGRONOMIA PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MELHORAMENTO GENÉTICO DE PLANTAS, p. 31, 2013.

MORAIS, M. B. D.; CAMARA, T. R.; ULISSES, C.; CARVALHO FILHO, J. L. S.; WILLADINO, L. Multiple stresses on the oxidative metabolism of sugarcane varieties. *Ciência Rural*, v.48, p.1-8, 2018.

MORAIS, M. B. D.; AZEVEDO, R. A.; CAMARA, T. R.; ULISSES, C.; ALBUQUERQUE, C. C. D.; WILLADINO, L. Antioxidative metabolism in sugarcane (Poaceae) varieties subjected to water and saline stress. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 24, n. 11, p. 776-782, 2020.

MUNNS, R. Plant adaptations to salt and water stress: differences and commonalities. *Advances in Botanical Research*, v.57, p.1-32, 2011.

NEITZKE, T. R.; ROSA, R.; MIRANDA, G. V.; DA SILVA, T. R. B.; POLETINE, J. P. Interação genótipos x ambientes de linhagens irmãs de soja por meio de modelos mistos, GGE e AMMI. *Peer Review*, v. 6, n. 3, p. 230-254, 2024.

NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N.; FARIAS, J. R. B.; OYA, T. Tolerância à seca em plantas: mecanismos fisiológicos e moleculares. In.: *Revista Biotecnologia Ciência e Desenvolvimento*. KL3 Publicações. Brasília. n. 23. p. 12-18. nov./ dez., 2001.

NGAMHUI, N.; TANTISUWICHWONG, N.; ROYTRAKUL, S.; ZHU, Y.J.; LI, Q.X.; AKKASAENG, C. Relationship between drought tolerance with activities of antioxidant enzymes in sugarcane. *Indian J. Plant Physiol.* 20, 145–150, 2015.

NOCTOR, G.; FOYER, C. H. Ascorbate and Glutathione: Keeping active oxygen under control. *Annual Review Plant Physiology Plant Molecular Biology*, v. 49, p. 249-279, 1998.

NXELE, X.; KLEIN, A.; NDIMBA, B. K. Drought and salinity stress alters ROS accumulation, water retention, and osmolyte content in sorghum plants. *South African Journal of Botany*, v. 108, p. 261–266, 2017.

OLIVEIRA, A. R.; BRAGA, M. B. Variedades de cana-de-açúcar submetidas a diferentes lâminas de reposição hídrica por gotejamento subsuperficial. *Energia na Agricultura*, 34(3), 350-363, 2019.

OLIVEIRA, R.; DAROS, E.; RESENDE, M.D.V.; BESPALHOK FILHO, J.C. ZAMBON, J.L. Procedimento Blupis e seleção massal em cana-de-açúcar. *Bragantia* 70:796-800, 2011.

OLIVEIRA, R.A. Seleção de famílias de maturação precoce em cana-de-açúcar via REML/BLUP. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2007. 142p. Tese Doutorado.

OLIVEIRA, R. A.; Daros, E.; Bespalhok Filho, J. C.; Zambon, J. L. C.; Ido, O. T.; Weber, H., RESENDE, M.D.; Neto, H. Z. Seleção de famílias de cana-de-açúcar via modelos mistos. *Scientia agraria*, 9(3), 269-274, 2008.

OLIVEIRA, E.C.A.; OLIVEIRA, R.I.; ANDRADE, B.M.T.; FREIRE, F.J.; LIRA JÚNIOR, M.A.; MACHADO, P.R. Crescimento e acúmulo de matéria seca em variedades de cana-de-açúcar cultivadas sob irrigação plena. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.14, p.951-960, 2010.

ONG'ALA, J.; MWANGA D.; NUANI, F. On the Use of Principal Component Analysis in Sugarcane Clone Selection. *Journal of the Indian Society of Agricultural Statistics* 70(1):33-39, 2016.

PAGARIYA, M. C.; DEVARUMATH, R. M.; KAWAR, P. G. Biochemical characterization and identification of differentially expressed candidate genes in salt stressed sugarcane. *Plant Sci.* 184, 1–13. 2012.

PARIDA, S.; DASH, G. K.; SAMAL, K. C.; SWAIN, P. Reactive oxygen species (ROS) and response of antioxidants as ROS-scavengers in contrasting rice (*Oryza sativa* L.) genotypes under drought stress. *ORYZA-An International Journal of Rice*, 59(1), 39-50. 2022.

PARRY, M.L. *Climate change and world agriculture*. Routledge, 2019.

PASSARDI, F.; PENEL, C.; DUNAND, C. Performing the paradoxical: how plant peroxidases modify the cell wall. *Trends in Plant Science*, v. 9, n. 11, p. 534–540, 2004.

PAULA, R. J. D. Respostas antioxidantes de cultivares de cana-de-açúcar tolerantes à seca e a herbicidas ao déficit hídrico. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista – UNESP, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, 2019.

PEDROZO, C.; JIFON, J. L.; BARBOSA, M. H. P.; DA SILVA, J. A.; PARK, J.; GRACIA, N. S. Identificação de Genes Diferencialmente Expressos sob Condições de Déficit Hídrico em Genótipos de Cana-de-açúcar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MELHORAMENTO DE PLANTAS, 6., 2011, Búzios. Panorama atual e perspectivas do melhoramento de plantas no Brasil. [Búzios]: SBMP, 2011.

PEIXOTO, P.H.P.; CAMBRAIA, J.; SANT'ANNA, R.; MOSQUIM, P.R.; MOREIRA, M.A. Aluminum effects on lipid peroxidation and on the activities of enzymes of oxidative metabolism in sorghum. *Rev Bras Fisiol Veg* 11: 137–143. 1999.

PEREIRA, R. M.; ALVES JUNIOR, J.; CASAROLI, D.; SALES, D. L.; RODRIGUES, W. D. M.; SOUZA, J. M. F. Viabilidade econômica da irrigação de cana-de-açúcar no cerrado brasileiro. *Irriga*, Botucatu, Edição Especial. p. 149-157, 2015.

PIMENTEL, C. A relação da planta com a água. Seropédica: EDUR, 192p. 2004.

PIMENTEL GOMES, F. Curso de estatística experimental. 14^a ed. Piracicaba – SP: Editora da Universidade de São Paulo, 477p, 2000.

POLLE, A. Dissecting the Superoxide Dismutase-Ascorbate-Glutathione-Pathway in Chloroplasts by Metabolic Modeling. *Computer Simulations as a Step towards Flux Analysis. Plant Physiology*, [S.L.], v. 126, n. 1, p. 445-462, mai. 2001

QUADRO, M. F.; MACHADO, L. H. R, CALBETE, S.; BATISTA, N. N. M. B; OLIVEIRA, G. S. de. Climatologia de precipitação e temperatura. Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos – CPTEC/INPE. 2021. Disponível em: <http://climanalise.cptec.inpe.br/> Acesso em: 13 de março de 2024

QUEIROZ, R. J. B.; SANTOS, D. M. M.; CARLIN, S. D.; MARIN, A.; BANZATTO, D. A.; CAZETTA, J. O. Osmoprotetores em cana-de-açúcar sob o efeito da disponibilidade hídrica no solo. *Científica*, v.36, p.107-115, 2008.

RAIZER, A. J.; VENCOVSKY, R. Estabilidade fenotípica de novas variedades de cana-de-açúcar para o Estado de São Paulo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 34, p. 2241-2246, 1999.

RANI, V.; SENGAR, R. S.; CHAUHAN, C. Assessment of physio-biochemical assessment and gene expression analysis of sugarcane genotypes under water stress. *Molecular Biology Reports*, v. 51, n. 1, p. 1-15, 2024.

REDDY, A. R.; CHAITANYA, K. V.; VIVEKANANDAN, M. Drought-induced responses of photosynthesis and antioxidant metabolism in higher plants. *Journal of Plant Physiology*, v.161, p.1189-1202, 2004.

RESENDE, M. D. V. de. Métodos estatísticos ótimos na análise de experimentos de campo no melhoramento de plantas. In: SIMPÓSIO DE ESTATÍSTICA APLICADO À EXPERIMENTAÇÃO AGRONÔMICA, 11., Londrina, 2005.

RESENDE, M. D. V. Matemática e estatística na análise de experimentos e no melhoramento genético. 1. ed. Colombo: Embrapa Florestas, 362 p. 2007.

RESENDE, M.D.V.; ALVES, R.S. Genética: estratégias de melhoramento e métodos de seleção. In DE OLIVEIRA, E. B. et al: O eucalipto e a Embrapa: quatro décadas de pesquisa e desenvolvimento. Embrapa, 2021.

RESENDE, M. D. V.; SILVA, F. F.; LOPES, P. S.; AZEVEDO, C. F. Seleção genômica ampla (GWS) via modelos mistos (REML/BLUP), inferência bayesiana (MCMC), regressão aleatória multivariada (RRM) e estatística espacial. Viçosa: UFV, 2012.

RESENDE, M. D. V. de. Procedimentos ótimos de seleção com dados balanceados e desbalanceados. In: _____.(Ed). Genética biométrica e estatística no melhoramento de plantas perenes. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, cap. 7, p. 209-347 p, 2002.

REZAYIAN, M.; EBRAHIMZADEH, H.; NIKNAM, V. Nitric oxide stimulates antioxidant system and osmotic adjustment in soybean under drought stress. *J Soil Sci Plant Nut.* 20: 1122–1132, 2020.

RICKLEFS, R. E. A economia da natureza. 5.ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2003.

RIDESA - Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucreenergético. Disponível em: <<https://www.ridesa.com.br/historia>> Acesso em> 29 de fevereiro de 2021

RODRIGUES, D.; ORTIZ, L. Em direção à sustentabilidade da produção de etanol de cana-de-açúcar no Brasil. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/cana4_000g7qv63sq02wx5ok0wtedt3xughe7o.pdf>. Acesso em 29 de fevereiro de 2024.

RODRIGUES, G. S. S. C.; ROSS, J. L. S. A trajetória da cana-de-açúcar no Brasil: perspectivas geográfica, histórica e ambiental. Uberlândia: EDUFU, 2020.

ROSADO, A. M.; ROSADO, T. B.; RESENDE JÚNIOR, M. F.; BHERING, L. L.; CRUZ C. D. 2009. Ganhos genéticos preditos por diferentes métodos de seleção em progênies de *Eucalyptus urophylla*, Pesquisa agropecuária brasileira, Brasília, v.44, n.12, p,1653-1659.

RUHOFF, A. L.; SALDANHA, C. B.; COLLISCHONN, W. Análise multivariada do processo de evapotranspiração em áreas de cerrado e cana-de-açúcar. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v.14, p.137-146, 2009.

SÁ, L.F.; TAMBARUSSI, E.V. Melhoramento genético como estratégia de gestão da produtividade florestal. Revista do Instituto Florestal (35)1: 99-112, 2023.

SALEHI-LISAR, S. Y.; BAKHSHAYESHAN-AGDAM, H. Drought Stress in Plants : Causes , Consequences , and Tolerance. Drought Stress Tolerance in Plants, v. 1, p. 1–16, 2016.

SALES, C. R. G.; RIBEIRO, R. V.; MACHADO, D. F. S. P.; MACHADO, R. S.; DOVIS, V. L.; LAGÔA, A. M. M. A. Trocas gasosas e balanço de carboidratos em plantas de cana-de-açúcar sob condições de estresses radiculares. Bragantia, v. 71, p. 319-327, 2012.

SALES, C. R. G.; RIBEIRO, R. V.; SILVEIRA, J. A. G.; MACHADO, E. C.; MARTINS, M. O.; LAGÔA, A. M. M. A. Superoxide dismutase and ascorbate peroxidase improve the recovery of photosynthesis in sugarcane plants subjected to water deficit and low substrate temperature. *Plant Physiology and Biochemistry*, v. 73, p. 326-336, 2013.

SALES, C. R.; MARCHIORI, P. E. R.; MACHADO, R. S.; FONTENELE, A. V.; MACHADO, E. C.; SILVEIRA, J. A. G.; RIBEIRO, R. V. Photosynthetic and antioxidant responses to drought during sugarcane ripening. *Photosynthetica*, v. 53, n. 4, p. 547-554, 2015.

SANTOS, M. H. de C. Avaliação político–institucional como uma medida da resolução de conflitos. In: ENCONTRO ANUAL DA ANPOCS. 11, Águas de São Pedro. Anais [...]. Águas de São Pedro: Anpocs, 1987.

SANTOS, F. A.; DE QUEIRÓZ, J. H.; COLODETTE, J. L.; FERNANDES, S. A.; GUIMARÃES, V. M.; REZENDE, S. T. Potencial da palha de cana-de-açúcar para produção de etanol. *Química Nova* 2012, 35, 1004.

SANTOS, C.M.; SILVA, M.A.; LIMA, G.P.P. et al. Physiological Changes Associated with Antioxidant Enzymes in Response to Sugarcane Tolerance to Water Deficit and Rehydration. *Sugar Tech.*, v. 17, p. 291, 2015.

SANTOS, V.B.; LIMA, S.R.; MESQUITA, A.G.G.; FRANKE, I.L.; NEGREIROS, J.R.S.; BEBER, P.M. Seleção genotípica de variedades de milho via metodologia de modelos mistos. *Scientia Naturalis* 3: 133-147, 2021.

SANTOS, M.C.; SOARES, J.M.S. DA; ROCHA A.DE J. ; OLIVEIRA, W.D. DOS S.; RAMOS, A.P. DE S., AMORIM, E.P.;SANTOS-SEREJO, J.A.DOS; FERREIRA, C.F. Correlation Between Gene Expression and Antioxidant Enzyme Activity in Plants Tolerant to Water Stress: A Systematic Review. *Plant Molecular Biology Reporter*. 2023;41(3): 512–525.

SCHWARTZ, S. B. Segredos internos: engenhos e escravos na sociedade colonial. São Paulo: Companhia das Letras, 1988.

SCHWERTMAN, N. C.; OWENS, M. A.; ADNAN, R. A simple more general boxplot method for identifying outliers. *Computational Statistics & Data Analysis*, Amsterdam, v. 47, n. 1, p. 165-174, Aug. 2004.

SEARLE, S. R.; CASELLA, G.; Mc CULLOCH, C. E. *Variance components*. New York: John & Wiley, 528 p, 1992.

SEGATO, S.V.; PINTO, A.S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J.C.M. *Atualização em produção de cana-de-açúcar*. Piracicaba, Gráfica Prol, 415p. 2006.

SHARMA, P.; JHA, A. B.; DUBEY, R. S.; PESSARAKLI, M. Reactive oxygen species, oxidative damage, and antioxidative defense mechanism in plants under stressful conditions. *Journal of Botany*, v. 2012, p. 1-26, 2012.

SHIKIDA, P. F. A. *A evolução diferenciada da agroindústria canavieira no Brasil de 1975 a 1995*. Cascavel, PR: Edunioeste, 1998.

SHULAEV, V.; OLIVER, D. J. Metabolic and proteomic markers for oxidative stress. New tools for reactive oxygen species research. *Plant Physiol.* 141, 367–372. 2006.

SILVA, A. J. DA; SANCHES, A.; ANDRADE, A. C. B.; OLIVEIRA, G. H. F. DE; DI MAURO, A. O. Abordagem bayesiana, método tradicional e modelos mistos para experimentos multiambientes na cultura da soja. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 53, n. 10, p. 1093-1100, 2018.

SILVA, A. L. C.; COSTA, W. A. J. M. Varietal variation in growth, physiology and yield of sugarcane under two contrasting water regimes. *Tropical Agricultural Research and Extension*, v. 12, n. 2, p. 97-102, 2009.

SILVA, S. D. dos A; SIMON, E. D. T.; MONTERO, C. R. S. M. *Caracterização Fenotípica da Coleção de Genótipos de Cana-de-açúcar da Embrapa Clima Temperado*. Pelotas: Embrapa Clima Temperado. 43 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento / Embrapa Clima Temperado, ISSN 1678-2518 ; 256). 2015.

SILVA, M. A.; LANDELL, M. G. de A.; CAMPANA, M. P. Novas opções varietais IAC para plantio no sistema de cana-de-ano. *STAB – Açúcar, Álcool e Subprodutos*, Piracicaba, v. 19, n. 3, p. 43-45, 2001.

SILVA, M. A.; GONÇALVES, P.S.; LANDELL, M.G.A.; BRESSIANI, A.J. Estimates of parameters and expected gains from selection of yield traits in sugarcane families. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, Londrina, v.2, p.569-578, 2002.

SILVA, M. A.; SILVA, J. A. G.; ENCISO, J.; SHARMA, V.; JIFON, J. Yield components as indicators of drought tolerance of sugarcane. *Scientia Agricola*, v.65, p.620-627, 2008a.

SILVA, M. de A.; SOARES, R.A.B.; LANDELL, M.G.A.; CAMPANA, M.P. Agronomic performance of sugarcane families in response to water stress. *Bragantia*, v.67, p.656-661, 2008b.

SILVA, M. DE A.; SANTOS, C. M. DOS; VITORINO, H. DOS S.; RHEIN, A. F. DE L. Pigmentos fotossintéticos e índice SPAD como descritores de intensidade do estresse por deficiência hídrica em cana-de-açúcar. *Bioscience Journal*, v.30, p.173-181, 2014.

SILVA, P. B. Aspectos fisiológicos de seis genótipos de cana-de-açúcar submetidos a estresse hídrico. Rio Largo: UFAL, 98p. Dissertação Mestrado. 2010.

SILVA, F.F.; VIANA, J.M.S.; FARIA, V.R.; RESENDE, M.D.V. Bayesian inference of mixed models in quantitative genetics of crop species. *Theor. Appl. Genet.* 126:1749–1761, 2013.

SILVA, C. J.; FLUMIGNAN, D. L.; ARCOVERDE, S. N. S.; COMUNELLO, É. Crescimento e produção de variedades de cana-de-açúcar sob irrigação suplementar e sequeiro. *Revista Caatinga*,36(4), 885-896. 2023.

SILVEIRA, J. C. da. Portugal no mundo e a soberania do seu açúcar. *Anais do Instituto Superior de Agronomia*, Vol. 30, p. 235, 1967.

SILVEIRA, J. A. G.; SILVA, S. L. F.; SILVA, E. N.; VIÉGAS, R. A. Mecanismos biomoleculares envolvidos com a resistência ao estresse salino em plantas. In.: GHEYI, H. R.; DIAS, N. S.; LACERDA, C. F. de. Manejo da salinidade na agricultura: estudos básicos e aplicados. Fortaleza: INCTSal, cap. 11, 161-180, 2010.

SINGELS, A.; JONES, M.; VAN DEN BERG, M. DSSAT v4.5 - Canegro sugarcane plant module: user documentation. Mount Edgecombe: International Consortium for Sugarcane Modeling, 58p. 2008.

SINGH, S.; GUPTA, A. K.; KAUR, N. Differential Responses of Antioxidative Defence System to Long-Term Field Drought in Wheat (*Triticum aestivum* L.) Genotypes Differing in Drought Tolerance. *Journal of Agronomy and Crop Science*, v. 198, n. 3, p. 185–195, 2012.

SINGH, R.; SINGH, S.; PARIHAR, P.; MISHRA, R.K.; TRIPATHI, D.K.; SINGH, D.R.V.P.; CHAUHAN, D.K.; PRASAD, S.M. Reactive oxygen species (ROS): Beneficial companions of plants' developmental processes. *Frontiers in Plant Science*, Lausanne, v.7, p.1299-1364, 2016.

SMIT, M. A.; SINGELS, A. The response of sugarcane canopy development to water stress. *Field Crops Research*, v.98, p.91-97, 2006.

SOARES, A. M. S.; MACHADO, O. L. T. Defesa de plantas: sinalização química e espécies reativas de oxigênio. *Revista Trópica*, v. 1, n. 1, p. 9-19, 2007.

SODEK, L. Metabolismo do nitrogênio. In: KERBAUY, G. B. (Ed.). *Fisiologia vegetal*. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, p. 94-113. 2004.

SORDI, R.A.; MARIN, F.R.; SILVA, M.A; FIORI, P.R. Discrimination potential of sugarcane cultivars (*Saccharum* spp) through hyperspectral sensors in different production environments. *Sugar Tech*, p 1-14, 2024.

SOUZA, C.B. Biotecnologia de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) para tolerância a estresse hídrico. Tese de Doutorado (Doutorado em Genética e Biologia Molecular) - Universidade Estadual de Campinas, São Paulo - SP, 150f. 2012

STANIAK, M.; SZPUNAR-KROK, E.; KOCIRA, A. Responses of soybean to selected abiotic stresses-photoperiod, temperature and water. *Agriculture-Basel* 13 (1), 146. 2023.

SZMRECSÁNYI, T. O planejamento da agroindústria canavieira do Brasil (1930-1975). Campinas: Hucitec, 1979.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I.M.; MURPHY, A. Fisiologia e desenvolvimento vegetal. Porto Alegre: Artmed, 858p. 2017.

TAVEIRA, C. C. G. Geografia do desenvolvimento no Brasil. 5ª ed. Rio de Janeiro: Ao livro Técnico S/A Indústria e Comércio, 1979.

TEIXEIRA, G.C.M.; PRADO, R.M.; ROCHA, A.M.S.; JUNIOR, G.S.S.; GRATÃO, P.L. Beneficial Effect of Silicon Applied through Fertigation Attenuates Damage Caused by Water Deficit in Sugarcane. J. Plant Growth Regul. 2022, 41, 3255–3270

TEIXEIRA, G.C.M.; PRADO, R.M.; ROCHA, A.M.S.; FILHO, A.S.B.O.; JUNIOR, G.S.S.; GRATÃO, P.L. Action of silicon on the activity of antioxidant enzymes and on physiological mechanisms mitigates water deficit in sugarcane and energy cane plants. Sci. Rep. 12, 17487. 2022.

TEODORO, I.; DANTAS NETO, J.; SOUZA, J. L.; LYRA, G. B.; BRITO, K. S.; SÁ, L. A.; SANTOS, M. A. L.; SARMENTO, P. L. V. S. Isoquantas de produtividade da cana-de-açúcar em função de níveis de irrigação e adubação nitrogenada. Irriga, v.18, p.387-401, 2013.

THEODORO, A. D. Expansão da cana-de-açúcar no Brasil: ocupação da cobertura vegetal do cerrado. 2011, Araçatuba. FTA, 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnólogo em tecnologia em Biocombustível) – Faculdade de Tecnologia de Araçatuba, Araçatuba, 2011.

TORSIAN, W.S.; KIKUTI, A.L.P.; KIKUTI, H.; PEREIRA, C.E. Bioestimulantes no desenvolvimento da cana-de-açúcar. Magistra , 31, 625–634, 2011.

TURNER, N. C. Techniques and experimental approaches for the measurement of plant water status. Plant and Soil, The Hague, v. 58, p. 339-366, 1981.

VASCONCELOS, A. C. M. Dinâmica do desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar. In: VASCONCELOS, A.C.M. & MIRANDA, L.D., eds. Dinâmica do desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar e implicações no controle de nematoides. 2.ed. Americana, Adônis, 2010. 56p.

VENCOVSKY, R.; CRUZ, C. D. Comparação de métodos de correção do rendimento de parcelas com estandes variados. I. Dados simulados. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 26, n. 5, p. 647-657, 1991.

VERMA, K. K.; SONG, X. P.; VERMA, C. L.; CHEN, Z. L.; RAJPUT, V. D.; WU, K. C.; LIAO, F.; CHEN, G. L.; LI, Y. R. Functional relationship between photosynthetic leaf gas exchange in response to silicon application and water stress mitigation in sugarcane. *Biol. Res.* 2021, 54, 15.

VERSLUES, P. E.; OBER, E. S.; SHARP, R. E. Root growth and oxygen relations at low water potentials: impact of oxygen availability in polyethylene glycol solutions. *Plant Physiology*, v. 116, n. 4, p. 1403–1412, 1998.

VERSLUES, P. E.; AGARWAL, M.; KATIYAR-AGARWAL, S.; ZHU, J.; ZHU, J.K. Methods and concepts in quantifying resistance to drought, salt and freezing, abiotic stresses that affect plant water status. *The Plant Journal*, v. 45, p. 523–539, 2006.

VIANA, J. M. S.; ALMEIDA, I. F.; RESENDE, M. D. V.; FARIA, V. R.; SILVA, F. F. BLUP for genetic evaluation of plants in non-inbred families of annual crops. *Euphytica*, 174:31–39p, 2010.

VIANNA, M.D.S.; SENTELHAS, P.C. Simulação Do Risco de Deficit Hídrico Em Regiões de Expansão Do Cultivo de Cana-de-Açúcar No Brasil. *Pesquisa Agropecuária Bras.* Ed. 49, 237–246, 2014.

VIANNA, V. F.; DESIDERIOSUP, J. A.; DE SANTIAGOSUP, S.; JUNIORSUP, J. A. F.; FERRAUDOSUP, A. S. The multivariate approach and influence of characters in selecting superior soybean genotypes. *Afr. J. Agric. Res.* 8:4162-4169, 2013.

VIEIRA, A. As Ilhas e a expansão da cultura e tecnologia da cana-de-açúcar no Atlântico nos séculos XV a XIX. *Labor e Engenho, Campinas*, v. 1, p. 1–20. 2007.

VILELA, R. D.; BEZERRA, B. K. L.; FROEHLICH, A.; ENDRES, L. Antioxidant system is essential to increase drought tolerance of sugarcane. *Ann. Appl. Biology*, v.171, p. 451– 463, 2017.

VINÍCIUS, M. P.; SILVA, J. F.; DA SILVA, E. D. S. S.; DE ANDRADE JUNIOR, A. S.; MOUSINHO, F. E. P. Parâmetros fisiológicos de variedades de cana-de-açúcar submetidas a distintos regimes hídricos. *Journal of Environmental Analysis and Progress*, 509-518, 2017.

VINOCUR, B.; ALTMAN, A. Recent advances in engineering plant tolerance to abiotic stress: achievements and limitations. *Current Opinion in Biotechnology*, v. 16, n. 2, p. 123-132, 2005.

WANG, W.; VINOCUR, B.; ALTMAN, A. Plant responses to drought, salinity and extreme temperatures: towards genetic engineering for stress tolerance. *Planta*. Sep 26, 2003.

YAMAGUCHI-SHINOZAKI, K.; SHINOZAKI, K. Organization of cis-acting regulatory elements in osmotic- and cold-stress-responsive promoters. *Trends in Plant Science*, v. 10, p. 88-94, 2005.

YORDANOV, I.; VELIKOVA, V.; TSONEV, T. Plant responses to drought and stress tolerance. *Bulgarian Journal of Plant Physiology*, Sofia, v.1, p.187-206, 2003.

ZILLIANI, R. R. Influência de biorreguladores sobre a fisiologia e crescimento inicial de cana-de-açúcar submetida ao déficit hídrico. Dissertação de mestrado, Universidade do Oeste Paulista, Presidente Prudente, SP, Brasil, 2015.

ZINGARETTI, S.; RODRIGUES, F. A.; GRAÇA, J. P.; PEREIRA, L. M.; LOURENCO, M. V. Sugarcane responses at water deficit conditions. In: *INTECH.Water Stress*. Rijeka: Intech, p.255-276. 2012.

8. MATERIAL SUPLEMENTAR I



Figura 3. Análise de boxplot para identificação de outliers em variáveis associadas a seca em 30 variedades de cana-de-açúcar submetida a condições de déficit hídrico simulado Polietilenoglicol 6000, atividade da Catalase (A), Malondialdeído (B), atividade da Peroxidase (C), Superóxido dismutase (D) e SPAD (E).



Figura 4. Análise de boxplot para identificação de outliers em variáveis associadas a seca em 30 variedades de cana-de-açúcar submetida a condições com ausência de déficit hídrico, atividade da Catalase (A), Malondialdeído (B), atividade da Peroxidase (C), Superóxido dismutase (D) e Índice SPAD (E).

9. MATERIAL SUPLEMENTAR II

a. Índice SPAD

Tabela 6 – Deviance e Teste de Razão Verossimilhança (LRT) do modelo ajustado para Índice SPAD em 30 variedades de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) submetidas ao déficit hídrico simulado por Polietilenoglicol 6000 comparado ao tratamento controle sem déficit hídrico.

Teste da interação			
Efeito	Log convergência	Deviance	LRT
Tratamento:Clone	-98.332	196.664	1.3086*
Completo	-97.6777	195.3554	

*: Não significativo ao nível de probabilidade de 0.01 pelo teste de Qui-quadrado.

Tabela 7 – Deviance e Teste de Razão Verossimilhança (LRT) do modelo ajustado para Índice SPAD em 30 variedades de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) sob condição de déficit hídrico.

Teste da interação			
Efeito	Log convergência	Deviance	LRT
Clone	-142.048	284.096	87.432**
Completo	-98.332	196.664	

** : Significativo ao nível de probabilidade de 0.01 pelo teste de Qui-quadrado.

b. Atividade da Catalase

Tabela 8 – Deviance e Teste de Razão Verossimilhança (LRT) do modelo ajustado para Atividade da Catalase em 30 variedades de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) submetidas ao déficit hídrico simulado por Polietilenoglicol 6000 comparado ao tratamento controle sem déficit hídrico.

Teste da interação			
Efeito	Log convergência	Deviance	LRT
Tratamento:Clone	-85.357	170.714	-0.3212*
Completo	-85.5176	171.0352	

*: Não significativo ao nível de probabilidade de 0.01 pelo teste de Qui-quadrado.

Tabela 9 – Deviance e Teste de Razão Verossimilhança (LRT) do modelo ajustado para Atividade da Catalase em 30 variedades de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) sob condição de déficit hídrico.

Teste da interação			
Efeito	Log convergência	Deviance	LRT
Clone	-85.357	170.714	0
Completo	-85.357	170.714	

*: Não significativo ao nível de probabilidade de 0.01 pelo teste de Qui-quadrado.

c. Atividade da Peroxidase

Tabela 10 – Deviance e Teste de Razão Verossimilhança (LRT) do modelo ajustado para Atividade da Peroxidase em 30 variedades de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) submetidas ao déficit hídrico simulado por Polietilenoglicol 6000 comparado ao tratamento controle sem déficit hídrico.

Teste da interação			
Efeito	Log convergência	Deviance	LRT
Tratamento:Clone	-95.3386	190.6772	0.4136*
Completo	-95.1318	190.2636	

*: Não significativo ao nível de probabilidade de 0.01 pelo teste de Qui-quadrado.

Tabela 11 – Deviance e Teste de Razão Verossimilhança (LRT) do modelo ajustado para Atividade da Peroxidase em 30 variedades de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) sob condição de déficit hídrico.

Teste da interação			
Efeito	Log convergência	Deviance	LRT
Clone	-95.3386	190.6772	0*
Completo	-95.3386	190.6772	

*: Não significativo ao nível de probabilidade de 0.01 pelo teste de Qui-quadrado.

d. Atividade da Superóxido Dismutase

Tabela 12 – Deviance e Teste de Razão Verossimilhança (LRT) do modelo ajustado para Atividade da Superóxido Dismutase em 30 variedades de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) submetidas ao déficit hídrico simulado por Polietilenoglicol 6000 comparado ao tratamento controle sem déficit hídrico.

Teste da interação			
Efeito	Log convergência	Deviance	LRT
Tratamento:Clone	-20.5736	41.1472	1.7836*
Completo	-19.6818	39.3636	

*: Não significativo ao nível de probabilidade de 0.01 pelo teste de Qui-quadrado.

Tabela 13 – Deviance e Teste de Razão Verossimilhança (LRT) do modelo ajustado para Atividade da Superóxido Dismutase em 30 variedades de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) sob condição de déficit hídrico.

Teste da interação			
Efeito	Log convergência	Deviance	LRT
Clone	-20.6172	41.2344	0.0872*
Completo	-20.5736	41.1472	

*: Não significativo ao nível de probabilidade de 0.01 pelo teste de Qui-quadrado.

e. Conteúdo de Malondialdeído

Tabela 14 – Deviance e Teste de Razão Verossimilhança (LRT) do modelo ajustado para conteúdo de Malondialdeído em 30 variedades de cana-de-açúcar (*Saccharum*

spp.) submetidas ao déficit hídrico simulado por Polietilenoglicol 6000 comparado ao tratamento controle sem déficit hídrico.

Teste da interação			
Efeito	Log convergência	Deviance	LRT
Tratamento:Clone	-55.3058	110.6116	0*
Completo	-55.3058	110.6116	

*: Não significativo ao nível de probabilidade de 0.01 pelo teste de Qui-quadrado.

Tabela 15 – Deviance e Teste de Razão Verossimilhança (LRT) do modelo ajustado para conteúdo de Malondialdeído em 30 variedades de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) sob condição de déficit hídrico.

Teste da interação			
Efeito	Log convergência	Deviance	LRT
Clone	-58.2227	116.4454	5.8338**
Completo	-55.3058	110.6116	

*: Significativo ao nível de probabilidade de 0.01 pelo teste de Qui-quadrado.