

Índices de seleção para identificar variedades de cana-de-açúcar tolerantes à deficiência hídrica moderada e severa

Selection indices to identify water-stress-tolerant sugarcane genotypes

Kátia Cristina da Silva¹, Fábio Steiner², Alan Mario Zuffo³, Rafael Felipe Ratke⁴, Jorge González Aguilera⁵

RESUMO: A deficiência hídrica é um dos principais fatores ambientais que causam impactos negativos nas lavouras de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.). A identificação de variedades tolerantes à seca é essencial para impulsionar o setor sucroenergético em anos agrícolas com incidência de estiagem hídrica. Dois experimentos foram conduzidos em condições de casa de vegetação para avaliar o grau de tolerância à seca de 13 variedades de cana-de-açúcar (CTC2, CTC4, IACSP95-5000, RB825336, RB835054, RB855035, RB855156, RB855453, RB855536, RB867515, RB965902, RB966928 e SP80-1842) quando expostas à restrição de 50% (deficiência hídrica moderada) e 25% (deficiência hídrica severa) da capacidade de retenção de água do solo. Doze índices de tolerância à seca foram calculados a partir da produção de matéria seca da parte aérea sem restrição hídrica (Y_p) e sob deficiência hídrica moderada ou severa (Y_s). As variedades RB855035, RB855453 e RB 965902 possuem maior tolerância à seca, e são indicadas para serem cultivadas em regiões com ocorrência de restrição hídrica moderada e severa. As variedades RB855536 e IACSP95-5000 possuem maior suscetibilidade à deficiência hídrica moderada e severa. Os índices de tolerância MP, DI, STI, GMP, YI, k_1 STI, k_2 STI e HM foram os mais indicados para identificar as variedades de cana-de-açúcar com maior tolerância à seca e com alto potencial de produção de matéria seca da parte aérea em condições de restrição hídrica moderada e severa.

Palavras-chave: *Saccharum* spp.; análise multivariada; análise biplot; correlação; deficiência hídrica.

ABSTRACT: Drought stress is one of the main environmental factors that cause negative impacts on sugarcane (*Saccharum* spp.) crops. The identification of drought-tolerant varieties is essential to boost the sugar-energy sector in agricultural years with an incidence of drought stress. Two experiments were conducted under greenhouse conditions to evaluate the degree of drought tolerance of 13 sugarcane varieties (CTC2, CTC4, IACSP95-5000, RB825336, RB835054, RB855035, RB855156, RB855453, RB855536, RB867515, RB965902, RB966928 and SP80-1842) when exposed to restrictions of 50% (moderate water deficiency) and 25% (severe water deficiency) of the soil's water retention capacity. Twelve drought tolerance indices were calculated from the production of shoot dry matter without water restriction (Y_p) and under moderate or severe water deficit (Y_s). The RB855035, RB855453 and RB 965902 varieties have greater drought tolerance, and are the most suitable to be cultivated in regions with moderate and severe water restriction. The RB855536 and IACSP95-5000 varieties have greater susceptibility to moderate and severe water deficit. Tolerance indices MP, DI, STI, GMP, YI, k_1 STI, k_2 STI and HM were the most suitable for identifying the sugarcane varieties with greater drought tolerance and high potential for shoot dry matter production. under conditions of moderate and severe water stress.

Keywords: *Saccharum* spp.; Multivariate analysis; Biplot analysis; Correlation; Water deficit.

Autor correspondente: Fábio Steiner
E-mail: steiner@uems.br

Recebido em: 22/09/2022
Aceito em: 15/02/2024

¹ Mestranda no Programa de *Stricto Sensu* em Agronomia (PGAC) na Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul – UEMS, Cassilândia (MS), Brasil.

² Doutor em Agricultura pela FCA/UNESP. Docente no Programa de Pós-Graduação em Agronomia (PGAGRO) na Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul – UEMS, Aquidauana (MS), Brasil.

³ Doutor em Fitotecnia pela UFPA. Docente no Curso de Graduação em Agronomia na Universidade Estadual do Maranhão – UEMA, Balsas (MA), Brasil.

⁴ Doutor em Agronomia pela UFG. Docente no Programa de Pós-Graduação em Agronomia na Universidade Federal de Mato Grosso do Sul – UFMS, Chapadão do Sul (MS), Brasil.

⁵ Doutor em Genética e Melhoramento pela UFV. Docente no Curso de Graduação em Agronomia na Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul – UEMS, Cassilândia (MS), Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) é uma das culturas de maior importância para a economia brasileira, especialmente devido a sua utilização na produção de biocombustíveis e de seus derivados, além da produção de bioenergia por meio da combustão da biomassa. Atualmente, o Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar e, na safra 2023/24, o país deve ser responsável pela produção de 677 milhões de toneladas de colmos (CONAB, 2024). A produtividade média brasileira estimada para a safra 2023/24 é de 81,1 Mg ha⁻¹, considerada baixa quando comparada com o potencial de produção da cultura que é superior à 200 Mg ha⁻¹ (SANTOS; BORÉM, 2013).

A ocorrência de adversidades climáticas, especialmente a deficiência hídrica tem sido apontada como um dos principais fatores que contribuem para a baixa produtividade da cultura no Brasil (SILVA *et al.*, 2008; PINCELLI; SILVA, 2012; IPCC, 2023). Portanto, estudos que visam identificar variedades de cana-de-açúcar tolerantes à seca são essenciais para impulsionar a produção de colmos da cultura em anos com ocorrência de deficiência hídrica.

Em condições de deficiência hídrica, as plantas de cana-de-açúcar possuem uma série de alterações bioquímicas, fisiológicas e morfológicas (SILVA *et al.*, 2008; PINCELLI; SILVA, 2012; VIEIRA *et al.*, 2014), as quais constituem as estratégias e, ou mecanismos de tolerância à seca. As principais estratégias para tolerância à seca em variedades de cana-de-açúcar estão relacionadas à maior eficiência do uso da água, à capacidade das células realizarem o ajustamento osmótico, à manutenção do conteúdo de clorofila, da condutância estomática e da taxa de fotossíntese, à redução na área foliar e à capacidade das raízes em explorar camadas mais profundas do solo (PINCELLI; SILVA, 2012; FERREIRA *et al.*, 2017). Estas estratégias visam manter o crescimento e o desenvolvimento das plantas em condições de baixa disponibilidade de água no solo.

Diferenças genéticas na tolerância à seca têm sido reportadas em variedades brasileiras de cana-de-açúcar (SILVÉRIO *et al.*, 2017), o que pode ser útil na identificação de materiais mais adaptados ao cultivo em regiões com longos períodos de restrição hídrica durante o ano. No entanto, a identificação de variedades tolerantes à seca não é uma tarefa fácil devido à ocorrência de fortes interações entre genótipos e ambiente, além do conhecimento restrito a respeito da função e do papel dos mecanismos de tolerância (NAGHAVI *et al.*, 2013).

A produtividade relativa de colmos em condições ambientais não estressantes com adequada disponibilidade de água no solo ou sob condições de deficiência hídrica parece ser o ponto de partida para a identificação de variedades tolerantes à seca (MOHAMMADI *et al.*, 2010). Portanto, as principais condições que devem ser consideradas durante o processo de identificação de variedades tolerantes e, ou suscetíveis à deficiência hídrica são o cultivo sob condições ótimas não estressantes e sob condições estressantes com ocorrência de restrição hídrica (MENEZES *et al.*, 2014; CABRAL *et al.*, 2020).

Alguns estudos têm proposto o uso de diversos índices de seleção para identificar as divergências genéticas para a tolerância à seca. Alguns destes índices de seleção foram utilizados para avaliar a variabilidade genética em variedades de milho (NAGHAVI *et al.*, 2013), sorgo (MENEZES *et al.*, 2014), trigo (AKÇURA *et al.*, 2011; FARSHADFAR *et al.*, 2013; EL-RAWY; HASSAN, 2014), girassol (GHOLINEZHAD *et al.*, 2014), feijão (SÁNCHEZ-REINOSO *et al.*, 2020), soja (CABRAL *et al.*, 2020) e gramíneas forrageiras tropicais (ZUFFO *et al.*, 2022). No entanto, estes estudos para a cultura da cana-de-açúcar ainda são incipientes. Portanto, esta pesquisa constitui o primeiro relato do uso de índices de seleção para avaliar o grau de tolerância à seca das principais variedades de cana-de-açúcar utilizadas na região do Cerrado. Essas informações ajudarão os produtores rurais e os profissionais do setor sucroenergético na escolha das melhores variedades de cana-

de-açúcar a serem plantadas em áreas sujeitas à ocorrência de deficiência hídrica.

Este estudo teve como objetivo avaliar o grau de tolerância à seca de 13 variedades de cana-de-açúcar quando cultivadas em condições de deficiência hídrica moderada e severa, e determinar os melhores índices de seleção para identificar variedades tolerantes e, ou suscetíveis à seca.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Dois experimentos foram conduzidos sob condições de casa de vegetação na Estação Experimental Agrônômica na Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul – UEMS, em Cassilândia, MS (19°05'30" S; 51°48'50" W e altitude média de 540 m) para avaliar os efeitos da deficiência hídrica moderada (Experimento 1) e deficiência hídrica severa (Experimento 2) na produção de matéria seca da parte aérea de 13 variedades de cana-de-açúcar. A temperatura média do ar e a umidade relativa do ar no interior da casa de vegetação durante a condução do experimento foram mantidas em 26 °C (± 2 °C) e 68% (± 6 %), respectivamente.

Os experimentos foram conduzidos em vasos plásticos com 12 dm³ de capacidade, preenchidos com 11 dm³ de solo arenoso peneirado em malha de 5,0 mm, proveniente da camada superficial de 0,0–0,20 m de um NEOSSOLO QUARTZARÊNICO Órtico latossólico – NQo (SANTOS *et al.*, 2018). O solo apresentou as seguintes características químicas: pH (CaCl₂) = 6,1, matéria orgânica = 14 g dm⁻³, P (Mehlich-1) = 32 mg dm⁻³, S-SO₄²⁻ = 3,2 mg dm⁻³, Ca²⁺ = 4,70 cmol_c dm⁻³, Mg²⁺ = 1,60 cmol_c dm⁻³, K⁺ = 0,30 cmol_c dm⁻³, H⁺ + Al³⁺ = 2,60 cmol_c dm⁻³, Cu²⁺ = 1,8 mg dm⁻³, of Zn²⁺ = 1,5 mg dm⁻³, Fe²⁺ = 73 mg dm⁻³ e Mn²⁺ = 13 mg dm⁻³. Todas as análises químicas foram efetuadas seguindo indicações de Teixeira *et al.* (2017).

A capacidade de retenção de água do solo sob condições de drenagem livre foi determinada usando a taxa de decréscimo do teor de água de 0,1 g kg⁻¹ dia⁻¹ como proposto por Casaroli e Lier (2008), e o valor da capacidade máxima de retenção de água foi de 218 g kg⁻¹.

O solo foi fertilizado com 50 mg dm⁻³ de N (ureia), 250 mg dm⁻³ de P (superfosfato simples), 100 mg dm⁻³ de K (cloreto de potássio), 15 mg dm⁻³ de S (gesso agrícola), 2 mg dm⁻³ de Cu (sulfato de cobre), 2 mg dm⁻³ de Zn (sulfato de zinco), 1 mg dm⁻³ de Mo (molibdato de amônio) e 1 mg dm⁻³ de B (ácido bórico), seguindo as recomendações de Novais *et al.* (1991) para ensaios em vasos sob condições de casa de vegetação. Aos 30 e 60 dias após o transplantio das mudas de cana-de-açúcar também foram aplicados 50 mg dm⁻³ de N em cobertura na forma de ureia (45% de N).

Os dois experimentos foram dispostos no delineamento de blocos casualizados (DBC), com quatro repetições. Os tratamentos foram constituídos de 13 variedades de cana-de-açúcar (CTC2, CTC4, IACSP95-5000, RB825336, RB835054, RB855035, RB855156, RB855453, RB855536, RB867515, RB965902, RB966928 e SP80-1842) cultivadas sob condições de deficiência hídrica moderada (Experimento 1) e severa (Experimento 2). Os níveis de restrição hídrica moderada e severa foram estabelecidos pela reposição da água de irrigação até 50% e 25% da capacidade de retenção de água do solo, respectivamente. Como tratamento controle, plantas de cana-de-açúcar também foram cultivadas com reposição da água de irrigação de 100% da capacidade de retenção de água do solo. Cada unidade experimental foi constituída por um vaso contendo uma planta de cana-de-açúcar.

O transplantio das mudas pré-brotadas (MPB) de cana-de-açúcar para os vasos plásticos foi realizado aos 18 dias após a brotação. Os minirrebolos (segmentos de colmos com gemas individualizadas) de 3,0 cm de comprimento utilizados para a produção das mudas pré-brotadas foram extraídos de colmos-sementes provenientes de um viveiro de multiplicação de 10 meses de idade das 13 variedades de cana-de-açúcar, localizado na Estação Experimental Agrônômica, da Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul – UEMS,

em Cassilândia (MS). As mudas pré-brotadas foram produzidas em caixas plásticas ($53 \times 32 \times 8$ cm), preenchidas com substrato comercial (BioPlant[®]). As principais características das variedades de cana-de-açúcar são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1. Principais características agrônômicas das 13 variedades de cana-de-açúcar utilizadas no estudo

Variedade	Exigência em ambientes	Velocidade de crescimento	Potencial de perfilhamento	Porte
CTC2	Média-Alta restrição	Rápido	Alto	Alto
CTC4	Alta-Média restrição	Regular	Médio	Alto
IACSP95-5000	Alta restrição	Regular	Médio	Médio
RB825336	Baixa restrição	Regular	Alto	Médio
RB835054	Média-Alta restrição	Lento	Médio	Médio
RB855035	Baixa-Média restrição	Regular	Médio	Médio
RB855156	Baixa-Média restrição	Rápida	Médio	Médio
RB855453	Alta restrição	Regular	Médio	Médio
RB855536	Alta restrição	Regular	Médio	Médio
RB867515	Média restrição	Rápido	Médio	Alto
RB965902	Média restrição	Rápido	Alto	Alto
RB966928	Média restrição	Rápido	Alto	Médio
SP80-1842	Alta restrição	Lento	Médio	Médio

Após o transplântio as plantas foram mantidas em condições controladas de casa de vegetação por um período total de 100 dias. Durante os primeiros 65 dias, todos os tratamentos foram diariamente irrigados para manter o teor de água do solo próximo a 100% da capacidade de retenção de água. Posteriormente, a imposição da restrição hídrica (50% e 25% da capacidade de retenção de água do solo) foi realizada por um período de 35 dias. O conteúdo de água no solo foi monitorado diariamente nos períodos da manhã e da tarde (9:00 e 15:00 horas) com o sensor Three-way Meter, instalado no centro dos vasos de cada tratamento, na profundidade de 12 cm.

Após os 35 dias de exposição as condições de deficiência hídrica, a parte aérea das plantas de cana-de-açúcar foi cortada rente ao nível do solo, e o material vegetal (colmos e folhas) foi colocado para secar em estufa de circulação forçada de ar à 65 °C, por 5 dias, e então pesado em balança semi-analítica, para a determinação da produção de matéria seca da parte aérea (MSPA).

Neste estudo, 12 índices de tolerância à seca propostos por diversos pesquisadores foram utilizados para avaliar a resposta de produção de matéria seca da parte aérea (MSPA) das 13 variedades de cana-de-açúcar cultivadas em condições de adequada disponibilidade de água (controle) e em condições de deficiência hídrica moderada e severa. Os dados de MSPA, registrados para cada variedade em cada condição de disponibilidade de água do solo foram utilizados para calcular os índices de tolerância à seca. Os 12 índices de tolerância à seca utilizados neste estudo são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2. Índices de tolerância à seca utilizados para avaliar o grau de tolerância das 13 variedades de cana-de-açúcar quando cultivadas sob deficiência hídrica moderada e severa

Índice de tolerância à seca	Abreviação e Equação [†]	Referência
1. Índice de tolerância	$TOL = Y_p - Y_s$	Rosielle e Hamblin (1981)
2. Produtividade média	$MP = (Y_s + Y_p)/2$	Rosielle e Hamblin (1981)
3. Índice de estabilidade de rendimento	$YSI = Y_s/Y_p$	Bousslama e Schapaugh (1984)
4. Índice de resistência à seca	$DI = [Y_s \times (Y_s/Y_p)]/\bar{Y}_s$	Blum (1988)
5. Índice de tolerância de estresse	$STI = (Y_s \times Y_p)/(\bar{Y}_p)^2$	Fernández (1992)
6. Produtividade média geométrica	$GMP = \sqrt{(Y_s \times Y_p)}$	Fernández (1992)
7. Índice de rendimento	$YI = Y_s/\bar{Y}_s$	Gavuzzi <i>et al.</i> (1997)
8. Tolerância de estresse modificado (k_1)	$k_1STI = Y_p^2/\bar{Y}_p^2$	Farshadfar e Sutka (2002)
9. Tolerância de estresse modificado (k_2)	$k_2STI = Y_s^2/\bar{Y}_s^2$	Farshadfar e Sutka (2002)
10. Percentual de suscetibilidade ao estresse	$SSPI = [(Y_p - Y_s)/2 \times \bar{Y}_p] \times 100$	Moosavi <i>et al.</i> (2008)
11. Índice de tolerância abiótica	$ATI = [(Y_p - Y_s)/(\bar{Y}_p \bar{Y}_s)] \times \sqrt{(Y_p \times Y_s)}$	Moosavi <i>et al.</i> (2008)
12. Média harmônica	$HM = [2 \times (Y_s \times Y_p)]/(Y_s + Y_p)$	Jafari <i>et al.</i> (2009)

[†] Nas equações acima, Y_s , Y_p , representam a produção de matéria seca da parte aérea das plantas expostas às condições de deficiência hídrica (moderada ou severa) e sob adequada disponibilidade de água (controle) para cada variedade de cana-de-açúcar, respectivamente, enquanto \bar{Y}_s e \bar{Y}_p representam a produção média de matéria seca da parte aérea de todas as variedades de cana-de-açúcar expostas às condições de deficiência hídrica (moderada ou severa) e sob adequada disponibilidade de água (controle), respectivamente.

Os dados foram submetidos à análise de variância univariada, e as médias foram agrupadas pelo teste de Scott-Knott à 5% de probabilidade, com o objetivo de discriminar as variedades de cana-de-açúcar dentro dos ambientes de deficiência hídrica (moderada e severa) e entre os ambientes pelos índices de tolerância à seca. As análises foram realizadas utilizando-se o software estatístico Sisvar[®] versão 5.6 para Windows (FERREIRA, 2014).

Análise de correlação linear de Pearson foram realizadas entre os diferentes índices de tolerância à seca e a produção de MSPA das plantas de cana-de-açúcar nas distintas condições de deficiência hídrica. A identificação das variedades tolerantes e, ou suscetíveis à deficiência hídrica foi realizada com base em todos os índices de tolerância à seca, por meio dos três métodos de análise multivariada (método do ranqueamento, método de agrupamentos hierárquico e análise de componentes principais).

O método do ranqueamento foi utilizado como proposto por Farshadfar *et al.* (2012), com modificações propostas por Zuffo *et al.* (2020). Neste método, uma variedade com o maior valor para cada um dos índices de tolerância Y_p , Y_s , MP, YSI, DI, STI, GMP, YI, k_1STI , k_2STI , SSPI, ATI e HM recebeu uma pontuação de classificação igual a 1, ao passo que para a variedade com o menor valor para o índice de tolerância TOL foi atribuído uma pontuação de classificação igual a 1. Foram calculados a pontuação média do ranqueamento (R) e o desvio padrão dos ranqueamentos (DP_R) para todos os índices de tolerância à seca das 13 variedades de cana-de-açúcar em condições de restrição hídrica moderada e severa.

A discriminação das variedades quanto ao grau de tolerância à seca foi realizada com base na pontuação média do ranqueamento de cada variedade, considerando-se o valor do quartil que divide as 13 posições possíveis do ranqueamento em quatro partes iguais. Portanto, uma variedade com pontuação média do ranqueamento abaixo do valor do primeiro quartil (<4,0 pontos) é classificada como tolerante (T) à seca; uma variedade com pontuação média entre o valor do primeiro e segundo quartil (4,1 a

7,0 pontos) é classificada como moderadamente tolerante (MT) à seca; uma variedade com pontuação média do ranqueamento entre o valor do segundo e terceiro quartil (7,1 a 10,0 pontos) é classificada como moderadamente suscetível (MS) à seca; e, por sua vez, o grupo de cultivares suscetíveis (S) à seca é representado pelas variedades com pontuação média do ranqueamento acima do valor do terceiro quartil (> 10,0 pontos).

A análise multivariada pelo método de agrupamento hierárquico foi realizada com base na distância Euclidiana média padronizada (D) e no método de variância mínima de Ward, para classificar as 13 variedades de cana-de-açúcar em distintos graus de tolerância à seca (variedade tolerante, moderadamente tolerante, moderadamente suscetível e variedade suscetível) quando cultivadas sob condições de deficiência hídrica moderada ou severa. Análise de componentes principais (ACP) com base na matriz de correlação dos índices de tolerância à seca e análise Biplot foram realizadas utilizando-se o software estatístico Action Stat Pro® versão 3.6 para Windows (Estatcamp – Consultoria Estatística e Qualidade, Campinas, SP).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A produção de matéria seca da parte aérea (MSPA) das plantas de cana-de-açúcar em condições controle (Y_p) variou de 129 a 247 g/planta, e separou as variedades de cana-de-açúcar em quatro grupos (Tabela 3). A produção de MSPA foi maior nas variedades RB855035, RB855453 e SP80-1842, enquanto a menor produção de MSPA foi obtida nas variedades IACSP95-5000, RB855536 e RB867515.

Em condições de restrição hídrica moderada, a produção de MSPA variou de 89 a 196 g/planta, permitindo a separação das variedades em quatro grupos, sendo a maior produção de MSPA observadas nas variedades RB855035 e RB965902, ao passo que a menor produção foi obtida na variedade RB855536. Em condições de restrição hídrica severa, a produção de MSPA variou de 77 a 148 g/planta, e permitiu a separação das variedades de cana-de-açúcar em quatro grupos, na qual a variedade RB966928 compôs o grupo de maior produção de MSPA, e as variedades CTC4, IACSP95-5000, RB825336, RB855536, RB965902 e SP80-1842 representaram o grupo com menor potencial de produção de MSPA.

A produção média de MSPA das plantas sob condições controle foi de 183 g/planta, e em condições de deficiência hídrica moderada e severa foi de 153 e 104 g/planta, o que representou redução de 16% e 43% na capacidade de produção de MSPA das plantas de cana-de-açúcar, respectivamente (Tabela 3). Pincelli e Silva (2012) também reportaram menor produção de matéria seca da parte aérea das plantas de cana-de-açúcar em condições de deficiência hídrica. Holanda *et al.* (2014) constataram que houve redução de 45% na produção de MSPA das plantas em condições de deficiência hídrica. O menor acúmulo de MSPA sob condições de deficiência hídrica é consequência dos mecanismos de adaptação das plantas para evitar a perda excessiva de água. Em condições de deficiência hídrica ocorre diminuição da área foliar, o que reduz a interceptação de radiação solar e reduz a condutância estomática, e conseqüentemente, tem-se menor assimilação de CO_2 e menor acúmulo de matéria seca na parte aérea das plantas (CAVATTE *et al.*, 2011).

O índice de tolerância (TOL) permitiu separar as variedades em quatro grupos, sendo que o grupo com o melhor índice de tolerância em condições de deficiência hídrica moderada foi representado pelas variedades IACSP95-5000, RB835054, RB855156, RB867515, RB965902 e RB966928, e a variedade SP80-1842 foi classificado no grupo com o pior índice TOL. Em condições de restrição hídrica severa, as variedades RB855536, RB867515 e RB966928 foram agrupadas no grupo com melhor índice TOL, enquanto a variedade SP80-1842 foi agrupada no grupo com o pior índice TOL. Dadbakhsh *et al.* (2011) avaliando 19 variedades de trigo sob condições de deficiência hídrica identificaram apenas duas variedades com maior índice TOL. Estes autores reportaram que o maior valor desse índice de tolerância indica o alto grau de suscetibilidade da variedade à deficiência hídrica.

Tabela 3. Produção de matéria seca da parte aérea e índices de tolerância à seca para 13 variedades de cana-de-açúcar cultivadas em condições de adequada disponibilidade de água e sob condições de deficiência hídrica moderada e severa

Variedade	Y _p (g)	Y _s (g)	TOL	MP	YSI	DI	STI	GMP	YI	k ₁ STI	k ₂ STI	SSPI	ATI	HM
Deficiência hídrica moderada														
CTC2	199b	148c	50,3c	174b	0,75b	0,73c	0,88b	172b	0,97c	1,18b	0,95c	13,7b	7268b	170b
CTC4	174c	136c	37,3b	155c	0,79b	0,70c	0,71c	154c	0,89c	0,90c	0,80c	10,2c	4805c	153c
IACSP95-5000	145d	129c	15,2a	137c	0,90a	0,76c	0,56c	137c	0,85c	0,63d	0,72c	4,2d	1782d	136c
RB825336	169c	138c	31,2b	154c	0,82b	0,74c	0,70c	153c	0,90c	0,86c	0,82c	8,5c	4056c	152c
RB835054	169c	160b	9,3a	164c	0,95a	0,99b	0,80b	164b	1,05b	0,85c	1,09b	2,5d	1281d	164b
RB855035	247a	190a	56,1c	219a	0,78b	0,97b	1,40a	217a	1,25a	1,82a	1,56a	15,3b	10231b	215a
RB855156	181c	174b	4,5a	179b	0,98a	1,13b	0,95b	179b	1,15b	0,97c	1,33b	1,2d	673d	178b
RB855453	227a	176b	52,4c	201a	0,77b	0,88b	1,18a	199a	1,14b	1,54a	1,31b	14,3b	8678b	197a
RB855536	129d	89d	40,4b	109d	0,69c	0,40d	0,34d	107d	0,58d	0,50d	0,34d	11,0c	3626c	105d
RB867515	149d	145c	4,0a	147c	0,97a	0,93b	0,64c	147c	0,95c	0,66d	0,91c	1,1d	471d	147c
RB965902	200b	196a	3,6a	198a	0,98a	1,26a	1,17a	198a	1,28a	1,20b	1,66a	1,0d	617d	198a
RB966928	168c	166b	2,5a	167c	0,98a	1,07b	0,83b	167b	1,09b	0,85c	1,18b	0,7d	332d	167b
SP80-1842	228a	137c	91,3d	182b	0,60d	0,54d	0,93b	176b	0,90c	1,55a	0,81c	24,9a	13384a	171b
Média	183	153	30,6	168	0,84	0,85	0,85	167	1,00	1,04	1,04	8,35	4403	166
CV (%)	7,91	7,11	32,31	7,04	4,74	8,90	15,47	7,04	7,11	17,49	15,25	32,31	38,71	7,07
Deficiência hídrica severa														
CTC2	199b	122b	76,7b	160c	0,62b	0,73c	0,72b	155b	1,17b	1,18b	1,38b	20,9c	6779b	150b
CTC4	174c	86d	87,8c	130d	0,49c	0,41d	0,45d	122d	0,83d	0,90c	0,69d	23,9b	6087b	115d
IACSP95-5000	145d	86d	58,4b	115e	0,60b	0,50c	0,37d	111e	0,83d	0,63d	0,69d	15,9c	3719c	108d
RB825336	169c	83d	86,5c	126d	0,50c	0,40d	0,42d	118d	0,80d	0,86c	0,64d	23,6b	5818b	111d
RB835054	169c	105c	63,8b	137d	0,62b	0,63c	0,53c	133c	1,01c	0,85c	1,02c	17,4c	4823b	130c
RB855035	247a	128b	119,1c	187a	0,52c	0,64c	0,93a	177a	1,23b	1,82a	1,51b	32,5b	11987a	168a
RB855156	181c	107c	73,6b	144c	0,60b	0,61c	0,58c	139c	1,03c	0,97c	1,07c	20,1c	5792b	134c
RB855453	227a	117b	110,0c	172b	0,52c	0,58c	0,79b	163b	1,12b	1,54a	1,27b	30,0b	10188a	154b
RB855536	129d	86d	43,4a	107e	0,67b	0,55c	0,33d	105e	0,82d	0,50d	0,68d	11,8d	2614c	103d
RB867515	149d	115b	33,9a	132d	0,78a	0,86b	0,51c	131c	1,11b	0,66d	1,23b	9,2d	2510c	130c
RB965902	200b	93d	106,8c	146c	0,47c	0,42d	0,55c	136c	0,89d	1,20b	0,80d	29,1b	8338a	127c
RB966928	168c	148a	20,7a	158c	0,88a	1,25a	0,74b	158b	1,42a	0,85c	2,02a	5,6d	1864c	157b
SP80-1842	228a	77d	151,7d	153c	0,34d	0,25d	0,53c	133c	0,74d	1,55a	0,56d	41,1a	11345a	115d
Média	183	104	79,3	144	0,58	0,60	0,57	137	1,00	1,04	1,04	21,6	6597	131
CV (%)	7,91	7,93	22,18	5,51	11,79	17,63	10,74	5,36	7,92	17,54	15,09	22,18	26,38	5,75

Médias seguidas de letras distintas nas colunas diferem pelo teste Scott-Knott à 5% de probabilidade. Y_p: produção de matéria seca da parte aérea em condições controle; Y_s: produção de matéria seca da parte aérea em condições de deficiência hídrica moderada ou severa; TOL: índice de tolerância; MP: produtividade média; YSI: índice de estabilidade do rendimento; DI: índice de resistência à seca; STI: índice de tolerância ao estresse; GMP: produtividade média geométrica; YI: índice de rendimento; k₁STI e k₂STI: índice de tolerância de estresse modificado k1 e k2; SSPI: percentual de suscetibilidade ao estresse; ATI: índice de tolerância abiótica; HM: média harmônica; CV: Coeficiente de variação.

O maior índice de produtividade média (MP) sob condições de deficiência hídrica moderada foi obtido para as variedades RB855035, RB855453 e RB965902, ao passo que o grupo de o menor índice MP foi representado pela variedade RB855536. Em condições de deficiência hídrica severa, o maior índice MP foi observado para as variedades RB855035 e RB855453, ao passo que as variedades CTC4, IACSP95-5000 e RB855536 foram agrupadas no grupo com o menor índice MP.

O índice de estabilidade do rendimento (YSI) sob condições de deficiência hídrica moderada classificou as variedades de cana-de-açúcar em quatro grupos, sendo que as variedades IACSP95-5000, RB835054, RB855156, RB867515, RB965902 e RB966928 foram classificados no grupo com o maior índice YSI, e a variedade SP80-1842 representou o grupo com menor índice YSI. Em condições de deficiência hídrica severa, o maior índice YSI foi obtida para as variedades RB867515 e RB966928, ao passo que o menor índice YSI foi obtido na variedade SP80-1842.

Em condições de deficiência hídrica moderada, o maior índice de resistência à seca (DI) foi obtido para a variedades RB965902, enquanto o menor índice DI foi observado para as variedades RB855536 e SP80-1842. Em condições de deficiência hídrica severa, o maior índice DI foi obtido para a variedade RB966928, e as variedades CTC4, RB825336, RB965902 e SP80-1842 foram agrupadas no grupo com os menores valores do índice DI.

O índice de tolerância à seca (STI) sob condições de deficiência hídrica moderada classificou as variedades RB855035, RB855453 e RB965902 no grupo com o maior valor do índice STI, ao passo que o menor índice STI foi obtido para a variedade RB855536. Em condições de deficiência hídrica severa, o maior índice STI foi obtido para a variedade RB855035, e o menor índice STI foi observado para as variedades CTC4, IACSP95-5000, RB825336 e RB855536.

O índice da produtividade média geométrica (GMP) sob condições de deficiência hídrica moderada classificou as variedades RB855035, RB855453 e RB965902 no grupo com o maior índice GMP, ao passo que o menor índice GMP foi obtida para a variedade RB855536. Em condições de deficiência hídrica severa, o índice GMP classificou as variedades RB855035, RB855453 e RB966928 no grupo com os maiores índices, e as variedades IACSP95-5000 e RB855536 foram classificadas no grupo com o menor índice GMP.

O maior índice de rendimento (YI) sob condições de deficiência hídrica moderada foi obtido para as variedades RB855035 e RB965902, ao passo que o menor índice YI foi obtido para a variedade IACSP95-5000. Em condições de deficiência hídrica severa, o maior índice YI foi obtido para a variedade RB966928, ao passo que o menor índice YI foi obtido para as variedades CTC4, IACSP95-5000, RB825336, RB855536, RB965902 e SP80-1842.

O maior índice de tolerância de estresse modificado k_1 (k_1 STI) sob condições de deficiência hídrica moderada foi obtido para as variedades RB855035, RB855453 e SP80-1842, ao passo que o menor índice k_1 STI foi obtido para as variedades IACSP95-5000, RB855536 e RB867515. Em condições de deficiência hídrica severa, o maior índice k_1 STI foi obtido para as variedades RB855035 e SP80-1842, ao passo que o menor índice k_1 STI foi obtido para as variedades IACSP95-5000, RB855536 e RB867515.

O índice tolerância de estresse modificado k_2 (k_2 STI) sob condições de deficiência hídrica moderada foi maior para as variedades RB855035 e RB 965902, e menor para a variedade RB855536. Em condições de deficiência hídrica severa, o maior índice k_2 STI foi obtido para a variedade RB966928, ao passo que as variedades CTC 4, IACSP95-5000, RB825336, RB965902 e SP80-1842.

O índice de percentual de susceptibilidade ao estresse (SSPI) e o índice de tolerância abiótica (ATI) sob condições de deficiência hídrica moderada foram maiores para a variedade SP80-1842, ao passo que os menores índices SSPI e ATI foram obtidos paras as variedades IACSP95-5000, RB835054, RB855156, RB867515, RB965902 e RB966928. Em condições de restrição deficiência severa, o maior índice SSPI foi

obtido na variedade SP80-1842, e o menor índice SSPI foi observado nas variedades RB855536, RB867515 e RB966928. Por sua vez, o maior índice ATI foi obtido para as variedades RB855035, RB855453, RB965902 e SP80-1842, enquanto as variedades IACSP95-5000, RB855536, RB867515 e RB966928 possuem o menor índice ATI.

O maior índice de tolerância à seca da média harmônica (HM) sob condições de deficiência hídrica moderada foi obtido nas variedades RB855035, RB855453 e RB965902, e o menor índice HM foi obtida para a variedade RB855536. Em condições de deficiência hídrica severa, o maior índice HM foi obtido para a variedade RB855035, ao passo que o menor índice HM foi obtido para as variedades CTC4, IACSP95-5000, RB825336, RB855536 e SP80-1842.

O coeficiente de correlação linear de Pearson foi utilizado para determinar os índices de tolerância à seca mais adequados para representar a produção de MSPA das plantas de cana-de-açúcar em condições controle e sob deficiência hídrica moderada e severa. A análise de correlação reportou associação positiva e altamente significativa entre os índices de tolerância à seca e a produção de MSPA das plantas sob condições controle (Y_p) e sob condições de deficiência hídrica moderada ou severa (Y_s) (Tabela 4).

Em condições de deficiência hídrica moderada, os maiores valores dos coeficientes de correlação linear de Pearson foram obtidos para os índices MP ($r = 0,93$ para Y_p e $r = 0,89$ para Y_s), STI ($r = 0,91$ para Y_p e $r = 0,90$ para Y_s), GMP ($r = 0,91$ para Y_p e $r = 0,92$ para Y_s), YI ($r = 0,67$ para Y_p e $r = 1,00$ para Y_s), k_1 STI ($r = 0,99$ para Y_p e $r = 0,63$ para Y_s), k_2 STI ($r = 0,66$ para Y_p e $r = 0,99$ para Y_s) e HM ($r = 0,89$ para Y_p e $r = 0,93$ para Y_s). Todos estes coeficientes de correlação foram significativos à 0,1% (Tabela 4). Portanto, estes índices são os mais adequados para identificar as variedades de cana-de-açúcar com maior potencial de produção de MSPA das plantas, tanto em condições de deficiência hídrica moderada, como em condições de adequada disponibilidade de água (controle).

Benanni *et al.* (2017) avaliando 40 variedades de trigo em condições de deficiência hídrica constataram que os índices de tolerância à seca DI, GMP, HM, MP, k_1 STI, k_2 STI, SSPI, STI e TOL sofreram influência dos níveis de restrição hídrica; por sua vez, os índices ATI, GM e YI demonstraram maior estabilidade. Os resultados descritos por Benanni *et al.* (2017) são semelhantes ao presente trabalho, com exceção do índice YI que teve alta correlação. Drikvand *et al.* (2012) investigando a resposta de dez variedades de trigo em condições irrigadas e de sequeiro relataram que os índices MP, GMP e STI são indicados para à seleção de variedades tolerantes à seca.

Tabela 4. Coeficientes de correlação linear de Pearson entre a produção de matéria seca da parte aérea em condições de adequada disponibilidade de água (Y_p) e sob condições de deficiência hídrica moderada ou severa (Y_s) e índices de tolerância à seca calculadas para as 13 variedades de cana-de-açúcar

	Deficiência hídrica moderada													
	Y_p	Y_s	TOL	MP	YSI	DI	STI	GMP	YI	k_1 STI	k_2 STI	SSPI	ATI	HM
Y_p	1	0,67**	0,60**	0,93**	-0,36	0,24	0,91**	0,91**	0,67**	0,99**	0,66**	0,60**	0,74**	0,89**
Y_s	0,20	1	-0,20	0,89**	0,44*	0,88**	0,90**	0,92**	1,00**	0,63**	0,99**	-0,20	0,01	0,93**
TOL	0,83**	-0,37	1	0,27	-0,95**	-0,63**	0,24	0,21	-0,20	0,63**	-0,19	1,00**	0,97**	0,16
MP	0,89**	0,63**	0,49*	1	0,00	0,58**	0,99**	1,00**	0,89**	0,91**	0,89**	0,27	0,45*	0,99**
YSI	-0,60**	0,65**	-0,93**	-0,17	1	0,81**	0,01	0,05	0,44*	-0,40*	0,42*	-0,95**	-0,86**	0,10
DI	-0,25	0,88**	-0,73**	0,22	0,91**	1	0,59**	0,62**	0,88**	0,20	0,87**	-0,63**	-0,46*	0,65**
STI	0,76**	0,78**	0,28	0,97**	0,05	0,41*	1	0,99**	0,90**	0,90**	0,91**	0,24	0,43*	0,99**
GMP	0,76**	0,79**	0,28	0,97**	0,05	0,41*	1,00**	1	0,92**	0,89**	0,91**	0,21	0,40*	1,00**
YI	0,20	1,00**	-0,37	0,63**	0,65**	0,88**	0,78**	0,79**	1	0,63**	0,99**	-0,20	0,01	0,93**
k_1 STI	0,99**	0,19	0,83**	0,88**	-0,58**	-0,25	0,76**	0,75**	0,19	1	0,64**	0,63**	0,77**	0,86**
k_2 STI	0,19	0,99**	-0,38	0,62**	0,65**	0,89**	0,77**	0,77**	0,99**	0,18	1	-0,19	0,01	0,93**
SSPI	0,83**	-0,37	1,00**	0,49*	-0,93**	-0,73**	0,28	0,28	-0,37	0,83**	-0,38	1	0,97**	0,16
ATI	0,94**	-0,11	0,95**	0,69**	-0,79**	-0,54**	0,53**	0,52**	-0,11	0,95**	-0,12	0,95**	1	0,36
HM	0,60**	0,90**	0,06	0,90**	0,25	0,58**	0,97**	0,98**	0,90**	0,59**	0,88**	0,06	0,33	1

* e **: significativo à 1% e 0,1%, respectivamente. Y_p : produção de matéria seca da parte aérea em condições controle; Y_s : produção de matéria seca da parte aérea em condições de deficiência hídrica moderada ou severa; TOL: índice de tolerância; MP: produtividade média; YSI: índice de estabilidade do rendimento; DI: índice de resistência à seca; STI: índice de tolerância ao estresse; GMP: produtividade média geométrica; YI: índice de rendimento; k_1 STI e k_2 STI: índice de tolerância de estresse modificado k_1 e k_2 ; SSPI: percentual de suscetibilidade ao estresse; ATI: índice de tolerância abiótica; HM: média harmônica.

Em condições de deficiência hídrica severa, os maiores valores dos coeficientes de correlação linear de Pearson foram obtidos para os índices MP ($r = 0,89$ para Y_p e $r = 0,63$ para Y_s), STI ($r = 0,76$ para Y_p e $r = 0,78$ para Y_s), GMP ($r = 0,76$ para Y_p e $r = 0,79$ para Y_s), e HM ($r = 0,60$ para Y_p e $r = 0,90$ para Y_s). Todos estes coeficientes de correlação foram significativos à 0,1%.

Os índices TOL ($r = 0,83$ para Y_p e $r = -0,37$ para Y_s), k_1 STI ($r = 0,99$ para Y_p e $r = 0,19$ para Y_s), SSPI ($r = 0,83$ para Y_p e $r = -0,37$ para Y_s) e ATI ($r = 0,94$ para Y_p e $r = -0,11$ para Y_s), também apresentaram altos valores de coeficientes de correlação com a produção de matéria seca em condições controle (Y_p), e valores de coeficientes de correlação relativamente baixos para as condições de restrição hídrica severa (Y_s). Erdemci (2018) avaliando 14 variedades de grão de bico em condições estressantes e não estressantes constataram alta correlação dos índices SSI, SDI, TOL, ATI e SSPI quando as plantas foram cultivadas em condições sem restrição hídrica.

No presente trabalho os índices TOL, k_2 STI, SSPI e ATI não foram adequados para identificar variedades de cana-de-açúcar com alto potencial de produção de MSPA em condições de restrição hídrica severa (Tabela 4). Por sua vez, os índices DI ($r = -0,25$ para Y_p e $r = 0,88$ para Y_s) e k_2 STI ($r = 0,19$ para Y_p e $r = 0,99$ para Y_s) tiveram altos valores de coeficiente de correlação com a produção de matéria seca da parte aérea das plantas em condições de restrição hídrica severa.

Os valores relativamente baixos dos coeficientes de correlação entre a produção de MSPA sob condições controle (Y_p) e sob restrição hídrica moderada ($r = 0,67$) e severa ($r = 0,20$), indicam que as variedades de cana-de-açúcar que apresentaram maior produção de matéria seca da parte aérea em condições controle, não necessariamente foram as variedades com maior potencial de produção de matéria seca da parte aérea em condições de restrição hídrica. Estes resultados indicam a complexidade da seleção de variedades tolerantes à seca e, que possuem também, alto potencial de produção de MSPA em condições

não estressantes, de modo que, as variedades em sua maioria, possuem respostas distintas às condições ambientais adversas.

A seleção com base em uma combinação de índices pode ser mais útil para selecionar variedades tolerantes à seca. No entanto, o coeficiente de correlação determina o grau de associação linear apenas entre duas características. Assim, torna-se necessário abordagem melhor do que a análise de correlação, como os métodos de análise multivariada, para identificar variedades superiores para as condições ambientais adversas.

A discriminação do nível de tolerância, ou de susceptibilidade das variedades de cana-de-açúcar à restrição hídrica com base em apenas um único critério ou índice de tolerância à seca pode ser contraditória (Tabela 3). Por exemplo, de acordo com os índices TOL e YSI, as variedades de cana-de-açúcar IACSP95-5000, RB 835054, RB855156, RB867515, RB965902 e RB 966928 foram consideradas as mais tolerantes à seca em condições de restrição hídrica moderada, ao passo que com base nos índices MP, STI, GMP e HM, as variedades RB855035, RB855453 e RB965902 foram consideradas as mais tolerantes à restrição hídrica moderada. Portanto, a diferenciação e a separação das variedades em diferentes níveis de tolerância à seca deve ser realizada levando-se em consideração todos os índices de tolerância (NAGHAVI *et al.*, 2013). Neste sentido, o método do ranqueamento tem sido utilizado para classificar as variedades em distintos níveis de tolerância à seca (FARSHADFAR *et al.*, 2012).

Neste contexto, o ranqueamento das 13 variedades de cana-de-açúcar a partir dos diferentes índices de tolerância à seca calculados com base na produção de matéria seca da parte aérea em condições controle (Y_p) e sob condições de restrição hídrica moderada e severa (Y_s) é mostrado na Tabela 5.

Tabela 5. Ranqueamento, pontuação média do ranqueamento (\bar{R}) e desvio padrão do ranqueamento (DP) para a produção de matéria seca da parte aérea (Y_p e Y_s) e índices de tolerância à seca das 13 variedades de cana-de-açúcar cultivadas em condições de adequada disponibilidade de água e sob condições de deficiência hídrica moderada ou severa

(Continua)

Variedade	Y_p	Y_s	TOL	MP	YSI	DI	STI	GMP	YI	k_1 STI	k_2 STI	SSPI	ATI	HM	\bar{R} (\pm DP)	Nível de tolerância [†]
Deficiência hídrica moderada																
CTC2	5	7	10	6	11	10	6	6	7	5	7	4	4	6	6,7 (\pm 1,7)	MT
CTC4	7	11	8	9	8	11	9	9	11	7	11	6	5	9	8,6 (\pm 1,6)	MS
IACSP95-5000	12	12	6	12	6	8	12	12	12	12	12	8	8	12	10,3 (\pm 2,2)	S
RB825336	9	9	7	10	7	9	10	10	9	8	9	7	6	10	8,6 (\pm 1,1)	MS
RB835054	8	6	5	8	5	4	8	8	6	10	6	9	9	8	7,1 (\pm 1,6)	MS
RB855035	1	2	12	1	9	5	1	1	2	1	2	2	2	1	3,0 (\pm 2,4)	T
RB855156	6	3	4	5	3	2	4	4	3	6	3	10	10	4	4,8 (\pm 1,9)	MT
RB855453	3	4	11	2	10	7	2	2	4	3	4	3	3	3	4,4 (\pm 2,1)	MT
RB855536	13	13	9	13	12	13	13	13	13	13	13	5	7	13	11,6 (\pm 2,0)	S
RB867515	11	8	3	11	4	6	11	11	8	11	8	11	12	11	9,0 (\pm 2,4)	MS
RB965902	4	1	2	3	1	1	3	3	1	4	1	12	11	2	3,5 (\pm 2,4)	T
RB966928	10	5	1	7	2	3	7	7	5	9	5	13	13	7	6,7 (\pm 2,8)	MT
SP80-1842	2	10	13	4	13	12	5	5	10	2	10	1	1	5	6,6 (\pm 4,0)	MT
Deficiência hídrica severa																
CTC2	5	3	7	3	5	3	4	4	3	5	3	7	5	4	4,4 (\pm 1,1)	MT
CTC4	7	10	9	10	11	11	10	10	10	7	9	5	6	10	8,9 (\pm 1,5)	MS
IACSP95-5000	12	11	4	12	6	9	12	12	9	12	10	10	10	12	10,1 (\pm 1,8)	S

(Conclusão)

Variedade	Y _p	Y _s	TOL	MP	YSI	DI	STI	GMP	YI	k ₁ STI	k ₂ STI	SSPI	ATI	HM	\bar{R} (\pm DP)	Nível de tolerância [†]
RB825336	9	12	8	11	10	12	11	11	12	8	12	6	7	11	10,0 (\pm 1,7)	MS
RB835054	8	7	5	8	4	5	7	7	7	9	7	9	9	7	7,1 (\pm 1,1)	MS
RB855035	1	2	12	1	8	4	1	1	2	1	2	2	1	1	2,8 (\pm 2,2)	T
RB855156	6	6	6	7	7	6	5	5	6	6	6	8	8	5	6,2 (\pm 0,7)	MT
RB855453	3	4	11	2	9	7	2	2	4	3	4	3	3	3	4,3 (\pm 2,0)	MT
RB855536	13	9	3	13	3	8	13	13	11	13	11	11	11	13	10,4 (\pm 2,6)	S
RB867515	11	5	2	9	2	2	9	9	5	11	5	12	12	6	7,1 (\pm 3,3)	MS
RB965902	4	8	10	6	12	10	6	6	8	4	8	4	4	8	7,0 (\pm 2,1)	MT
RB966928	10	1	1	4	1	1	3	3	1	10	1	13	13	2	4,6 (\pm 4,0)	MT
SP80-1842	2	13	13	5	13	13	8	8	13	2	13	1	2	9	8,2 (\pm 4,2)	MS

[†] T = refere-se a uma variedade de cana-de-açúcar tolerante à seca, recebendo pontuação média do ranqueamento (\bar{R}) de 1 a 4,0; MT = variedade moderadamente tolerante com pontuação média do ranqueamento (\bar{R}) de 4,1 a 7,0; MS = variedade moderadamente sensível com pontuação média do ranqueamento (\bar{R}) de 7,1 a 10,0; S = variedade da cana-de-açúcar sensível à seca com a pontuação média do ranqueamento (\bar{R}) de 10,1 a 13.

Considerando todos os índices de tolerância à seca, as variedades de cana-de-açúcar RB855035 e RB965902 expostas à restrição hídrica moderada apresentaram a melhor classificação média pelo método do ranqueamento, recebendo pontuações de 3,0 e 3,5 e, portanto, estas variedades foram classificadas como tolerantes à restrição hídrica moderada.

As variedades IACSP95-5000 e RB855536 apresentaram as piores classificações (maior pontuação) pelo método do ranqueamento e, então, foram classificadas como suscetíveis à restrição hídrica moderada. Em condições de restrição hídrica severa, a variedade RB855035 foi classificada como tolerante à seca, ao passo que as variedades IACSP95-5000 e RB855536 foram classificadas como suscetíveis à restrição hídrica severa.

O método de agrupamento hierárquico da ligação de Ward, com base na distância euclidiana média padronizada (D) e utilizando-se o valor de 50% de similaridade como critério para definição dos grupos, agrupou as 13 variedades de cana-de-açúcar em quatro grupos de tolerância à seca (Figura 1).

Em condições de restrição hídrica moderada, a análise multivariada de agrupamento hierárquico agrupou as variedades em quatro grupos de tolerância constituídos por 3, 4, 1 e 5 variedades de cana-de-açúcar, respectivamente (Figura 1A).

O primeiro grupo foi representado pelas variedades com os maiores índices de tolerância à seca e, portanto, foi considerado o grupo tolerante à restrição hídrica moderada. O segundo e o quarto grupo representou as variedades com os valores intermediários dos índices de tolerância à seca e, portanto, as variedades pertencentes a estes grupos foram classificadas como moderadamente tolerante e moderadamente suscetíveis à restrição hídrica moderada, respectivamente. Por sua vez, o terceiro grupo representou a variedade com os menores índices de tolerância à seca e, assim, foi considerada mais sensível aos efeitos adversos da restrição hídrica moderada.

Perante o exposto, as variedades de cana-de-açúcar SP80-1842, RB855035 e RB855453 foram identificadas como as mais tolerantes à seca, e a variedade RB855536 foi classificada como a mais suscetível à restrição hídrica moderada (Figura 1A).

Em condições de deficiência hídrica severa, o grupo 1 composto pela IACSP95-5000 e RB855536 representou as variedades com os menores índices de tolerância à seca e, portanto, foi considerado o grupo mais sensível à restrição hídrica severa (Figura 1B). O grupo 2 composto pela SP80-1842, RB965902, CTC 4 e RB825336 e o grupo 4 composto pela RB 966928, RB867515, CTC2, RB835054 e RB855156 representam

as variedades com os valores intermediários dos índices de tolerância à seca e, portanto, foram classificadas como moderadamente suscetíveis e moderadamente tolerante à restrição hídrica severa, respectivamente. O grupo 3 composto pela RB855035 e RB855453 representam as variedades com os maiores índices de tolerância à seca e, portanto, foi considerado o grupo tolerante à restrição hídrica severa.

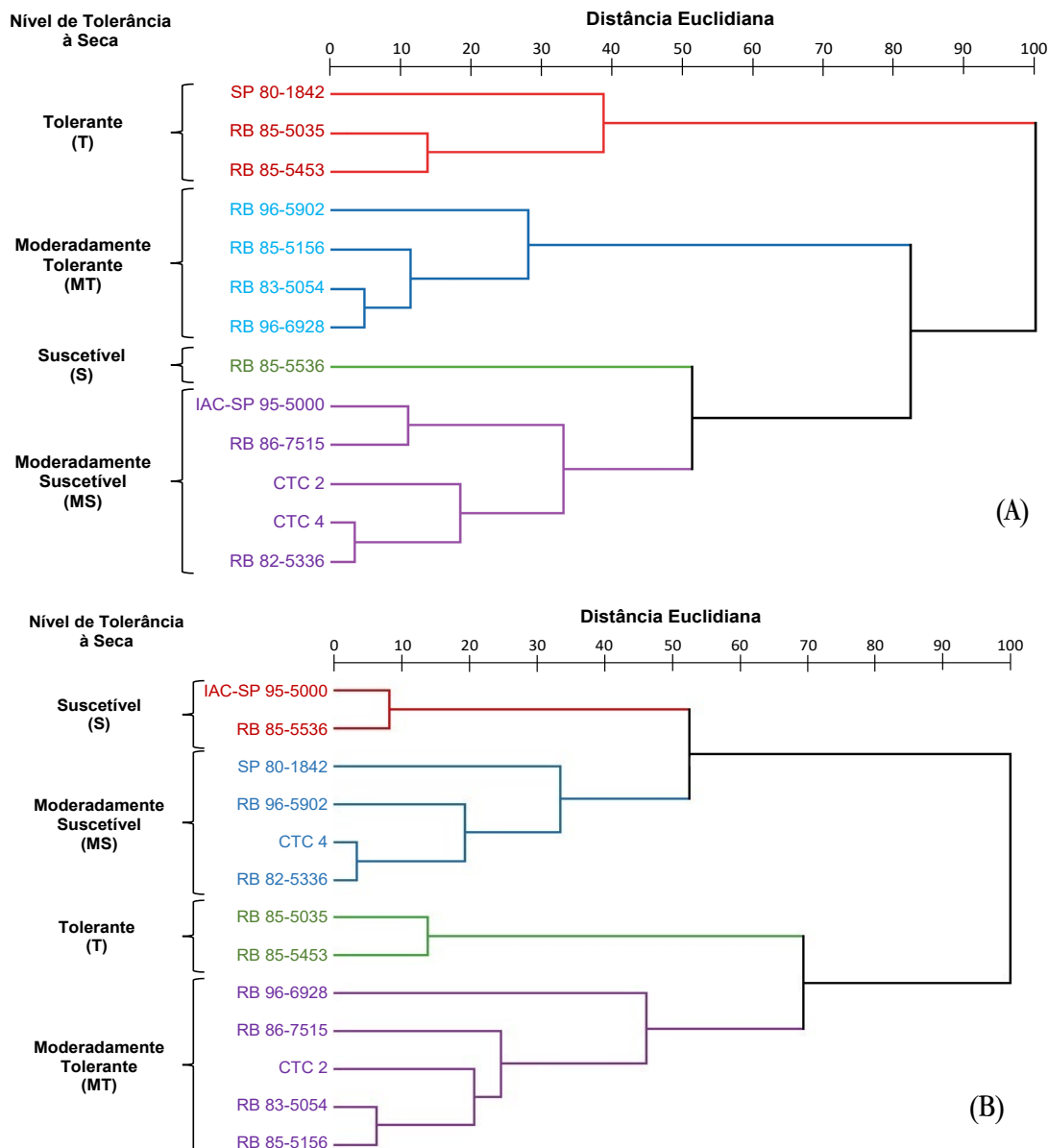


Figura 1. Dendrograma da análise de agrupamento hierárquico das 13 variedades de cana-de-açúcar base na distância Euclidiana média padronizada e no método de variância mínima de Ward utilizando a produção de matéria seca da parte aérea em condições de adequada disponibilidade de água (Y_p) e sob deficiência hídrica (Y_s) e os índices de tolerância à seca (TOL, MP, YSI, DI, STI, GMP, YI, k_1 STI, k_2 STI, SSPI, ATI e HM) para o cultivo em condições de restrição hídrica moderada (A) e severa (B).

Em condições de deficiência hídrica moderada, o primeiro componente principal explica 66,6% da variação total, enquanto o segundo componente principal explica 32,9% da variação (Figura 2A). Devido ao fato dos dois primeiros componentes principais terem explicado mais de 80% da variância total de caracteres analisados (99,5% da variância total acumulada), é possível explicar de maneira satisfatória a variabilidade entre as variedades utilizadas no estudo, permitindo interpretar o fenômeno com considerável simplificação podendo assim, representá-las em gráfico de dispersão bidirecional (Figura 2) (CRUZ; CARNEIRO, 2003).

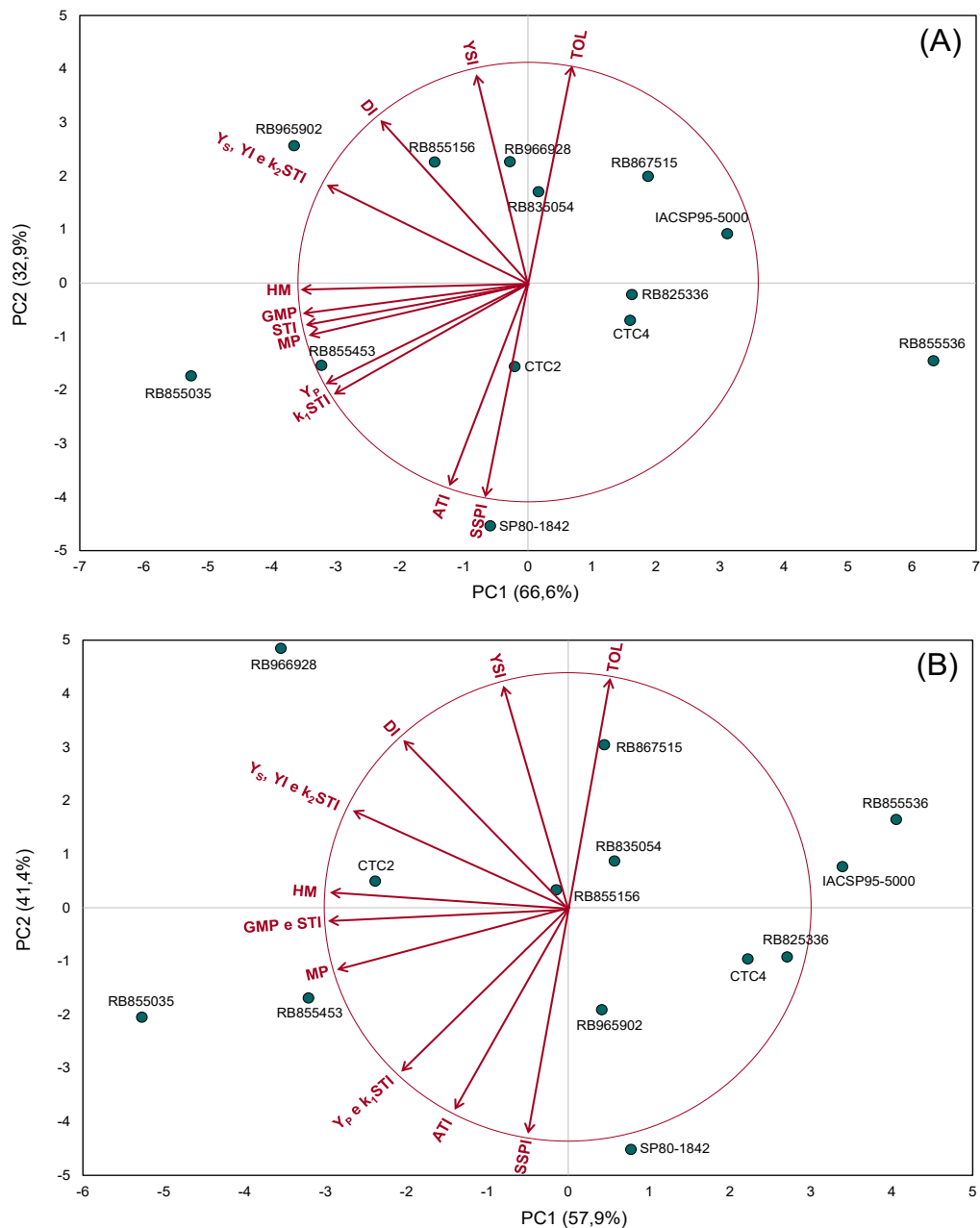


Figura 2. Diagrama Biplot com base no primeiro e segundo componentes principais para a produção de matéria seca da parte aérea das 13 variedades de cana-de-açúcar em condições de adequada disponibilidade de água (Y_p) e sob deficiência hídrica (Y_s) e índices de tolerância à seca (TOL, MP, YSI, DI, STI, GMP, YI, k_1 STI, k_2 STI, SSPI, ATI e HM) para o cultivo em condições de deficiência hídrica moderada (A) e severa (B).

De acordo com o valor dos autovetores, os pesos dos índices GMP ($-0,339$), HM ($-0,339$), MP ($-0,337$), STI ($-0,337$), YI ($-0,319$), Y_s ($-0,319$), k_2 STI ($-0,317$), Y_c ($-0,296$), k_1 STI ($-0,289$) e DI ($-0,226$) são negativamente altos para esse componente principal. Isso indica que quanto maior o valor desses índices de tolerância à seca, menor é o escore do primeiro componente principal. Portanto, quanto maior a nota desses índices de tolerância à seca menor é o escore do primeiro componente principal, e, então, a variedade de cana-de-açúcar pode ser considerada tolerante à restrição hídrica.

O biplot mostra que os índices YI e k_2 STI foram os melhores para identificar variedades tolerantes à condição de restrição hídrica. Menezes et al. (2014) relatou que apenas o índice YI foi adequado na identificação de variedades tolerantes quando havia estresse hídrico. Em contrapartida os vetores dos índices HM, GMP, STI e MP plotados entre Y_s e Y_p , sendo assim similares para a seleção de seca. Os resultados

encontrados corroboram com os encontrados por Dadbakhsh *et al.* (2011) e Menezes *et al.* (2014). O índice HM é o mais adequado para dividir simetricamente o ângulo formado por Y_s e Y_p , sendo assim o índice apropriado para selecionar as variedades adaptadas em ambas as condições conforme relatado por Menezes *et al.* (2014).

O primeiro componente principal pode ser interpretado como um índice de desempenho global da tolerância das variedades de cana-de-açúcar à restrição hídrica. Como os pesos são negativos, quando maior for os índices de tolerância à seca, menor é o valor desse componente e melhor é o índice global de tolerância da variedade de cana-de-açúcar. Portanto, escore mais baixo no primeiro componente principal indica que o índice de tolerância é melhor.

As variedades de cana-de-açúcar RB855053 e RB965902 tiveram os melhores índices de desempenho global, respectivamente, e, portanto, estas variedades foram classificadas como tolerantes à restrição hídrica moderada. Por sua vez, o menor índice de desempenho global foi observado na variedade RB855536, e assim esta foi classificada como suscetível à restrição hídrica moderada (Figura 2A).

Em condições de restrição hídrica severa, o primeiro componente principal explica 57,9% da variação total, enquanto o segundo componente principal explica 41,4% da variação (Figura 2B). Isso indica que os dois primeiros componentes principais explicam 99,3% da variância total. De acordo com o valor dos autovetores, os pesos dos índices GMP (-0,362), STI (-0,362), HM (-0,360), MP (-0,347), YI (-0,310), Y_s (-0,310), k_2 STI (-0,307), Y_c (-0,257) e k_1 STI (-0,255) são negativamente altos para esse componente principal. Isso indica que quanto maior o valor desses índices de tolerância à seca, menor é o escore do primeiro componente principal. Portanto, quanto maior a nota desses índices de tolerância à seca menor é o escore do primeiro componente principal, e, então, a variedade pode ser considerada tolerante à restrição hídrica.

Considerando o diagrama biplot os índices YI e k_2 STI são melhores em distinguir as variedades superiores que apresentam alto rendimento em condições de estresse. Enquanto os índices HM, GMP, STI e MP identificaram as variedades com altos rendimentos sob restrição severa ou boa disponibilidade de água. Dadbakhsh *et al.* (2011) avaliando estresse hídrico em variedades de trigo relatou resultados similares ao presente trabalho. Drikvand *et al.* (2012) afirmou que os índices MP, GMP e STI foram mais adequados a identificar cultivares de trigo de sequeiro com maior desempenho em condições de escassez hídrica.

As variedades de cana-de-açúcar RB855035, RB965902 e RB 855453 tiveram os melhores índices de desempenho global, respectivamente, e, portanto, estas variedades foram classificadas como tolerantes à restrição hídrica severa. Por sua vez, os piores índices de desempenho global foram observados nas variedades RB855536 e IACSP95-5000, e assim estas variedades foram classificadas como suscetíveis à restrição hídrica severa (Figura 2B).

Em síntese, os três métodos de análise multivariada utilizados neste estudo (método do ranqueamento, análise de agrupamento hierárquico e análise de componente principal) agruparam a variedade de cana-de-açúcar RB855035 como tolerante à restrição hídrica moderada (Tabela 5, Figuras 2A e 3A), ao passo que a variedade RB965902 foi classificada como tolerante à restrição hídrica moderada pelos métodos do ranqueamento (Tabela 5) e análise de componente principal (Figura 2A), e as variedades RB855453 e SP801842 foram classificadas como tolerantes à restrição hídrica moderada pela análise de agrupamento hierárquico (Figura 1A).

Em condições de restrição hídrica severa, os três métodos de análise multivariada agruparam a variedade RB855035 como tolerante à restrição hídrica severa (Tabela 5, Figuras 2B e 3B), e a variedade RB855453 foi classificada como tolerante à restrição hídrica severa pelos métodos da análise de agrupamento hierárquico (Figura 1B) e análise de componente principal (Figura 2B), e a variedade RB966928 foi

classificada como tolerante à restrição hídrica severa pela análise de componente principal (Figura 2A).

Em condições de restrição hídrica moderada, os três métodos de análise multivariada agruparam a variedade de cana-de-açúcar RB855536 como sensível à restrição hídrica moderada (Tabela 5, Figuras 2A e 3A), enquanto a variedade IACSP95-5000 também foi classificada como sensível à restrição hídrica moderada pelo método do ranqueamento (Tabela 5).

Em condições de deficiência hídrica severa, os três métodos de análise multivariada agruparam as variedades RB855536 e IACSP95-5000 como suscetíveis à restrição hídrica severa (Tabela 5, Figuras 2B e 3B). Portanto, estas variedades não devem ser recomendadas para o cultivo em regiões com alta probabilidade de ocorrência de restrição hídrica durante o cultivo sob condições de sequeiro.

4 CONCLUSÕES

As variedades de cana-de-açúcar RB855035, RB855453, RB 965902 possuem maior tolerância à seca, e são as variedades mais indicadas para serem cultivadas em regiões com ocorrência de deficiência hídrica.

As variedades de cana-de-açúcar RB855536 e IACSP95-5000 possuem maior susceptibilidade à restrição hídrica moderada e severa, e não devem ser recomendadas para o cultivo em condições de sequeiro em regiões com alta probabilidade de ocorrência de deficiência hídrica.

Os índices de tolerância MP, DI, STI, GMP, YI, k_1 STI, k_2 STI e HM foram os mais indicados para identificar as variedades de cana-de-açúcar com maior tolerância à seca e com alto potencial de produção de matéria seca da parte aérea em condições de deficiência hídrica moderada e severa.

REFERÊNCIAS

- AKÇURA, M.; PARTIGO, F.; KAYA, Y. Evaluating of drought stress tolerance based on selection indices in Turkish bread wheat landraces. **The Journal of Animal and Plant Sciences**, v. 21, n. 8, p. 700-709, 2011.
- BENANNI S.; NSARELLAH N.; JLIBENE M.; TADESSE W.; BIROUK A.; OUABBOU H. Efficiency of drought tolerance indices under different stress severities for bread wheat selection. **Australian Journal of Crops Science**, v. 11, n. 04, p. 395-405, 2017. DOI: <https://doi.org/10.21475/ajcs.17.11.04.pne272>
- BLUM, A. **Plant breeding for stress environments**. CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 1988.
- BOUSLAMA, M.; SCHAPAUGH, W. T. Stress tolerance in soybean. Part 1: evaluation of three screening techniques for heat and drought tolerance. **Crop Science**, v. 24, p. 933-937, 1984. DOI: <https://doi.org/10.2135/cropsci1984.0011183X002400050026x>
- CABRAL, R. C.; MAEKAWA, S. C. E.; ZUFFO, A. M.; STEINER, F. Selection indices to identify drought-tolerant soybean cultivars. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 7, p. 1-25, 2020. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i7.3812>
- CASAROLI, D.; LIER, Q. J.; Critérios para determinação da capacidade de vaso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 59-66, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000100007>
- CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar: safra 2023/2024, v. 10, n. 3. Brasília: Conab, 2024. 58p.

- CRUZ, C. D.; CARNEIRO, P. C. S. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. Viçosa: UFV, 2003. 585p.
- DADBAKHSI, A.; YAZDANSEPAS, A.; AHMADIZADEH, M. Study drought stress on yield of wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes by drought tolerance indices. **Advances in Environmental Biology**, v. 5, n. 7, p. 1804-1810, 2011.
- DRIKVAND, R.; DOOSTY.; HOSSEINPOUR, T. Response of rainfed wheat genotypes to drought stress using drought tolerance indices. **Journal of Agricultural Science**, v. 4, n. 7, p. 123-131, 2012. DOI: <https://doi.org/10.5539/jas.v4n7p126>
- EL-RAWY, M.A.; HASSAN, M. I. Effectiveness of drought tolerance indices to identify tolerant genotypes in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). **Journal of Crop Science and Biotechnology**, v. 17, n. 4, p. 255-266, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12892-014-0080-7>
- ERDEMC, I. Evaluation of drought tolerance selection indices using grain yield in chickpea (*Cicer arietinum* L.). **Notulae Scientia Biologicae**, v. 10, n. 3, p. 439-446, 2018. DOI: <https://doi.org/10.23910/IJBSM/2016.7.6.1696a>
- FARSHADFEAR, E.; POURSHAHBIDI, M. M.; ABOOGHADAREH, A. R. P. Repeatability of drought tolerance indices in bread wheat genotypes. **International Journal of Agriculture and Crop Sciences**, v. 4, n. 13, p. 891-903, 2012.
- FARSHADFEAR, E.; SUTKA, J. Multivariate analysis of drought tolerance in wheat substitution lines. **Cereal Research Communications**, v. 31, n. 1, p. 33-40, 2002.
- FERNANDEZ, G. C. J. **Effective selection criteria for assessing plant stress tolerance**. In: Proceedings of the International Symposium on Adaptation of Vegetables and other Food Crops in Temperature and Water Stress, Taiwan 13-16 August 1992, 257-270 p.
- FERREIRA, D. F. Sisvar: a Guide for its Bootstrap procedures in multiple comparisons. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 38, n. 2, p. 109-112, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-70542014000200001>
- 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. **Frontiers in Plant Science**. v. 8, e1077, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01077>
- GAVUZZI, P.; RIZZA, F.; PALUMBO, M.; CAMPALINE, R. G.; RICCIARDI, G. L.; BORGHI, B. Evaluation of field and laboratory predictors of drought and heat tolerance in winter cereals. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 77, p. 523-531, 1997. DOI: <https://doi.org/10.4141/P96-130>
- GHOLINEZHAD, E.; DARVISHZADEH, R.; BERNOUSI, I. Evaluation of drought tolerance indices for selection of confectionery sunflower (*Helianthus annuus* L.) landraces under various environmental conditions. **Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca**, v. 42, n. 3, p. 187-201, 2014.
- IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2023: Synthesis Report**. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland, 184p. DOI: <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>.

- JAFARI, A.; PAKNEJAD, F.; JAMI AL-AHMADI, M. Evaluation of selection indices for drought tolerance of corn (*Zea mays* L.) hybrids. **International Journal of Plant Production**, v. 3, n. 4, p. 33-38, 2009.
- MENEZES, C. B.; TICONA-BENAVENTE, C. A.; TARDIN, F. D.; CARDOSO, M. J.; BASTOS, E. A.; NOGUEIRA, D. W.; PORTUGAL, A. F.; SANTOS, C. V.; SCHAFFERT, R. E. Selection indices to identify drought-tolerant grain sorghum cultivars. **Genetics and Molecular Research**, v. 13, n. 4, p. 9817-11451, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.4238/2014.November.27.9>
- MOHAMMADI, R.; ARMION, M.; KAHRIZI, D.; AMRI, A. Efficiency of screening techniques for evaluating durum wheat genotypes under mild drought conditions. **International Journal of Plant Production**, v. 4, p. 11-24, 2010. DOI: <http://doi.org/10.22069/IJPP.2012.677>
- MOOSAVI, S. S.; SAMADI, B. Y.; NAGHAVI, M. R.; ZALI, A. A.; DASHTI, H. POURSHAHBAZI, A. Introduction of new indices to identify relative drought tolerance and resistance in wheat genotypes. **Desert**, v. 12, p. 165-178, 2008.
- NAGHAVI, M. R.; POUR-ABOUGHADAREH, A.; KHALILI, M. Evaluation of drought tolerance indices for screening some of corn (*Zea mays* L.) cultivars under environmental conditions. **Notulae Scientia Biologicae**, v. 5, n. 3, p. 388-393, 2013. DOI: <http://doi.org/10.15835/nsb.5.3.9049>
- NOVAIS, R. F.; NEVES, J. C. L.; BARROS, N. F. Ensaio em ambiente controlado. In: OLIVEIRA, A. J.; GARRIDO, W. E.; ARAÚJO, J. D.; LOURENÇO, S., eds. **Métodos de pesquisa em fertilidade do solo**. Brasília, Embrapa-SEA, 1991. p. 189-254.
- PINCELLI, R. P.; SILVA, M. A. Alterações morfológicas foliares em cultivares de cana-de-açúcar em resposta à deficiência hídrica. **Bioscience Journal**, v. 28, n. 4, p. 546-556, 2012.
- ROSIELLE, A. A.; HAMBLIN, J. Theoretical aspects of selection for yield in stress and non-stress environments. **Crop Science**, v. 21, p. 943-946, 1981. DOI: <https://doi.org/10.2135/cropsci1981.0011183X002100060033x>
- SÁNCHEZ-REINOSO, A. D.; LIGARRETO-MORENO, G. A.; RESTREPO-DÍAZ, H. Evaluation of drought indices to identify tolerant genotypes in common bean bush (*Phaseolus vulgaris* L.). **Journal of Integrative Agriculture**, v. 19, n. 1, p. 99-107, 2020. DOI: [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(19\)62620-1](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(19)62620-1)
- SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAUJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5ª Ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018.
- 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, n. 6, p. 620-627, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-90162008000600008>
- SILVA, M. A.; ARANTES, M. T.; RHEIN, A. F. L.; PINCELLI, R. P.; SANTOS, C. M.; MOURA, P. C. S. Características morfofisiológicas e produtividade de cana-de-açúcar variam de acordo com a cultivar e o regime hídrico. **Irriga**, v. 1, n. 1, p. 160-177, 2015.
- SILVA, M. A.; JIFON, J. L.; DA SILVA, J. A. G.; SHARMA, V. Use of physiological parameters as fast tools to screen for drought tolerance in sugarcane. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 19, n. 3, p. 193-201, 2007.

SILVA, M. A.; JIFON, J. L.; SANTOS, C. M.; JADOSKI, C. J.; SILVA, J. A. G. Photosynthetic capacity and water use efficiency in sugarcane genotypes subject to water deficit during early growth phase. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 56, n. 5, p. 735-748, 2013.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. (Eds.). **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2004.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3ª ed. Brasília, DF: Embrapa Solos, 2017. 573p.

VIEIRA, E. A.; SILVA, M. G.; MORO, C. F.; LAURA, V. A. Physiological and biochemical changes attenuate the effects of drought on the Cerrado species *Vatairea macrocarpa* (Benth.) Ducke. **Plant Physiology Biochemistry**, v. 115, n. 5, p. 472-483, 2017.

VIEIRA, G. H. S.; MANTOVANI, E. C.; SEDIYAMA, G. C.; DELAZARI, F. T. Indicadores morfofisiológicos do estresse hídrico para a cultura da cana-de-açúcar em função de lâminas de irrigação. **Bioscience Journal**, v. 30, n. 1, p. 65-75, 2014.

ZUFFO, A. M.; STEINER, F.; AGUILERA, J. G.; RATKE, R. F.; BARROZO, L. M.; MEZZOMO, R.; SANTOS, A. S.; GONZALES, H. H. S.; CUBILLAS, P. A.; ANCCA, S. M. Selected indices to identify water-stress-tolerant tropical forage grasses. **Plants**, v. 11, e2444, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants11182444>

ZUFFO, A. M.; STEINER, F.; SOUSA, T. D. O.; AGUILERA, J. G.; TEODORO, P. E.; ALCÂNTARA-NETO, F.; RATKE, R. F. How does water and salt stress affect the germination and initial growth of Brazilian soya bean cultivars? **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 206, p. 837–850, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1111/jac.12434>.