



Concentração de prolina em cana-de-açúcar associado a tolerância ao estresse hídrico

Janaina de Miranda SILVÉRIO ¹, Tonny José Araújo da SILVA ^{1,2},
Edna Maria BONFIM-SILVA ^{1,2}, Sérgio Plens ANDRADE ^{*1,2}, Thiago Franco DUARTE ²

¹ Programa de Pós-Graduação em Agricultura Tropical, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, MT, Brasil.

² Universidade Federal de Rondonópolis, Rondonópolis, MT, Brasil.

*E-mail: splensandrade@gmail.com

Submetido em: 21/03/2023; Aceito em: 15/08/2024; Publicado em: 20/08/2024.

RESUMO: Os parâmetros biométricos, bioquímicos e fisiológicos da cana-de-açúcar podem fornecer informações que ajudarão na tomada de decisões sobre a variedade a ser cultivada em regiões com histórico de estiagem. Objetivou-se neste trabalho identificar se os parâmetros de desenvolvimento junto a concentração de prolina na planta de cana-de-açúcar podem ser utilizados na seleção de variedades tolerantes ao estresse hídrico. O delineamento utilizado foi o de blocos casualizados em esquema fatorial 7x5, sendo sete variedades de cana-de-açúcar (RB867515, RB92579, RB855536, RB72454, RB073036, RB073028 e RB073040) por cinco tensões hídricas no solo (12, 24, 36, 48 e 60 kPa), com três repetições por tratamento. Foram analisadas a altura de colmos, a massa fresca de colmos, a concentração de prolina na planta e a condutância estomática. As variedades RB073040, RB867515 e RB92579 obtiveram as maiores concentrações de prolina em condição de menor disponibilidade de água no solo, apresentando também maiores alturas de colmos na menor tensão hídrica, sendo consideradas como tolerantes ao déficit hídrico moderado. A variedade RB073036 obteve a maior concentração de prolina e apresentou também a menor altura de colmo em menor tensão hídrica, já as variedades RB72454 e RB855536 não alteraram as suas concentrações de prolina em condição de estresse hídrico.

Palavras-chave: *Saccharum officinarum* L.; bioquímica; umidade do solo; seca.

Proline concentration in sugarcane associated with tolerance to hydric stress

ABSTRACT: The biometric, biochemical, and physiological parameters of sugarcane can provide information that will help make decisions about the variety of sugarcane grown in regions with a history of drought. This study aimed to identify whether the sugarcane plant's development parameters and proline concentration can be used to select varieties tolerant to water stress. The randomized block design was used in a 7x5 factorial scheme, with seven sugarcane varieties (RB867515, RB92579, RB855536, RB72454, RB073036, RB073028 and RB073040) and five soil water stresses (12, 24, 36, 48 and 60 kPa), with three replicates per treatment. Cane height, cane fresh mass, proline concentration in the plant and stomatal conductance were analyzed. The varieties RB073040, RB867515 and RB92579 obtained the highest proline concentrations under lower soil water availability, also presenting greater heights of canes in the lower water stress, being considered tolerant to moderate water deficit. The variety RB073036 obtained the highest proline concentration and had the lowest stem height at lower water stress. In contrast, varieties RB72454 and RB855536 did not change their proline concentrations under water stress conditions.

Keywords: *Saccharum officinarum* L.; biochemistry; soil moisture; drought.

1. INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar é uma importante fonte de alimento e bioenergia, sendo um componente significativo da economia de muitos países nas regiões tropicais e subtropicais (RABELO et al., 2020). O cultivo da cana-de-açúcar vem aumentando em novas fronteiras agrícolas no Brasil e devido as variações edafoclimáticas, diferenças na produtividade vêm sendo observadas.

Deste modo, observa-se que se trata de uma cultura de expressiva importância econômica e de acordo com Hammer et al., 2019, necessita de ferramentas que possam aumentar sua produtividade, sendo que essa produtividade depende de combinações de diferentes fatores, a saber: climáticos, edáficos, agronômicos e manejo.

Segundo Silva et al. (2022), o uso de modelo agrometeorológico pode ser uma alternativa na predição da produtividade estimada em relação à produtividade real da cana-de-açúcar, principalmente para regiões semiáridas. Na região Nordeste por exemplo, devido a cultura da cana-de-açúcar não apresentar alta produtividade, a busca pela utilização de material genético adaptado às condições climáticas e adubação é fator primordial para incremento na produção (FERREIRA et al., 2020).

Apesar da cultura da cana-de-açúcar apresentar relativa tolerância à seca, mesmo assim necessita de grandes quantidades de água dependendo do estádio fenológico (INMAN-BAMBER, 2004; INMAN-BAMBER; SMITH, 2005).

Com o constante crescimento da população mundial e a crescente escassez de água a nível global, a concessão e o desenvolvimento de métodos eficientes de avaliação do stress hídrico nas culturas tornam-se um pré-requisito importante para a realização de uma programação correta da rega de precisão, de modo a evitar o desperdício de água e promover o aumento da produtividade (ZHOU et al., 2021).

O déficit hídrico é um dos fatores abióticos mais limitantes nas culturas, pois mesmo com as alterações morfofisiológicas para evitar os efeitos negativos da baixa disponibilidade hídrica, as plantas ainda apresentam decréscimos significativos em seu rendimento (MACHADO et al., 2009; BASNAYAKE et al., 2012). Os parâmetros biométricos, bioquímicos e fisiológicos podem fornecer informações que vão auxiliar a tomada de decisão sobre a variedade a ser cultivada em regiões que apresentam histórico de períodos de estiagem.

O decréscimo de água no solo diminui o potencial de água na folha e sua condutância estomática, promovendo o fechamento dos estômatos (YORDANOV et al., 2000). Esse fechamento bloqueia o influxo de CO₂ para as folhas, diminuindo o acúmulo de fotossimilados e, por consequência, reduz a produtividade da planta (OBER; LUTERBACHER, 2002). Já Silva et al. (2013) afirmam que a variação na altura da planta é um indicativo de tolerância ou susceptibilidade da cana-de-açúcar à deficiência hídrica, como também o aumento da prolina na planta em diminuição da disponibilidade de água no solo.

Devido à importância da cultura da cana-de-açúcar, o entendimento dos mecanismos de tolerância aos estresses contribui de maneira significativa para a escolha do melhor manejo a se adotar, desta forma, objetivou-se nesse estudo avaliar os parâmetros biométricos, fisiológicos e a concentração de prolina em plantas de cana-de-açúcar para identificar as variedades tolerantes ao déficit hídrico para o cultivo no cerrado brasileiro e se é possível utilizar o nível de prolina na planta como indicador de variedade de cana-de-açúcar resistente ao estresse hídrico.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Localização e caracterização da área experimental

O experimento foi conduzido em Cuiabá, Mato Grosso, Brasil (15°36'41"S e 56°03'53"W, altitude de 165 m) de junho a setembro de 2015 em estufa agrícola. O clima local é classificado, segundo Koppen-Geiger, como Aw (tropical com inverno seco), apresentando duas estações bem definidas, seca entre maio a setembro e chuvosa entre outubro a abril. Temperaturas de máxima, média e mínima de 41,9, 27,2 e 15,8°C, respectivamente e pluviosidade média anual de 1337 mm.

A estufa agrícola utilizada no experimento era do tipo arco, com 3,5 m de pé-direito, 6,4 m de largura, 20 m de comprimento, cobertura e laterais fechadas com filme plástico difusor transparente (75% de transparência) e sistema de resfriamento evaporativo Pad&Fan que foi programado para manter a temperatura média de 29°C e umidade relativa do ar de 65% durante o período de condução do experimento.

2.2. Tipo de solo

O solo utilizado no experimento foi classificado como Latossolo Vermelho distrófico (LVd) de textura franco arenosa (SANTOS et al., 2013). A amostra de solo foi retirada

da camada de 0 a 20 cm de profundidade e a análise química e física deste solo apresentou os seguintes resultados: pH (CaCl₂) = 4,0; matéria orgânica = 27,1 g dm⁻³; P (resina) = 1,4 mg dm⁻³; K = 23 mg dm⁻³; Ca = 0,4 cmol_c dm⁻³; Mg = 0,2 cmol_c dm⁻³; H = 5,4 cmol_c dm⁻³; Al = 0,8 cmol_c dm⁻³; soma de bases (SB), 0,7 cmol_c dm⁻³; CTC = 6,8 cmol_c dm⁻³; saturação por bases (V%) = 10,3; areia = 423 g kg⁻¹; silte = 133 g kg⁻¹ e argila 444 g kg⁻¹.

De acordo com a caracterização química do solo, foi realizada a calagem com calcário dolomítico (PRNT= 80,3%) elevando a saturação por bases para 60%, para isso, foi incorporado 0,021 kg de calcário ao solo presente em cada vaso. Após a incorporação do calcário, aguardou-se pelo período de 30 dias para que ocorresse as reações químicas do calcário no solo. Para a adubação de base, foram aplicadas a dose correspondente a 30 kg ha⁻¹ de N na forma de ureia, 200 kg ha⁻¹ de K₂O na forma de cloreto de potássio e 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅ na forma de superfosfato simples (RAIJ et al., 1996).

2.3. Variedades de cana-de-açúcar e tensões hídricas

As gemas dos colmos de cada material selecionado foram cortadas em mini toletes de aproximadamente 3 cm, acondicionados em caixas plásticas e cobertos com substrato na proporção 3:1:1, sendo torta de filtro, solo e substrato comercial Plantmax, respectivamente. A umidade desta mistura de substratos nas caixas foi mantida em capacidade de campo (CC) para garantir o processo de pré-brotação. Após o período de 20 dias, as plantas foram individualizadas em tubetes para formação das mudas de cana-de-açúcar (LANDELL et al., 2012). Aos 10 dias após a permanência nos tubetes, as mudas já formadas foram transplantadas para os vasos. Foram utilizados vasos de polipropileno com capacidade de 10 dm³, preenchidos com solo devidamente corrigido e adubado, mantido na CC até 26 dias após o transplantio (DAT), para assegurar o estabelecimento e o desenvolvimento das plantas.

Devido ao fato de que em estufa agrícola o espaço é geralmente limitado, e que as condições podem variar significativamente em pequenas distâncias. O delineamento estatístico adotado foi em blocos casualizados, pois este delineamento é particularmente útil em estufas por permitir que o pesquisador controle e ajuste as pequenas variações que eventualmente ocorrem no interior da estufa, otimizando a eficiência do uso do espaço e dos recursos.

Além do delineamento em blocos casualizados, foi adotado o esquema fatorial 7x5, sendo eles sete variedades de cana-de-açúcar (RB867515, RB92579, RB855536, RB72454, RB073036, RB073028 e RB073040) e cinco tensões hídricas no solo (12, 24, 36, 48 e 60 kPa) com três repetições por tratamento, que totalizou 105 unidades experimentais. Todas as unidades experimentais foram utilizadas como amostras neste estudo, totalizando 105 amostras avaliadas. As tensões hídricas foram mantidas constantes para cada tratamento durante todo o experimento e cada unidade experimental foi representada por um vaso contendo uma planta de cana-de-açúcar.

A curva característica de retenção de água no solo foi determinada em laboratório utilizando o extrator de Richard (Soil Moisture Equipment, Santa Barbara, Califórnia) e o software SWRC (Soil Water Retention Curve) (DOURADO NETO et al., 2000). Os dados obtidos foram ajustados pelo modelo proposto por Van Genuchten (1980). Através da curva de retenção de água no solo, identificou-se que a

capacidade de campo que correspondeu a 10 kPa e desta forma, foi possível determinar as tensões hídricas dos tratamentos. Foi considerada como ausente de déficit hídrico a tensão de 12 kPa (próximo de 80% da Capacidade de Campo), déficit hídrico moderado tensões entre 24 a 36 kPa e déficit hídrico severo as tensões entre 48 a 60 kPa.

O sensor capacitivo modelo ML3 (Delta-T Devices Ltd, Cambridge, United Kingdom) foi utilizado para estabelecer as umidades equivalentes aos tratamentos das tensões. Para isso, foi determinada a curva de correlação (calibração) entre o sensor ML3 e tensiômetro digital de punção (Sondaterra LTDA, Piracicaba-SP, Brasil). Foram correlacionadas as leituras de ambos os sensores (ML3 x tensiômetros), em que, 15, 10, 8, 7 e 6% de umidade volumétrica lidas no sensor ML3 corresponderam respectivamente as tensões de 12, 24, 36, 48 e 60 kPa indicadas nos tensiômetros.

Os tratamentos correspondentes as tensões hídricas do solo foram iniciadas aos 26 DAT e o manejo das irrigações foi realizado de acordo com a leitura da umidade volumétrica do solo por meio do sensor eletrônico portátil ML3. Para realizar aferições periódicas do sensor de capacitação durante a condução do experimento, foram instalados tensiômetros nos vasos com tratamentos mantidos nas tensões de 12, 36 e 60 kPa (Tratamentos das tensões extremas e intermediarias). Para determinar o volume de reposição de água no solo foi utilizada a seguinte formula (Equação 1):

$$VR = (\theta_{vi} - \theta_{vf}) \times 1000 \quad (01)$$

em que: VR = volume de reposição de água no solo (ml); θ_{vi} = umidade volumétrica equivalente a tensão para manter o tratamento hídrico (%); θ_{vf} = umidade volumétrica no momento de leitura da umidade do solo (%).

2.4. Avaliações biométricas, bioquímica e fisiológica

As variáveis biométricas, bioquímica e fisiológica analisadas foram:

Altura de colmos: Analisada aos 90 DAT, ou seja, 64 dias após aplicação e manutenção dos tratamentos das tensões hídricas no solo. A mensuração foi realizada com uso de trena medindo-se a planta desde sua base rente ao solo até a aurícula visível na inserção da folha +1;

Massa fresca de colmos: Determinada por meio da pesagem dos colmos de cada planta em balança de precisão. O corte das plantas ocorreu aos 90 DAT, na fase de perfilhamento da cultura, ou seja, aos 120 dias do início da brotação;

Concentrações de prolina: As concentrações foram determinadas utilizando o método da ninhidrina ácida adaptado da proposta desenvolvida por Bates et al. (1973), a partir da coleta da folha +1. As análises foram realizadas aos 90 DAT, em duplata na qual a concentração de prolina foi obtida pela equação da reta obtida a partir da curva padrão de prolina (0 a 0,150 $\mu\text{mol mL}^{-1}$) considerando um coeficiente de correlação $R^2 = 96\%$, sendo os resultados expressos em μmol de prolina por grama de massa fresca ($\mu\text{mol prolina g MF}^{-1}$);

Condutância estomática: Medida com uso de porômetro (Leaf porometer, modelo SC-1, Decagon). As leituras foram realizadas aos 60 e 90 DAT, em dois períodos: das 7:00 às 10:30 horas e das 14:00 às 15:00 horas com incidência de Sol, sem nebulosidade, nas folhas adultas e completamente expandidas e situadas na parte mediana do colmo principal.

2.5. Analise estatística

Os dados foram submetidos a análise de variância pelo teste F seguido da aplicação do teste de Tukey ($p < 0,05$). Foi realizada regressão nas variáveis de crescimento e o modelo foi escolhido com base na significância dos coeficientes de regressão, associada ao maior valor do coeficiente de determinação (R^2).

O teste F (Anova) é usado na análise de regressão para determinar se o modelo de regressão é estatisticamente significativo, ou seja, se ele explica uma quantidade significativa da variação nos dados. Ele permite testar a hipótese de que todas as variáveis preditoras no modelo de regressão não têm impacto sobre a variável dependente, fornecendo uma medida crucial para avaliar a qualidade e a eficácia do modelo. As análises estatísticas foram realizadas com uso do software SISVAR (FERREIRA, 2011).

3. RESULTADOS

3.1. Altura de colmos

Para a tensão de 60 kPa não houve diferença na altura de colmos entre as variedades. Já para a tensão de 48 kPa, a variedade RB073028 alcançou 38,33 cm em altura de colmos, apresentando diferença em relação à variedade RB855536 que apresentou 29,83 cm em altura. Para a tensão de 36 kPa permaneceu em destaque a mesma variedade apresentando diferença em relação a variedade RB073036 com 33,33 cm em altura de colmos, para o tratamento de 12 kPa houve maior número de variedades que sobressaíram em altura de colmos, sendo elas RB073040, RB867515, RB72454, RB855536 e RB073028 com 45,83, 45,50, 44,66, 42,50 e 40,66 cm, respectivamente. Ainda para a tensão de 12 kPa, a variedade RB073036 foi a que apresentou menor altura, diferindo significativamente das demais variedades, exceto da RB92579, como mostra a Figura 1.

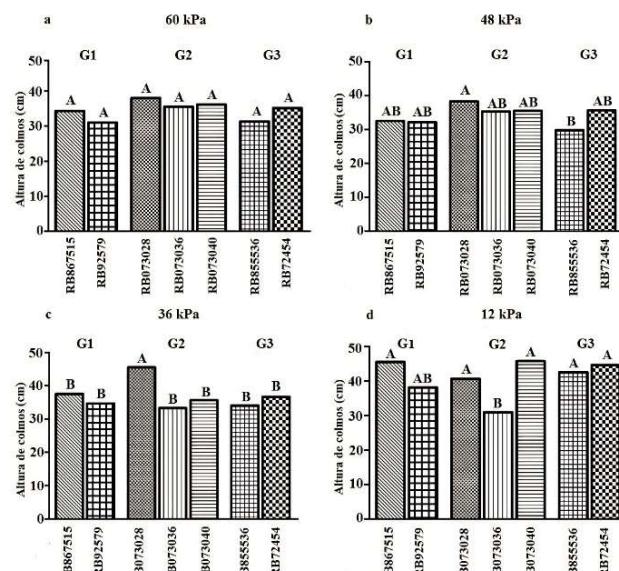


Figura 1. Altura de colmos das variedades estudadas aos 90 DAT interação com as tensões hídricas do solo: (a)- 60 kPa; (b)- 48 kPa; (c)- 36 kPa e (d)- 12 kPa. G1- Variedades tolerantes ao estresse hídrico; G2- Clones; G3- Variedades sensíveis ao estresse hídrico. CV(%) = 8,54. Colunas com letras iguais, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$) probabilidade. Fonte: Dados da pesquisa. Figure 1. Height of stalks of the studied varieties at 90 DAT interaction with soil water stresses: (a)- 60 kPa; (b)- 48 kPa; (c)- 36 kPa and (d)- 12 kPa. G1- Varieties tolerant to hydric stress; G2- Clones; G3- Varieties sensitive to hydric stress. CV(%) = 8.54.

Concentração de prolina em cana-de-açúcar associado a tolerância ao estresse hídrico

Columns with equal letters do not differ by Tukey's test ($p < 0.05$) probability. Source: Research data.

3.2. Massa fresca de colmos

Aos 90 DAT a variedade RB867515 obteve 47,28 g em massa fresca de colmos e apresentou diferença em relação as variedades RB073036, RB92579, RB073040 e RB855536 com 40,13, 35,50, 39,93 e 39,93 g, respectivamente. Por outro lado, a RB867515 não apresentou diferença para as variedades RB073028 e RB72454 com 47,84 e 47,28 g, respectivamente, conforme Figura 2.

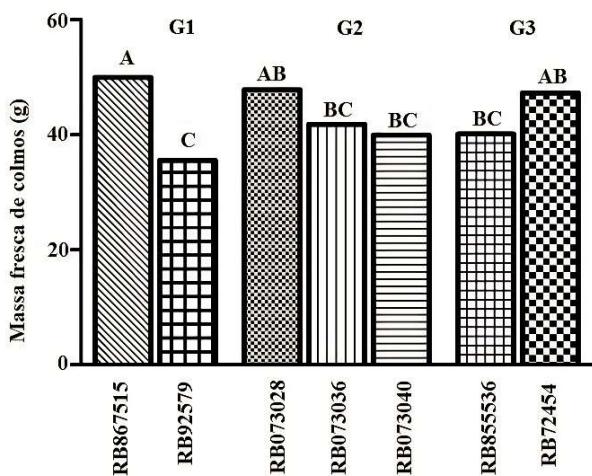


Figura 2. Massa fresca de colmos das variedades estudadas aos 90 DAT. G1- Variedades tolerantes ao estresse hídrico; G2- Clones; G3- Variedades sensíveis ao estresse hídrico. CV(%) = 5,23. Colunas com letras iguais, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0.05$) probabilidade. Fonte: Dados da pesquisa.

Figure 2. Fresh mass of stalks of the varieties studied at 90 DAT. G1- Varieties tolerant to hydric stress; G2- Clones; G3- Varieties sensitive to hydric stress. CV(%) = 5,23. Columns with equal letters do not differ by Tukey's test ($p < 0.05$) probability. Source: Research data.

3.3. Concentração de prolina

As concentrações de prolina foram diferentes entre as tensões de água no solo de 60, 48, 36, 24 e 12 kPa, correspondentes a 6, 7, 8, 10 e 15% umidade volumétrica, nas avaliações realizadas aos 90 DAT. Todos os valores observados ficaram dentro do parâmetro proposto por Bates et al. (1973), que vai de 0,1 a 36 umols de prolina g^{-1} de massa fresca (MF), como mostra a Figura 3.

3.4. Condutância estomática

A variedade RB855536 obteve 201,53 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ em condutância estomática, apresentando o maior valor e diferindo estatisticamente das variedades RB073040, RB073036, RB073028, RB72454 e RB867515 que apresentaram condutância estomática de 63,80, 53,06, 47,36, 23,50 e 22,66 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, respectivamente. A variedade RB92579 que obteve 154,73 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de condutância se diferiu estatisticamente das variedades RB72454 e RB867515 que obtiveram 23,50 e 22,66 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, respectivamente, aos 60 DAT, em condições de moderado estresse hídrico, conforme Figura 4.

Nas leituras de condutância estomática realizadas aos 90 DAT, a variedade RB92579 apresentou o maior valor sendo ele de 79,77 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ diferenciando-se estatisticamente das variedades RB073040, RB855536, RB073028, RB867515

e RB72454 que obtiveram 50,43, 45,32, 42,40, 34,79 e 32,88 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, respectivamente, em condições de severo estresse hídrico (60 kPa), como observado na Figura 5.

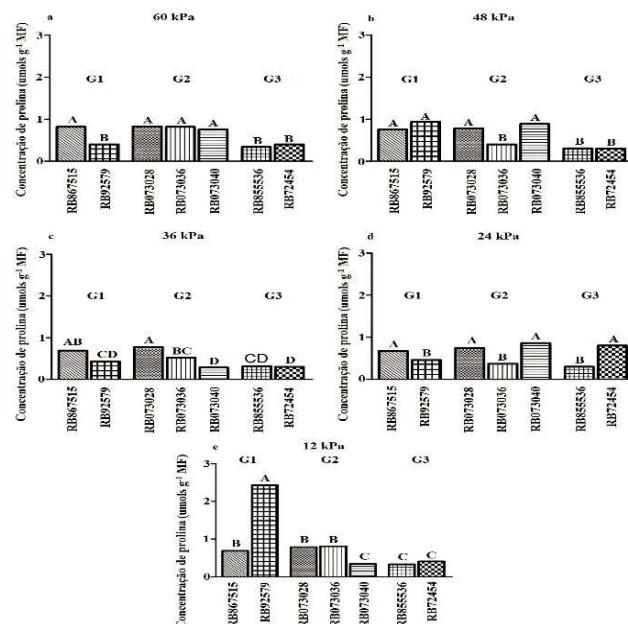


Figura 3. Concentração de prolina das variedades estudadas aos 90 DAT interação com umidade volumétrica do solo: (a)- 60 kPa; (b)- 48 kPa; (c)- 36 kPa; (d)- 24 kPa e (e)- 12 kPa. G1- Variedades tolerantes ao estresse hídrico; G2- Clones; G3- Variedades sensíveis ao estresse hídrico. CV(%) = 2,37. Colunas com letras iguais, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0.05$) probabilidade. Fonte: Dados da pesquisa.

Figure 3. Proline concentration of the studied varieties at 90 DAT interaction with soil volumetric humidity: (a)- 60 kPa; (b)- 48 kPa; (c)- 36 kPa; (d)- 24 kPa and (e)- 12 kPa. G1- Varieties tolerant to hydric stress; G2- Clones; G3- Varieties sensitive to hydric stress. CV(%) = 2.37. Columns with equal letters do not differ by Tukey's test ($p < 0.05$) probability. Source: Research data.

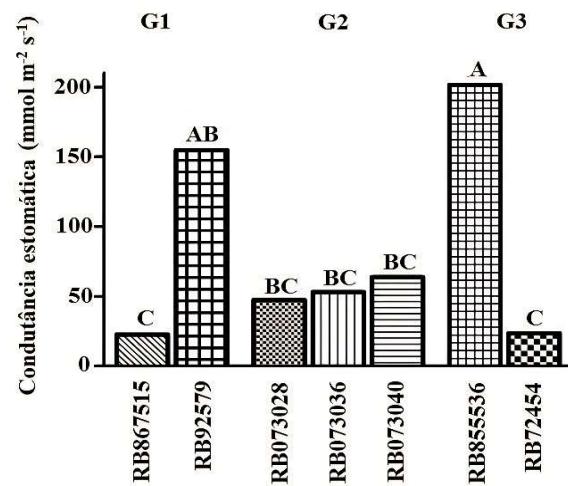


Figura 4. Condutância estomática das variedades estudadas aos 60 DAT. G1- Variedades tolerantes ao estresse hídrico; G2- Clones; G3- Variedades sensíveis ao estresse hídrico. CV(%) = 15,46. Colunas com letras iguais, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0.05$) probabilidade. Fonte: Dados da pesquisa.

Figure 4. Stomatal conductance of the varieties studied at 60 DAT. G1- Varieties tolerant to hydric stress; G2- Clones; G3- Varieties sensitive to hydric stress. CV(%) = 15.46. Columns with equal letters do not differ by Tukey's test ($p < 0.05$) probability. Source: Research data.

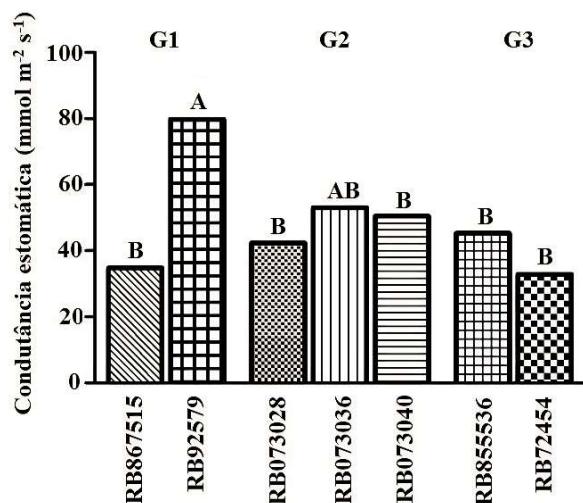


Figura 5. Condutância estomática das variedades estudadas aos 90 DAT. G1- Variedades tolerantes ao estresse hídrico; G2- Clones; G3- Variedades sensíveis ao estresse hídrico. CV(%) = 13,41. Colunas com letras iguais, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$) probabilidade. Fonte: Dados da pesquisa.

Figure 5. Stomach conductance of the varieties studied at 90 DAT. G1- Varieties tolerant to hydric stress; G2- Clones; G3- Varieties sensitive to hydric stress. CV(%) = 13.41. Columns with equal letters do not differ by Tukey's test ($p < 0.05$) probability. Source: Research data.

4. DISCUSSÃO

4.1. Altura de colmos

Os resultados observados na Figura 1 possivelmente se deu em função da maior disponibilidade de água no solo aos 90 DAT, sendo que ocorreu 64 dias de severo estresse hídrico para a tensão de 60 kPa. Ecco et al. (2014) observaram que para variedade RB867515 o incremento em altura foi de 13,70 cm em condições apenas de estresse hídrico, sendo este o maior incremento em comparação a variedade RB855536. Quintela et al. (2015) observaram que a variedade RB92579 com 60 dias sob estresse hídrico, ou seja, 22% de capacidade de pote (CP) apresentava 42,63 cm de altura, sendo esta a menor altura observada, mas não havendo diferença para outras variedades avaliadas.

A altura dessa mesma variedade quando submetida a 22% da CP por 90 dias de estresse hídrico foi de 27,63 cm, o que reduziu em 63,83% a altura em comparação com a testemunha que estava em 90% de CP e com altura de 76,98 cm. Fica evidente que quanto maior o estresse hídrico, mais lenta será a recuperação da planta, afetando o seu desenvolvimento.

Todas as variedades avaliadas em condição de severo estresse hídrico (60 kPa) apresentaram altura de colmos inferiores a 40 cm, já na condição próxima da Capacidade de Campo (12 kPa) as variedades RB867515, RB073028, RB073040, RB855536 e RB72454 apresentaram altura de colmos superiores, o que indica que estas variedades apresentam respostas significativas ao estresse hídrico e que a altura dos colmos pode ser utilizada como indicativo de estresse. Machado et al. (2009) avaliando respostas biométricas e fisiológicas ao déficit hídrico comparando diferentes clones de cana-de-açúcar em sua fase fenológica, descobriram evidências de que a altura de plantas pode ser utilizada para distingui-la entre tolerantes ou susceptíveis ao estresse hídrico. Silva et al. (2008) pesquisando componentes de produção como indicadores de tolerância à seca em cana-de-açúcar, afirmaram que a altura de colmos pode ser usada

como indicadores de estresse hídrico para diferenciar variedades quanto a tolerância ou sensibilidade do mesmo.

4.2. Massa fresca de colmos

Dentre as plantas tolerantes ao estresse hídrico, a variedade RB867515 apresentou-se mais promissora. Para o Grupo 2, a variedade RB073028 apresentou o maior desempenho, mas não deferindo estatisticamente das demais variedades deste grupo. Para as variedades sensíveis ao estresse hídrico, RB72454 foi o material com maior acúmulo de massa fresca de colmos. Esses resultados não corroboram com os encontrados por Ecco et al. (2014) que observaram reduções significativas de massa fresca e de tolete, das variedades RB855536 e RB867515 sob estresse hídrico, quando comparada com as plantas controle em condição de capacidade de campo.

Observou-se que para a umidade próxima a Capacidade de Campo ocorreu o maior desempenho da cultura, devido à adequada disponibilidade de água no solo, desta forma, obteve-se o máximo acúmulo de massa fresca de colmos que foi de 57,96 g por planta. Esses resultados corroboram com os observados por Oliveira et al. (2014) que avaliando biomassa fresca em função de diferentes variedades e lâminas de irrigação, verificaram que houve reduções das biomassas em função da menor lâmina de água aplicada.

4.3. Concentração de prolina

Na tensão de 60 kPa sobressaíram em concentração de prolina as variedades RB073028, RB073036, RB867515 e RB073040 com 0,83, 0,82, 0,82 e 0,75 umols de prolina g⁻¹ MF, respectivamente (Figura 3A). Essas variedades que se destacaram com maiores concentrações de prolina para a maior tensão hídrica do solo indicam que possuem tolerância ao déficit hídrico. Esses resultados corroboram com os observados por Gao et al. (2014) que concluíram que as concentrações elevadas de prolina podem aumentar a capacidade de extração de água do solo pela planta permitindo a maior adaptabilidade à seca.

Para o segundo tratamento de maior déficit hídrico (48 kPa), apresentaram maior concentração de prolina as variedades RB92579, RB073040, RB073028 e RB867515 com 0,94, 0,89, 0,78, 0,76 umols de prolina g⁻¹ MF respectivamente (Figura 3B). No tratamento de 36 kPa de tensão de água no solo destacou-se a RB073028 com 0,77 umols de prolína g⁻¹ MF e apresentando diferença significativa em concentração de prolina em comparação a variedade RB073040 que obteve 0,28 umols de prolina g⁻¹ MF (Figura 3C). As variedades RB073040, RB72454, RB073028 e RB867515 obtiveram 0,86, 0,80, 0,76 e 0,74 umols de prolína g⁻¹ MF, respectivamente quando submetidas a tensão de 24 kPa, apresentando as maiores concentrações de prolina (Figura 3D). Estes resultados diferiram-se da RB92579, RB073036 e RB855536.

Se destacou com maior concentração de prolina para o tratamento sem déficit hídrico (12 kPa) a variedade RB92579 com 2,43 umols de prolína g⁻¹ MF, apresentando diferença para as demais variedades avaliadas, entre elas, a variedade RB855536 que foi a que apresentou a segunda maior concentração de prolína g⁻¹ MF com 0,33 umols (Figura 3E). Estes resultados são corroborados por Santos et al. (2014) que observaram valores superiores de concentração de prolina em plantas cultivadas em condições de capacidade de campo, indicando que desta forma a variedade possivelmente terá maior eficiência em adaptar-se as condições de estresse.

A variedade RB073028 demonstrou notável destaque nas menores umidades volumétricas do solo, equivalente às maiores tensões (60, 48 e 36 kPa), no entanto a variedade RB073040 se destacou nas tensões de 60 e 48 kPa, em comparação com a variedade controle RB867515. Estes resultados comprovam que a variedade RB867515 acumulou prolina sob estresse hídrico, uma característica que o qualifica como uma variedade capaz de suportar períodos de seca, sem grandes perdas na fase inicial do seu desenvolvimento (MEDEIROS et al., 2013).

Nota-se ainda que as variedades controle RB855536 e RB72454, consideradas suscetível ao estresse hídrico, não se destacaram em concentração de prolina em nenhuma tensão hídrica. Para apresentar diferentes graus de tolerância ao déficit hídrico ocorre uma diminuição no teor relativo de água da planta e aumento do teor de prolina (ESCOBAR et al., 2017). Song et al. (2014) observaram que plantas com os maiores teores de prolina foram mais capazes de recuperar após o estresse por calor, seca e salinidade, o que pode contribuir parcialmente para menos estresse.

4.4. Condutância estomática

Os resultados observados para a condutância estomática aos 60 DAT demonstram que quando ocorre a condição de estresse hídrico, a redução da condutância estomática na planta é benéfica, pois proporciona a melhor eficiência no uso da água, mas pode reduzir a taxa de fotossíntese e consequentemente causar redução na produtividade. Esses resultados corroboram com os observados por Medeiros et al. (2013) que observaram a reduções da condutância estomática, transpiração e fotossíntese líquida em plantas sob estresse hídrico. Já Chapae et al. (2020), afirmam que algumas características de suporte ao estresse hídrico apresentado por plantas de cana-de-açúcar, entre elas a condutância estomática, contribuem com o processo de aclimatação e podem ser úteis para melhorar os genótipos de cana-de-açúcar resistentes à seca no futuro.

Observou-se que o aumento da condutância estomática para a variedade RB855536 foi maior em disponibilidade hídrica do que em escassez, como mecanismo de proteção a planta, e que foram observadas variações mais elevadas do que na RB92579, ou seja, mesmo ocorrendo reduções em condutância estomática, não sendo tão drásticas. Machado et al. (2013) observaram que a condutância estomática foi menor e houve decréscimos na assimilação de CO₂ das plantas, o que indica que houve fechamento parcial dos estômatos causando limitações à fotossíntese, devido à baixa temperatura noturna e deficiência hídrica. Gonçalves et al. (2010) observaram que as variedades RB72454 e RB92579 mostraram menores reduções percentuais nas taxas de abertura dos estômatos de 25,96 e 38,41%, respectivamente, enquanto as variedades SP79-1011 e RB98710 indicaram reduções mais elevadas na condutância estomática de 64,76 e 64,75%, respectivamente.

De acordo com os resultados observados na figura 5, a variedade RB92579 em condição de estresse hídrico conseguiu manter as trocas gasosas mesmo com reduções em condutância estomática, quando comparado com a variedade RB855536 em que as reduções foram maiores nas diferentes tensões de água no solo. Esses resultados vão ao encontro dos observados por Gonçalves et al. (2010) onde afirmam que a deficiência hídrica provoca reduções significativas na condutância estomática, transpiração foliar, fotossíntese líquida, independente da variedade, e que quanto menor a quantidade de água no solo e maior tempo de restrição, maior serão as reduções dos mesmos.

5. CONCLUSÕES

A variedade RB073028 obteve a maior concentração de prolina e altura de colmos em condição de menor disponibilidade de água no solo, sendo este material considerado como tolerante ao déficit hídrico severo.

As variedades RB073040, RB867515 e RB92579 obtiveram as maiores concentrações de prolina quando cultivadas em condição de menor disponibilidade de água no solo, apresentando também maiores alturas de colmos na menor tensão hídrica, sendo consideradas como tolerantes ao déficit hídrico moderado.

A variedade RB073036 obteve a maior concentração de prolina em condição de menor disponibilidade de água no solo e apresentou a menor altura de colmo em menor tensão hídrica, sendo tolerante ao déficit hídrico leve.

As variedades RB72454 e RB855536 não alteraram significativamente as suas concentrações de prolina em condição de menor disponibilidade de água no solo, sendo consideradas sensíveis ao estresse hídrico.

Conforme os resultados obtidos, conclui-se que a concentração de prolina na planta de cana-de-açúcar pode ser utilizado como indicador de variedade tolerante ou resistente ao estresse hídrico.

6. REFERÊNCIAS

- BASNAYAKE, J. P.; JACKSON, A.; INMAN-BAMBER, N. G.; LAKSHMANAN, P. Sugarcane for water-limited environments. Genetic variation in cane yield and sugar content in response to water stress. *Journal of Experimental Botany*, v. 63, n. 16, p. 6023-6033, 2012. <https://doi.org/10.1093/jxb/ers251>
- BATES, L. S.; WALDREN, R. P.; TEARE, I. D. Rapid determination of free proline for water-atress studies. *Plant Soil*, v. 39, p. 205-207, 1973. <https://doi.org/10.1007/BF00018060>
- CHANOKNAT CHAPAE, C.; SONGSRI, P.; GONKHAMDEE, S.; JONGRUNGKLANG, N. Understanding drought responses of sugarcane cultivars controlled under low water potential conditions. *Chilean Journal of Agricultural Research*, v. 80, n. 3, p. 370-380, 2020. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-58392020000300370>
- DOURADO NETO, D.; NIELSEN, D. R.; HOPMANS, J. W.; REICHARDT, K.; BACCHI, O. O. S. Software to model soil water retention curves (SWRC, version 2.0). *Scientia Agricola*, v. 57, n. 1, p. 191-192, 2000. <https://doi.org/10.1590/S0103-9016200000100031>
- 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, n. 1, p. 59-67, 2014. <https://doi.org/10.14295/cs.v5i1.327>
- ESCOBAR, A. O. Q.; DONJUAN, L. I.; LÓPEZ, I. M.; BÁEZ, M. A. Caracterización de genotipos élite de coffeea canephora por su tolerancia a la sequía. *Agronomía Mesoamericana*, v. 28, n. 1, p. 183-198, 2017. <http://dx.doi.org/10.15517/am.v28i1.23874>
- FERREIRA, D. F. A computer statistical analysis system. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, 2011. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-70542011000600001>
- FERREIRA, S. R.; FERREIRA, M.; OLIVEIRA, A. T.; PEREIRA, I. A.; SOUZA, M. T.; MORAES, M. D.; MORAES, E. R. Produtividade de cana-de-açúcar de

- segundo corte fertilizada com organomineral de lodo de esgoto e bioestimulante. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 1, p. 4594-4600, 2020. <https://doi.org/10.34117/bjdv6n1-329>
- FREIRE, A. L. O.; LEÃO, D. A. S.; MIRANDA, J. R. P. Acúmulo de massa seca e de nutrientes em glícídia em resposta ao estresse hídrico e a doses de fósforo. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 33, n. 1, p. 19-26, 2012. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2012v33n1p19>
- GAO, Z.; LIU, H.; WANG, H.; LI, N.; WANG, D.; SONG, Y.; MIAO, Y.; SONG, C. Generation of the genetic mutant population for the screening and characterization of the mutants in response to drought in maize. **Chinese Science Bulletin**, v. 59, n. 8, p. 766-775, 2014. <https://doi.org/10.1007/s11434-013-0031-6>
- GONÇALVES, E. R.; FERREIRA, V. M.; SILVA, J. V.; ENDRES, L.; BARBOSA, T. P.; DUARTE, W. G. Trocas gasosas e fluorescência da clorofila a em variedades de cana-de-açúcar submetidas à deficiência hídrica. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola Ambiental**, v. 14, n. 4, p. 378-386, 2010. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662010000400006>
- HAMMER, R. G.; SENTELHAS, P. C.; MARIANO, J. C. Q. Sugarcane yield prediction through data mining and crop simulation models. **Sugar Tech**, v. 22, n. 2, p. 216-225, 2019. <https://doi.org/10.1007/s12355-019-00776-z>
- INMAN-BAMBER, N. G. Sugarcane water stress criteria for irrigation and drying off. **Field Crops Research**, v. 89, n. 1, p. 107-122, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2004.01.018>
- INMAN-BAMBER, N. G.; SMITH, D. M. Water relations in sugarcane and response to water deficits. **Field Crops Research**, v. 92, n. 2-3, p. 185-202, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2005.01.023>
- LANDELL, M. G. A.; CAMPANA, M. P.; FIGUEIREDO, P. Sistema de multiplicação de cana-de-açúcar com uso de mudas pré-brotadas (MPB), oriundas de gemas individualizadas. **Campinas: IAC**. (Documentos IAC, N. 109 online), 2012. 16p. Disponível em: https://www.udop.com.br/ebiblio/pagina/arquivos/2013_sistema_multiplicacao_cana_com_mudas_pre_brotadas.pdf [Acessado em 25 de outubro de 2020].
- 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, n. 12, p. 1575-1582, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2009001200003>
- MACHADO, D. F. S. P.; LAGÔA, A. M. M. A.; RIBEIRO, R. V.; MARCHIORI, P. E. R.; MACHADO, R. S.; MACHADO, E. C. Baixa temperatura noturna e deficiência hídrica na fotossíntese de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, n. 5, p. 487-495, 2013. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2013000500004>
- 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. <http://dx.doi.org/10.1590/S2197-00252013000300006>
- OBER, E. S.; LUTERBACHER, M. C. Genotypic variation for drought tolerance in *Beta vulgaris*. **Annals of Botany**, v. 89, n. 7, p. 917-924, 2002. <https://doi.org/10.1093/aob/mcf093>
- OLIVEIRA, A. R.; BRAGA, M. B.; SANTOS, B. L. S. Produção de biomassa de cana-de-açúcar no vale do São Francisco. **Energia Agricultura**, v. 29, n. 1, p. 27-38, 2014.
- INTELÀ, M. P.; PEDROSA, E. M. R.; WILLADINO, L.; ROLIM, M. M.; SILVA, E. F. F.; DAVID, M. F. L. Intensity and duration of water deficit on the pathosystem sugarcane x *Meloidogyne incognita*. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola Ambiental**, v. 19, n. 6, p. 581-586, 2015. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n6p581-586>
- RABELO, S. C.; PAIVA, L. B.; PIN, T. C.; PINTO, L. F.; TOVAR, L. P.; NAKASU, P. Y. Chemical and energy potential of sugarcane. **Sugarcane Biorefinery, Technology and Perspectives**, p. 141-163, 2020. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814236-3.00008-1>
- RAIJ, B.; CANTARELA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. **Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. Campinas: IAC, 1986. 285p. Disponível em: http://www.etcasaosimao.com.br/_documentos/_pdf/_apoio_ao_aluno/_livros/BOLETIM_100_IAC_Comp_leto.pdf [Acessado em 25 de outubro de 2020].
- SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J. B. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3 ed. verificada e ampliada. Brasília: Embrapa, 2013. 353p.
- SANTOS, J. R.; OLIVEIRA, L. F. G. JR.; SOUSA, J. P. S.; SILVA JUNIOR, C. D.; SARMENTO, C. R. Desempenho de clones promissores de cana-de-açúcar utilizando ferramentas fisiológicas e biométricas. **Bioscience Journal**, v. 30, n. 1, p. 380-389, 2014.
- SILVA, M. A.; SANTOS, C. M.; ARANTES, M. T.; BRUNELLI, M. C.; HOLANDA, L. A. Respostas fisiológicas de variedades de cana-de-açúcar submetidas à deficiência hídrica e a reidratação. **Revista Caatinga**, v. 26, n. 3, p. 28-35, 2013.
- SILVA, M. A.; SILVA, J. A. G.; ENCISO, J.; SHARMA, V.; JIFON, J. Yield components as indicators of drought tolerance of sugarcane. **Scientia Agrícola**, v. 65, n. 6, p. 620-627, 2008. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-90162008000600008>
- SILVA, A. S.; MOURA, G. B. A.; LOPES, P. M. O.; GUIMARÃES, M. J. M.; BEZERRA, A. C.; GOMES, A. W. A. Predição da produtividade de cana-de-açúcar com base em modelo agrometeorológico no semiárido brasileiro. **Nativa**, v. 10, n. 4, p. 515-524, 2022. <https://doi.org/10.31413/nativa.v10i4.13773>
- SONG, A.; ZHU, X.; CHEN, F.; GAO, H.; JIANG, J.; CHEN, S. A Chrysanthemum Heat Shock Protein Confers Tolerance to Abiotic Stress. **International Journal Molecular Sciences**, v. 15, n. 3, p. 5063-5078, 2014. <https://doi.org/10.3390/ijms15035063>
- VAN GENUCHTEN, M. T. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, n. 5, p. 892-898, 1980. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>

ZHOU, S.; WILLIAMS, A. P.; LINTNER, B. R.; BERG, A. M.; ZHANG, Y.; KEENAN, T. F.; COOK, B. I.; HAGEMANN, S.; SENEVIRATNE, S. I.; GENTINE, P. Soil moisture-atmosphere feedbacks mitigate declining water availability in drylands, **Nature Climate Change**, n. 11, p. 3-44, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00945-z>

YORDANOV, I.; VELIKOVA, V.; TSONEV, T. Plant responses to drought, acclimation, and stress tolerance. **Photosynthetica**, v. 38, n. 2, p. 171-186, 2000. <https://doi.org/10.1023/A:1007201411474>

Agradecimentos: Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Mato Grosso (FAPEMAT) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de pesquisa e à empresa RIDESA pelo apoio que tornou possível este estudo.

Contribuição dos autores: J.M.S.: metodologia, investigação ou coleta de dados, análise estatística, redação (original); T.J.A.S.: conceitualização, metodologia, administração ou supervisão, investigação ou coleta de dados; E.M.B-S.: metodologia, análise estatística; S.P.A.: análise estatística, redação (revisão e edição); T.F.D.: metodologia, redação (revisão e edição).

Financiamento: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES – 001), através de bolsa de estudos para o primeiro e quarto autor.

Disponibilidade de dados: Os dados desta pesquisa poderão ser obtidos mediante solicitação ao autor correspondente via e-mail.

Conflito de interesses: Os autores declararam não haver conflito de interesses.