



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FITOTECNIA
DOUTORADO EM FITOTECNIA**

PATRYCIA ELEN COSTA AMORIM

**DÉFICIT HÍDRICO E SILICATO DE CÁLCIO SOBRE ASPECTOS
ECOFISIOLÓGICOS, E ESTIMATIVAS DA ÁREA FOLIAR DE GRAVIOLEIRA E
UMBU-CAJAZEIRA**

MOSSORÓ - RN

2026

PATRYCIA ELEN COSTA AMORIM

**DÉFICIT HÍDRICO E SILICATO DE CÁLCIO SOBRE ASPECTOS
ECOFISIOLÓGICOS, E ESTIMATIVAS DA ÁREA FOLIAR DE GRAVIOLEIRA E
UMBU-CAJAZEIRA**

Tese apresentada ao Doutorado em Fitotecnia
do Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia
da Universidade Federal Rural do Semi-Árido
como requisito para obtenção do título de
Doutora em Fitotecnia.

Linha de Pesquisa: Práticas
Culturais/Fruticultura e propagação de plantas

Orientador: Prof. Dr. Vander Mendonça

Coorientador: Prof. Dr. Francisco Vanies da
Silva Sá

MOSSORÓ - RN

2026

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

A524d AMORIM, PATRYCIA ELEN COSTA .
DÉFICIT HÍDRICO E SILICATO DE CÁLCIO SOBRE
ASPECTOS ECOFISIOLÓGICOS, E ESTIMATIVAS DA ÁREA
FOLIAR DE GRAVIOLEIRA E UMBU-CAJAZEIRA / PATRYCIA
ELEN COSTA AMORIM. – 2026.
118 f. : il.

Orientador: Vander Mendonça.
Coorientador: Francisco Sá.
Tese (Doutorado) – Universidade Federal Rural
do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em
Fitotecnia, 2026.

1. Annona muricata L.. 2. Spondias sp.. 3.
CaSiO?. 4. limitação hídrica. 5. área foliar. I.
Mendonça, Vander , orient. II. Sá, Francisco, co-
orient. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Biblioteca Campus Mossoró / Setor de Informação e Referência
Bibliotecária: Keina Cristina Santos Sousa e Silva
CRB: 15/120

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

PATRYCIA ELEN COSTA AMORIM

**DÉFICIT HÍDRICO E SILICATO DE CÁLCIO SOBRE ASPECTOS
ECOFISIOLÓGICOS, E ESTIMATIVAS DA ÁREA FOLIAR DE GRAVIOLEIRA E
UMBU-CAJAZEIRA**

Tese apresentada ao Doutorado em Fitotecnia
do Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia
da Universidade Federal Rural do Semi-Árido
como requisito para obtenção do título de
Doutora em Fitotecnia.

Linha de Pesquisa: Práticas Culturais/
Fruticultura e propagação de plantas

Defendida em: 16 / 01 / 2026.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente



FRANCISCO VANIES DA SILVA SA
Data: 11/04/2026 15:57:42-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Francisco Vanies da Silva Sá (UEPB)
Coorientador e Presidente

Documento assinado digitalmente



JOAO EVERTHON DA SILVA RIBEIRO
Data: 11/04/2026 10:20:35-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. João Everthon da Silva Ribeiro (UFERSA)
Membro Examinador

Documento assinado digitalmente



TAYD DAYVISON CUSTODIO PEIXOTO
Data: 11/04/2026 15:53:36-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Tayd Dayvison Custodio Peixoto (UVA)

Documento assinado digitalmente



LUDERLANDIO DE ANDRADE SILVA
Data: 11/04/2026 15:36:59-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Luderlândio de Andrade Silva (UFCG)
Membro Examinador

Documento assinado digitalmente



AGDA MALANY FORTE DE OLIVEIRA
Data: 11/04/2026 15:21:43-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dra. Agda Malany Forte de Oliveira (UEPB)
Membro Examinador (suplente)

*Aos meus pais, Cleonice e
Emidio, à minha irmã
Cristiane, minhas fortalezas na terra*
DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida, saúde, força, oportunidade e aprendizado adquirido em todos os momentos do curso.

À minha família, em especial meus pais, Cleonice e Emidio, e à minha irmã, Cristiane, por sempre acreditarem nos meus sonhos e pela paciência e compreensão.

Agradeço à Universidade Federal Rural do Semi-Árido e ao Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, pela oportunidade de cursar o doutorado.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Vander Mendonça, pela orientação durante toda a minha formação como doutora.

Agradeço ao coorientador da pesquisa Dr. Francisco Vanies da Silva Sá, pelos ensinamentos, paciência e valiosa orientação/coorientação ao longo do planejamento e da condução do experimento, sempre solícito e disponível para o esclarecimento de dúvidas. Sou igualmente grata pela escuta atenta e pelo apoio nos momentos de desabafo, que tornaram essa trajetória mais leve.

Agradeço ao colaborador da pesquisa Dr. João Everthon Ribeiro, pela coorientação, disponibilidade, auxílio e valiosas contribuições científicas ao longo do desenvolvimento da tese. Destaco, ainda, sua constante disposição em esclarecer dúvidas e oferecer apoio nos momentos difíceis do desenvolvimento da pesquisa.

Agradeço a todos os professores do programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, por proporcionarem meu crescimento profissional.

Agradeço à Banca Examinadora pela disponibilidade e contribuições realizadas a este trabalho.

Agradeço aos membros do Grupo de estudo, pesquisa e extensão em fruticultura (GEPEF) que colaboraram para a realização desta tese. Em especial, agradeço a Tiago, Gabriel, Mateus, David, João Luís, Elaine, Ramon, Lídia, Adriana, Agda, Raíres e Luilson... enfim.

Agradeço os amigos conquistados na UFERSA pelo convívio, em especial a Rodrigo, Fagner, Maria, Gabriel e Harielly, pelo companheirismo durante a realização da pesquisa e do curso, estando sempre dispostos a me ajudar e a me apoiar nos momentos de aflição.

A todos os que, direta ou indiretamente, estiveram presentes e colaboraram para conclusão da minha tese.

Muito Obrigada!

“O Senhor mesmo marchará diante de ti, e
estará contigo, e não te deixará nem te
abandonará. Nada temas, e não te
amedrontes”.

Deuteronômio 31:8

AMORIM, Patrycia Elen Costa. **Déficit hídrico e silicato de cálcio sobre aspectos ecofisiológicos, e estimativas da área foliar de gravioleira e umbu-cajazeira**. 2026. 118f. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró- RN, 2026.

RESUMO

A fruticultura brasileira desempenha papel estratégico na economia, na segurança alimentar e no desenvolvimento sustentável. Contudo, a escassez hídrica, especialmente em regiões semiáridas, compromete a sustentabilidade dos sistemas agrícolas. Nesse contexto, tornam-se essenciais estratégias de manejo eficiente dos recursos hídricos e o uso de tecnologias capazes de atenuar os efeitos do déficit hídrico, como a aplicação de silicato de cálcio. Além disso, a estimativa não destrutiva da área foliar em frutíferas é uma ferramenta fundamental para estudos de crescimento vegetal, ecofisiologia, nutrição e o manejo da irrigação. Portanto, objetivou-se avaliar os efeitos do déficit hídrico e do silicato de cálcio sobre aspectos ecofisiológicos da gravioleira (*Annona muricata* L.) e da umbu-cajazeira (*Spondias* sp.), bem como construir modelos alométricos para a estimativa da área foliar dessas espécies. A pesquisa foi estruturada em quatro capítulos. No primeiro, objetivou-se determinar equações alométricas para estimar a área foliar de gravioleira usando dimensões lineares (comprimento e largura) das folhas. Foram coletadas folhas de mudas saudáveis da cultivar Morada e avaliados modelos de regressão linear, linear sem intercepto, potência e exponencial, utilizando L, W e o produto LW. Os resultados indicaram que a área foliar pode ser estimada com elevada precisão pelo produto LW, destacando-se as equações $\hat{y} = 0,72 * LW$ (modelo linear sem intercepto) e $\hat{y} = 0,69 * LW^{1,00}$ (modelo potência). O segundo capítulo objetivou-se construir equações alométricas para estimar, de forma não destrutiva, a área foliar da umbu-cajazeira (*Spondias* sp.), considerando as dimensões dos folíolos. Os folíolos foram coletados de plantas matrizes, e submetidos aos mesmos modelos de regressão utilizados para a gravioleira. De modo semelhante, o modelo potência baseado no produto LW apresentou o melhor ajuste, sendo a equação $\hat{y} = 0,76 * LW^{0,98}$ a mais adequada para estimar a área dos folíolos de umbu-cajazeira. No terceiro capítulo, foram avaliadas as alterações ecofisiológicas e bioquímicas em mudas de gravioleira submetidas a diferentes frequências de irrigação e adubação com silicato de cálcio. O experimento foi conduzido em delineamento em blocos casualizados, em esquema fatorial 4×2 , com quatro turnos de rega (irrigação diária, a cada dois, quatro e seis dias) e ausência ou presença de silicato de cálcio ($CaSiO_3$), aplicado via solo, na dose de $3,5 \text{ g planta}^{-1}$. As mudas irrigadas a cada quatro dias associadas à aplicação de $CaSiO_3$ apresentaram melhorias nas trocas gasosas, como condutância estomática, transpiração e taxa de assimilação de CO_2 . Além disso, o $CaSiO_3$

regulou a síntese de prolina, aumentou a biomassa foliar e elevou os teores de silício e cálcio nos tecidos, promovendo maior tolerância e menor sensibilidade à seca. No quarto capítulo, objetivou-se avaliar o crescimento e as trocas gasosas foliares de mudas de umbu-cajazeira sob diferentes frequências de irrigação. O experimento foi conduzido em delineamento em blocos casualizados, contendo quatro tratamentos (irrigação diária, a cada dois, quatro e seis dias) e seis repetições. O déficit hídrico não afetou as variáveis morfológicas e trocas gasosas foliares; entretanto, frequências de irrigação diária e a cada seis dias reduziram a área foliar e a produção de biomassa. Assim, em condições de limitação hídrica, frequências de irrigação entre dois e seis dias mostram-se alternativas viáveis para o manejo da cultura.

Palavras-chave: *Annona muricata* L., *Spondias* sp., CaSiO_3 , limitação hídrica, área foliar.

AMORIM, Patrycia Elen Costa. **Water deficit and calcium silicate on ecophysiological aspects, and estimates of leaf area of soursop and umbu-cajazeira.** 2026. 118p. Thesis (Doctorate in Phytotechnics) - Federal Rural University of the Semi-Arid, Mossoró-RN, 2026.

ABSTRACT

Brazilian fruit farming plays a strategic role in the economy, food security, and sustainable development. However, water scarcity, especially in semi-arid regions, compromises the sustainability of agricultural systems. Given this scenario, efficient water resource management strategies and the use of technologies capable of mitigating the effects of water deficit, such as the application of calcium silicate, become essential. In parallel, non-destructive estimation of leaf area in fruit trees is a fundamental tool for studies of plant growth, ecophysiology, nutrition, and irrigation management. The research was structured in four chapters. The first aimed to determine allometric equations to estimate the leaf area of soursop (*Annona muricata* L.) from linear dimensions of the leaves, length (L) and width (W). Leaves were collected from healthy seedlings of the Morada cultivar and linear regression, linear without intercept, power, and exponential models were tested, using L, W, and the product LW. The results indicated that leaf area can be estimated with high precision using the LW product, highlighting the equations $\hat{y} = 0.72 \cdot LW$ (linear model without intercept) and $\hat{y} = 0.69 \cdot LW^{0.90}$ (power model). The second chapter aimed to construct allometric equations to estimate, non-destructively, the leaf area of the umbu-cajazeira (*Spondias* sp.), considering the dimensions of the leaflets. Leaflets were collected from mother plants, and the same regression models were evaluated. As observed for the soursop tree, the power model based on the LW product showed the best fit, with the equation $0.76 \cdot LW^{0.98}$ being the most suitable for estimating the area of umbu-cajazeira leaflets. The third chapter evaluated the ecophysiological and biochemical changes in soursop seedlings subjected to different irrigation management and fertilization with calcium silicate. The experiment was conducted in a randomized block design, in a 4×2 factorial scheme, with four irrigation schedules (daily irrigation, every two, four, and six days) and the absence or presence of calcium silicate (CaSiO_3), applied via soil, at a dose of 3.5 g plant^{-1} . Seedlings irrigated every four days associated with the application of calcium silicate showed significant improvements in gas exchange, such as stomatal conductance, transpiration, and CO_2 assimilation rate. In addition, CaSiO_3 regulated proline synthesis, increased leaf biomass, and raised silicon and calcium levels in tissues, promoting greater tolerance and less sensitivity to drought. The fourth chapter evaluated the growth and physiology of umbu-cajazeira seedlings under different irrigation frequencies. Water deficit did not affect several morphophysiological characteristics; however, extreme irrigation frequencies reduced leaf area and biomass production. Thus, under

water-limited conditions, irrigation frequencies between two and six days appear to be viable alternatives for crop management.

Keywords: *Annona muricata* L., *Spondias* sp., CaSiO_3 , water limitation, leaf area.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I

Figura 1. Folhas de gravioleira utilizadas para estimar a área foliar.....	29
Figura 2. Análise descritiva do comprimento (A), largura (B), produto entre comprimento e largura (C), produto entre o comprimento e comprimento (D), produto entre largura e largura (E) e área foliar (F) de folhas de gravioleira. As extremidades superior e inferior de cada caixa representam os quartis 1/4 e 3/4; a linha horizontal de cada caixa se refere à mediana. A distribuição dos pontos superior e inferior para caixas representa os valores extremos mínimos e máximos dos dados. Os símbolos (·) dentro das caixas representam as médias. Os números na lateral da distribuição se referem aos coeficientes de assimetria (<i>a</i>), curtose (<i>k</i>) e variação (CV%)......	32
Figura 3. Relação entre o número de folhas de gravioleira e a porcentagem de área foliar classificada em classes de tamanho.	33
Figura 4. Histograma de frequência (na diagonal) e dispersão de dados entre comprimento (L), largura (W), produto de comprimento e largura (LW), produto do comprimento entre comprimento (L^2), produto da largura e largura (W^2) e área foliar (AF) gravioleira.....	34
Figura 5. Relação entre a área foliar real e o produto entre comprimento e largura das folhas de gravioleira, a partir dos modelos linear sem intercepto e potência. A análise de dispersão dos resíduos é apresentada na inserção.	36
Figura 6. Relação da área foliar observada e área foliar estimada utilizando os modelos lineares sem intercepto e potência em função do produto da largura e comprimento das folhas da gravioleira (A e B). Áreas foliares comparadas pelo teste t de Student ($p \leq 0,01$)(C). ^{ns} – não significativo pelo teste t Student ($p \leq 0,01$)......	37

CAPÍTULO II

Figura 1. Folíolo de umbu-cajazeira (<i>Spondias</i> sp.) utilizado para estimativa da área do folíolo.	47
Figura 2. Histograma de frequência (diagonal) e dispersão de dados entre comprimento (L), largura (W), produto de comprimento e largura (LW), produto do comprimento entre comprimento (LL), produto da largura e largura (WW) e área do folíolo (AF) de umbu-cajazeira (<i>Spondias</i> sp.).	51

Figura 3. Relação entre a área real dos folíolos e o produto entre comprimento e largura dos folíolos de umbu-cajazeira (<i>Spondias</i> sp.), com base no modelo de potência (A). A análise de dispersão dos resíduos é apresentada no encarte (B).....	53
Figura 4. Relação entre área foliar observada e área foliar estimada utilizando o modelo potência em função do LW (A) e comparação entre área foliar observada e área foliar estimada de folíolos de umbu-cajazeira (<i>Spondias</i> sp.) usando o teste t de Student ($p < 0,01$) (B).....	54

CAPÍTULO III

Figura 1. Mapa de localização da área experimental e disposição das mudas de gravioleira na casa de vegetação.....	64
Figura 2. Temperatura e umidade relativa do ar: máxima (máx), mínima (min) e média durante o período experimental.	65
Figura 3. Mudanças de gravioleira adubadas com silicato de cálcio sob diferentes frequências de irrigação. TR1 – irrigação diária; TR2 – irrigação a cada dois dias; TR3 – irrigação a cada quatro dias e TR4 – irrigação a cada seis dias. Ausência de CaSiO_3 e presença de CaSiO_3	74

CAPÍTULO IV

Figura 1. Mapa de localização da área experimental e disposição das mudas de umbu-cajazeira na casa de vegetação.....	101
Figura 2. Dados climatológicos sobre temperatura e umidade relativa do ar: máxima (máx), mínima (min) e média durante o período experimental (11 de dezembro de 2023 a 12 março de 2024).....	102
Figura 3. Crescimento de mudas de umbu-cajazeira sob diferentes frequências de irrigação. TR1 - irrigação diária; TR2 - irrigação a cada dois dias; TR3 - irrigação a cada quatro dias; TR4 - irrigação a cada seis dias.	108

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO I

Tabela 1. Características químicas do substrato utilizado no experimento.	28
Tabela 2. Modelos e descrição dos modelos utilizadas para estimar a área foliar de gravioleira através das dimensões lineares das folhas.	30
Tabela 3. Modelo de regressão, equações, coeficiente de determinação (R^2), coeficiente de correlação de Pearson (r), informação de Akaike (AIC), índice de concordância de Willmott (d), erro quadrático médio (RMSE) e erro percentual absoluto médio (MAPE), obtido em função de dimensões foliares de gravioleira.	35

CAPÍTULO II

Tabela 1. Modelos e descrições dos modelos utilizados para estimar a área dos folíolos da umbu-cajazeira (<i>Spondias</i> sp.) através das dimensões lineares dos folíolos.	48
Tabela 2. Análise descritiva do comprimento (L), largura (W), produto do comprimento pela largura (LW), produto do comprimento pelo comprimento (LL), produto da largura pela largura (WW) e área do folíolo (AF) de umbu-cajazeira (<i>Spondias</i> sp.).	49
Tabela 3. Modelo de regressão, equações, coeficiente de determinação (R^2), índice de concordância de Willmott (d), raiz do erro quadrático médio (RMSE) e erro absoluto médio (MAE) obtidos em função das medidas de tamanho do folíolo de umbu-cajazeira (<i>Spondias</i> sp.).	52

CAPÍTULO III

Tabela 1. Características químicas do substrato antes e ao término do experimento.	66
Tabela 2. Atributos químicos da água de abastecimento local utilizada na irrigação de mudas de gravioleira.	67
Tabela 3. Volume total de irrigação em mudas de gravioleira adubadas com silicato de cálcio, sob diferentes frequências de irrigação, aos 120 dias.	68
Tabela 4. Teste F, Tukey e t Student para as variáveis: diâmetro do caule (DC), altura (AP), número de folhas (NF), área foliar (AF) e volume de raiz (VR) em mudas de gravioleira	

adubadas com silicato de cálcio sob diferentes frequências de irrigação, aos 120 dias após transplântio.	73
Tabela 5. Teste F, Tukey e t Student para as variáveis: transpiração (E), condutância estomática (gs), taxa de assimilação de CO ₂ (A _N) em mudas de gravioleira adubadas com silicato de cálcio sob diferentes frequências de irrigação, aos 120 dias após transplântio.	74
Tabela 6. Teste F, Tukey e t Student para as variáveis: déficit de pressão de vapor (VPD), concentração interna de CO ₂ (Ci), eficiência intrínseca do uso da água (EiUa), eficiência instantânea do uso da água (EUA), eficiência instantânea de carboxilação (EiCi) e temperatura foliar (Ti) em mudas de gravioleira adubadas com silicato de cálcio sob diferentes frequências de irrigação, aos 120 dias após transplântio.	75
Tabela 7. Teste F, Tukey e t Student para as variáveis: clorofila a, b e total em mudas de gravioleira adubadas com silicato de cálcio sob diferentes frequências de irrigação, aos 120 dias após transplântio.	76
Tabela 8. Teste F, Tukey e t Student para as variáveis: fluorescência inicial (F ₀), fluorescência máxima (F _m), fluorescência variável (F _v), máxima eficiência quântica do fotossistema II (PSII) (F _v /F _m), eficiência máxima primária do fotossistema II (PSII) (F _v /F ₀), eficiência quântica basal do processo não fotoquímico do fotossistema II (PSII) (F ₀ /F _m) em mudas de gravioleira adubadas com silicato de cálcio sob diferentes frequências de irrigação, aos 120 dias após transplântio.	77
Tabela 9. Teste F, Tukey e t Student para as variáveis: massa seca das folhas (MSF), massa seca do caule (MSC), massa seca da raiz (MSR), massa seca total (MST) e relação massa seca da raiz/massa seca da parte aérea (RRPA) em mudas de gravioleira adubadas com silicato de cálcio sob diferentes frequências de irrigação, aos 120 dias após transplântio.	78
Tabela 10. Teste F, Tukey e t Student para as variáveis: índice de qualidade de Dickson (IQD) em mudas de gravioleira adubadas com silicato de cálcio sob diferentes frequências de irrigação, aos 120 dias após transplântio.	79
Tabela 11. Teste F, Tukey e t Student para as variáveis: eficiência de tolerância à seca (DTE) e índice de sensibilidade à seca (DSI) em mudas de gravioleira adubadas com silicato de cálcio sob diferentes frequências de irrigação, aos 120 dias após transplântio.	80
Tabela 12. Teste F, Tukey e t Student para as variáveis: teor de açúcares solúveis totais (AST) nos tecidos foliares em mudas de gravioleira adubadas com silicato de cálcio sob diferentes frequências de irrigação, aos 120 dias após transplântio.	81

Tabela 13. Teste F, Tukey e t Student para as variáveis: teor de prolina (PRO) nos tecidos foliares em mudas de gravioleira adubadas com silicato de cálcio sob diferentes frequências de irrigação, aos 120 dias após transplantio.	82
Tabela 14. Teste F, Tukey e t Student para as variáveis: teor de potássio (K) os tecidos foliares em mudas de gravioleira adubadas com silicato de cálcio sob diferentes frequências de irrigação, aos 120 dias após transplantio.	83
Tabela 15. Teste F, Tukey e t Student para as variáveis: teor de silício (Si) e cálcio (Ca) nos tecidos foliares em mudas de gravioleira adubadas com silicato de cálcio sob diferentes frequências de irrigação, aos 120 dias após transplantio.	83

CAPÍTULO IV

Tabela 1. Características químicas do substrato antes e ao término do experimento.	103
Tabela 2. Atributos físico-químicos da água de abastecimento local utilizada na irrigação de mudas de umbu-cajazeira.	103
Tabela 3. Volume total de irrigação aplicado em mudas de umbu-cajazeira sob diferentes frequências de irrigação.	104
Tabela 4. Teste F e Tukey para comprimento da haste (C. haste), diâmetro da estaca (D. estaca), diâmetro da haste (D. haste), número de folhas (NF) e área do folíolo (AF) em mudas de umbu-cajazeira submetidas a diferentes frequências de irrigação.	107
Tabela 5. Teste F e Tukey para matéria seca das folhas (MSF), matéria seca da estaca (MSE), matéria seca da haste (MSH), matéria seca da raiz (MSR), matéria seca total (MST) e matéria seca da parte aérea (MSPA) em mudas de umbu-cajazeira submetidas a diferentes frequências de irrigação.	108
Tabela 6. Teste F e Tukey para déficit de pressão de vapor (VPD), concentração interna de CO ₂ (Ci), transpiração (E), condutância estomática (gs), taxa de assimilação de CO ₂ (A _N) e temperatura foliar (Tl) em mudas de umbu-cajazeira submetidas a diferentes frequências de irrigação.	110
Tabela 7. Teste F e Tukey para teor de água nas folhas (TAF), teor de água na haste (TAH), teor de água na estaca (TAE) e teor de água na raiz (TAR) em mudas de umbu-cajazeira submetidas a diferentes frequências de irrigação.	111
Tabela 8. Teste F e Tukey para as variáveis: nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) nos tecidos foliares em mudas de umbu-cajazeira submetidas a diferentes frequências de irrigação.	112

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	17
REFERÊNCIAS	21
CAPÍTULO I	24
MÉTODO NÃO DESTRUTIVO PARA ESTIMAR A ÁREA FOLIAR DE <i>Annona Muricata</i> USANDO DIMENSÕES LINEARES DA FOLHA.	24
INTRODUÇÃO	26
MATERIAL E MÉTODOS	27
RESULTADOS	31
DISCUSSÃO	37
CONCLUSÕES.....	39
REFERÊNCIAS	40
CAPÍTULO II.....	43
MODELOS ALOMÉTRICOS PARA ESTIMATIVA NÃO DESTRUTIVA DA ÁREA DE FOLÍOLOS DA UMBU-CAJAZEIRA (<i>Spondias</i> sp.)	43
INTRODUÇÃO	45
MATERIAL E MÉTODOS	46
RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
CONCLUSÕES.....	55
REFERÊNCIAS	56
CAPÍTULO III	59
ECOFISIOLOGIA DE MUDAS DE GRAVIOLEIRAS ADUBADAS COM SILICATO DE CÁLCIO SOB DIFERENTES FREQUÊNCIAS DE IRRIGAÇÃO.....	59
INTRODUÇÃO	61
MATERIAL E MÉTODOS	63
RESULTADOS	72
DISCUSSÃO	84
CONCLUSÕES.....	88
REFERÊNCIAS	90
CAPÍTULO IV.....	97
MORFOFISIOLOGIA DE MUDAS DE UMBU-CAJAZEIRA SOB DIFERENTES FREQUÊNCIAS DE IRRIGAÇÃO.....	97
INTRODUÇÃO	99

MATERIAL E MÉTODOS	100
RESULTADOS E DISCUSSÃO	106
CONCLUSÕES.....	113
REFERÊNCIAS	114

INTRODUÇÃO GERAL

O Brasil ocupa a terceira posição entre os maiores produtores mundiais de frutas, com mais de 2,5 milhões de hectares destinados ao cultivo de frutíferas (Alves *et al.*, 2025). A fruticultura brasileira destaca-se como atividade estratégica para a economia nacional, segurança alimentar e desenvolvimento sustentável, contribuindo expressivamente para a geração de emprego e renda, sobretudo em regiões de base agrícola (Petry *et al.*, 2025).

No Nordeste do Brasil, aproximadamente 1,6 milhão de hectares são destinados à produção de frutas tropicais (Pereira *et al.*, 2025), concentrando-se majoritariamente na região semiárida, que apresenta locais com condições edafoclimáticas particulares, como altas temperaturas, elevada luminosidade, baixa umidade relativa do ar, topografia predominantemente plana e solos de fácil manejo e boa drenagem, além da possibilidade de produção na entressafra e logística favorável ao escoamento da produção (Elias, 2024).

Nesse contexto, a produção de mudas frutíferas com elevado padrão de qualidade torna-se fundamental para o estabelecimento de pomares comerciais e para a competitividade do setor, uma vez que o estágio de muda condiciona o crescimento inicial, o estabelecimento no campo e o desempenho produtivo das plantas (Freitas *et al.*, 2024).

Em regiões de clima semiáridos, como o Nordeste brasileiro, a agricultura enfrenta sérios desafios relacionados à escassez quantitativa de água. Esses entraves decorrem da baixa e irregular distribuição das precipitações, da elevada evapotranspiração anual e da reduzida umidade relativa do ar (Prata *et al.*, 2022; Dantas *et al.*, 2023). A água constitui o recurso mais demandado pelas plantas e, simultaneamente, o principal fator limitante à produção agrícola, pois é indispensável à realização de processos fisiológicos essenciais, como a fotossíntese, o transporte e a absorção de nutrientes, além da manutenção do metabolismo vegetal (Campos; Santos; Nacarath, 2021).

O estresse hídrico é um dos principais fatores abióticos que afetam o desenvolvimento das plantas em diferentes estágios fenológicos. O déficit hídrico ocorre quando a disponibilidade de água no solo não supre as exigências hídricas das plantas, resultando em prejuízos significativos ao crescimento e à produtividade (Dong; Luo; Wang, 2025). Esse estresse induz alterações morfológicas, fisiológicas e bioquímicas,

provocando redução da condutância estomática, da transpiração e da fotossíntese, além de comprometer o crescimento da parte aérea e a expansão foliar (Bijalwan *et al.*, 2025; Jan *et al.*, 2025; Wu *et al.*, 2026). Em contrapartida, o crescimento relativo do sistema radicular pode ser favorecido, permitindo maior exploração do solo em busca de água, como mecanismo adaptativo à escassez hídrica (Jan *et al.*, 2025). Assim, o déficit hídrico representa um dos principais desafios à produção de mudas frutíferas no semiárido (Ferreira *et al.*, 2025).

Dentre as frutíferas de maior importância agrossocioeconômica cultivadas no semiárido nordestino, destacam-se a gravioleira (*Annona muricata* L.) e a umbu-cajazeira (*Spondias* sp.), embora a produção de mudas dessas espécies ainda enfrente limitações técnicas e ambientais (Capitulino *et al.*, 2022; Sá *et al.*, 2024; Amorim *et al.*, 2025). A gravioleira é uma espécie arbórea tropical perene, amplamente distribuída em regiões quentes, porém exigente quanto às condições edafoclimáticas, especialmente no que se refere à disponibilidade hídrica (Mutakin *et al.*, 2022; Freitas *et al.*, 2024). No Brasil, a região Nordeste responde por mais de 80% da produção nacional de graviola (IBGE, 2017), cujos frutos apresentam elevado valor comercial e ampla utilização agroindustrial (Olas *et al.*, 2023). A produção de mudas representa uma etapa essencial à implantação e desenvolvimento dos pomares, sendo a via seminífera amplamente empregada nesse processo (Santos *et al.*, 2025).

A umbu-cajazeira é uma frutífera nativa do semiárido brasileiro, originada do cruzamento natural entre o umbuzeiro (*Spondias tuberosa*) e o cajazeiro (*Spondias mombin*) (Macêdo *et al.*, 2023). Tradicionalmente explorada em sistema extrativista, a espécie apresenta elevado potencial produtivo, com indivíduos capazes de produzir mais de 1.500 kg de frutos por safra, abastecendo mercados regionais e indústrias de processamento de polpas (Souza; Porto Filho; Mendes, 2020). Seus frutos destacam-se pelas características sensoriais e pelo amplo uso *in natura* e processado (Oliveira *et al.*, 2024). Apesar da rusticidade e da adaptação às condições semiáridas, é fundamental compreender o comportamento da cultura na fase inicial sob estresse hídrico, uma vez que a adequada distribuição das chuvas ao longo de quatro a cinco meses do ano é determinante para a expressão do potencial produtivo da planta (Souza; Porto Filho; Mendes, 2020; Silva *et al.*, 2023).

Considerando a importância dessas espécies e sua dependência da disponibilidade hídrica, é fundamental compreender suas exigências hídricas e adotar estratégias de manejo que assegurem o uso racional da água. Portanto, as necessidades hídricas das

culturas e a conservação desse recurso precioso para uso sustentável são cruciais (Chen *et al.*, 2023). Portanto, adotar estratégias de gestão da água, como a utilização de frequências de irrigação ou o intervalo em dias entre irrigações sucessivas, constitui alternativa viável para reduzir o consumo de água e otimizar a irrigação mantendo níveis de produtividade aceitáveis e a eficiência do uso da água em regiões semiáridas (Duan *et al.*, 2025; Yuan *et al.*, 2025).

Entretanto, mesmo com a adoção de estratégias de manejo hídrico, as plantas ainda estão sujeitas a condições de déficit hídrico, especialmente na fase inicial de desenvolvimento, o que tem motivado a busca por alternativas que minimizem os efeitos desse estresse. Diante dos desafios impostos pelo déficit hídrico, o uso de atenuadores desse estresse tem sido amplamente investigado como alternativa para a produção de mudas em regiões semiáridas. Nesse contexto, o silicato de cálcio destaca-se como fonte de silício (Si) e cálcio (Ca), elementos que contribuem para o aumento da tolerância das plantas ao estresse hídrico e para a melhoria do crescimento e do desenvolvimento vegetal (Verma *et al.*, 2021; Rachappanavar *et al.*, 2024; Nascimento; Cunha, 2024).

O silício é o segundo elemento mais abundante da crosta terrestre e, embora não seja considerado essencial para todas as plantas, tem sido amplamente reconhecido por seus efeitos benéficos no crescimento, na produtividade e na tolerância a estresses abióticos, especialmente o déficit hídrico (Saleh; Soliemanzadeh, 2026). Esse nutriente é absorvido pelas plantas na forma de ácido monossilícico, por difusão e também pelo fluxo de massa induzido pela transpiração, sendo posteriormente translocado via xilema e depositado nos tecidos vegetais, atuando na melhoria das relações hídricas, na estabilidade das membranas celulares, no ajuste osmótico e na ativação de mecanismos antioxidantes (Souri *et al.*, 2021; Irfan *et al.*, 2023). O cálcio, por sua vez, é um macronutriente essencial ao crescimento e ao desenvolvimento das plantas, sendo um dos elementos minerais mais abundantes nos tecidos vegetais (Wdowiak; Podgórska; Szal, 2024) e exercendo funções estruturais e sinalizadoras, sendo essencial para a integridade das membranas, o crescimento radicular e a regulação de processos metabólicos, especialmente sob condições adversas (Singh, 2020; Wei *et al.*, 2025).

Além dos estudos relacionados ao estresse hídrico, a avaliação da área foliar é fundamental em pesquisas com frutíferas, pois esse parâmetro está diretamente associado à fotossíntese, à transpiração e ao potencial produtivo das plantas (Hernández-Fernández *et al.*, 2021; Silva *et al.*, 2025). A estimativa da área foliar por métodos não destrutivos, como os modelos alométricos, permite o acompanhamento do crescimento vegetal ao

longo do tempo sem comprometer a integridade das plantas. Esses modelos baseiam-se em equações matemáticas que relacionam a área foliar a medidas lineares do limbo, podendo ser ajustados por regressões lineares (regressão linear simples, quadrática, cúbica), ou não linear nos parâmetros (regressão potência, exponencial), conforme a espécie estudada (Schmildt; Oliveira; Dousseau-Arantes, 2023).

Portanto, objetivou-se avaliar os efeitos do déficit hídrico e do silicato de cálcio sobre aspectos ecofisiológicos da gravioleira (*Annona muricata* L.) e da umbu-cajazeira (*Spondias* sp.), bem como construir modelos alométricos para a estimativa da área foliar dessas espécies.

REFERÊNCIAS

- ALVES, S. C. *et al.* Multicriteria analysis as a tool to support fruit culture in the Brazilian semi-arid. **Environment, Development and Sustainability**, v. 27, n. 6, p. 14281-14304, 2025. <https://doi.org/10.1007/s10668-024-04521-9>
- AMORIM, P. E. C. *et al.* Silicon Application Technology to Mitigate Saline Stress in Umbu-Cajazeira. **Silicon**, p. 1-13, 2025. <https://doi.org/10.1007/s12633-025-03555-6>
- BIJALWAN, P. *et al.* A Systematic Review of Plant Responses to Drought Stress. **Applied Fruit Science**, v. 67, n. 5, p. 1-12, 2025. <https://doi.org/10.1007/s10341-025-01632-z>
- CAMPOS, A. J. M.; SANTOS, S. M.; NACARATH, I. R. F. F. Estresse hídrico em plantas: uma revisão. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 15, p. e311101523155-e311101523155, 2021. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i15.23155>
- CAPITULINO, J. D. *et al.* Gas exchange and growth of soursop under salt stress and H₂O₂ application methods. **Brazilian Journal of Biology**, v. 82, p. e261312, 2022. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.261312>
- CHEN, Y. *et al.* Water-saving techniques: physiological responses and regulatory mechanisms of crops. **Advanced Biotechnology**, v. 1, n. 4, p. 3, 2023. <https://doi.org/10.1007/s44307-023-00003-7>
- DANTAS, M. V. *et al.* Morphophysiology and production components of miniwatermelon under water replenishment and nitrogen fertilization levels. **Semin. Ciência. Agrár.**, v. 44, p. 1235–1264, 2023. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2023v44n4p1235>
- DONG, M.; LUO, H.; WANG, Q. Effects of Water Stress on Growth and Leaf Water Physiology of Major Plants in the Qaidam Basin. **Diversity**, v. 17, n. 9, p. 652, 2025. <https://doi.org/10.3390/d17090652>
- DUAN, T. *et al.* Effects of Water Application Frequency and Water Use Efficiency Under Deficit Irrigation on Maize Yield in Xinjiang. **Agronomy**, v. 15, n. 5, p. 1110, 2025. <https://doi.org/10.3390/agronomy15051110>
- ELIAS, D. Agronegócio e Seletividade Espacial: Uma Região Produtiva do Agronegócio de Frutas no Semiárido. **Espaço Aberto**, v. 14, p. 57–76, 2024. <https://doi.org/10.36403/espacoaberto.2024.61232>
- FERREIRA, A. S. *et al.* Pyroligneous extract as a mitigator of water deficit in pitanga plants. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 29, n. 02, p. e286827, 2025. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v29n2e286827>
- FREITAS, R.S. *et al.* Hydration and dehydration cycles for enhanced soursop (*Annona muricata*) seedling quality and seedling drought stress resistance. **New Forests**, v. 55, n. 6, p. 1843-1861, 2024. <https://doi.org/10.1007/s11056-024-10062-w>

HERNÁNDEZ-FERNANDÉZ, I. A. *et al.* Allometric models for non-destructive leaf area measurement of stevia: An in depth and complete analysis. **Horticultura Brasileira**, v. 39, n. 2, p. 205-215, 2021. <https://doi.org/10.1590/s0102-0536-20210212>

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção Agrícola Municipal**. 2017. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br>. Acessado em: 29 nov. 2025.

IRFAN, M. *et al.* Silicon nutrition in plants under water-deficit conditions: overview and prospects. **Water**, v. 15, n. 4, p. 739, 2023. <https://doi.org/10.3390/w15040739>

JAN, S. *et al.* Plants response to different abiotic stresses. **Journal of Crop Health**, v. 77, n. 5, p. 139, 2025. <https://doi.org/10.1007/s10343-025-01201-0>

MACÊDO, E. L. C. *et al.* Effects of yeast fermented soursop and umbu-cajá pulps on the colonic microbiota of middle-aged hypertensive adults. **Food Bioscience**, v. 51, p. 102309, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.102309>

MUTAKIN, M. *et al.* Pharmacological activities of soursop (*Annona muricata* Lin.). **Molecules**, v. 27, n. 4, p. 1201, 2022. <https://doi.org/10.3390/molecules27041201>

NASCIMENTO, C. W. A.; CUNHA, K. P. V. Silicon dynamics and crop responses in tropical soils. In: PRADO, R. de M.; ETESAMI, H.; SRIVASTAVA, A. K. (eds.). **Silicon advances for sustainable agriculture and human health: increased nutrition and disease prevention**. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024. p. 65–79.

OLAS, B. The antioxidant potential of graviola and its potential medicinal application. **Nutrients**, v. 15, n. 2, p. 402, 2023. <https://doi.org/10.3390/nu15020402>

OLIVEIRA, J. N. *et al.* Evaluating the potential prebiotic effects of umbu-cajá (*Spondias* spp.) fruit processing by-product flour on the human intestinal microbiota. **LWT**, v. 210, p. 116764, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.116764>

PATRA, S. K. *et al.* Prospects of hydrogels in agriculture for enhancing crop and water productivity under water deficit condition. **International Journal of Polymer Science**, v. 2022, n. 1, p. 4914836, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/4914836>

PEREIRA, D. G. C. *et al.* Effect of Organic Farming on Soil Carbon Reserves and Quality in Citrus Groves in the Brazilian Semi-Arid Region. **Soil Use and Management**, v. 41, n. 2, p. e70080, 2025. <https://doi.org/10.1111/sum.70080>

PETRY, H. B. *et al.* Brazilian Fruit Agribusiness. **Fruit Crops Science Journal**, v. 1, p. e-001, 2025. <https://doi.org/10.1590/3085-89092025001>

RACHAPPANAVAR, V. *et al.* Silicon derived benefits to combat biotic and abiotic stresses in fruit crops: Current research and future challenges. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 211, p. 108680, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2024.108680>

SÁ, F. V. S. *et al.* Ecophysiology of Soursop Seedlings Irrigated with Fish Farming Effluent under NPK Doses. **Sustainability**, v. 16, n. 11, p. 4674, 2024. <https://doi.org/10.3390/su16114674>

SALEH, J.; SOLIEMANZADEH, A. Silicon-mediated drought stress tolerance in wheat: Impacts on yield, nutrient uptake, osmotic regulation, and antioxidant responses. **Field Crops Research**, v. 337, p. 110284, 2026. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2025.110284>

SANTOS, S. H. N. *et al.* Produção de mudas de graviola em diferentes combinações de substratos e recipientes. **Agri-Environmental Sciences**, v. 11, n. 1, p. 10-10, 2025. <https://doi.org/10.36725/agries.v11i1.10298>

SCHMILDT, E. R.; OLIVEIRA, V. S.; DOUSSEAU-ARANTES, S. Modelagem da área foliar individual. Brazilian Journals Editora, v.1, 2023.

SILVA, L. A. *et al.* Morphophysiology and water relations of *Spondias* rootstocks under different irrigation frequencies. **Revista Caatinga**, v. 36, p. 865-874, 2023. <http://dx.doi.org/10.1590/1983-21252023v36n414rc>

SILVA, T. I. *et al.* Can a Non-Destructive Method Predict the Leaf Area of Species in the Caatinga Biome?. **Diversity**, v. 17, n. 4, p. 234, 2025. <https://doi.org/10.3390/d17040234>

SINGH, R. Calcium in plant biology: nutrient and second messenger. **International Journal of Biological Innovations**, v. 2, n. 1, p. 31-35, 2020. <https://doi.org/10.46505/IJBI.2020.2105>

SOURI, Z. *et al.* Silicon and plants: current knowledge and future prospects. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 40, n. 3, p. 906-925, 2021. <https://doi.org/10.1007/s00344-020-10172-7>

SOUZA, F. X.; PORTO FILHO, F. Q.; MENDES, N. V. B. **Umbu-cajazeira**: descrição e técnicas de cultivo. Mossoró: EDUFERSA, 2020. 103 p.

VERMA, K. K. *et al.* Functional relationship between photosynthetic leaf gas exchange in response to silicon application and water stress mitigation in sugarcane. **Biological Research**, v. 54, n. 1, p. 15, 2021. <https://doi.org/10.1186/s40659-021-00338-2>

WDOWIAK, A.; PODGÓRSKA, A.; SZAL, B. Calcium in plants: An important element of cell physiology and structure, signaling, and stress responses. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 46, n. 12, p. 108, 2024. <https://doi.org/10.1007/s11738-024-03733-w>

WEI, Y. *et al.* The impact of Ca^{2+} on the protective mechanisms of the photosystem under drought stress. **Journal of Plant Interactions**, v. 20, n. 1, p. 2458083, 2025. <https://doi.org/10.1080/17429145.2025.2458083>

WU, Y. *et al.* Abiotic stress responses in crop plants: A multi-scale approach. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 25, n. 1, p. 1-15, 2026. <https://doi.org/10.1016/j.jia.2024.09.003>

YUAN, M. *et al.* Optimizing irrigation regimes for foxtail millet (*Setaria italica* L.) in Northwest China: Effects of irrigation quota and frequency on yield and crop water productivity. **Agricultural Water Management**, v. 322, p. 110022, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.110022>

CAPÍTULO I

MÉTODO NÃO DESTRUTIVO PARA ESTIMAR A ÁREA FOLIAR DE *Annona Muricata* USANDO DIMENSÕES LINEARES DA FOLHA.

RESUMO

A estimativa da área foliar (AF) em plantas frutíferas por métodos não destrutivos é um parâmetro valioso, uma vez que as folhas funcionam como a principal interface entre as plantas e o ambiente, contribuindo diretamente para a capacidade fotossintética. Portanto, objetivou-se determinar equações alométricas para estimar a área foliar de gravioleira usando dimensões lineares (comprimento e largura) das folhas. Oitocentas e vinte e cinco folhas de gravioleira da cultivar ‘Morada’ foram coletadas aleatoriamente de mudas sadias. As medidas de comprimento (L), largura (W) e AF foram realizadas por meio de imagens digitalizadas, seguidas do cálculo do produto entre o comprimento e largura (LW), comprimento e comprimento (L^2) e largura e largura (W^2). Modelos de regressão linear, linear sem intercepto, potência e exponencial foram aplicados, com base nas dimensões L e W das folhas, para estimar a AF da espécie. Os melhores modelos e equações foram escolhidos com base nos maiores coeficientes de determinação e correlação de Pearson, índice de concordância de Willmott e menor critério de informação de Akaike, raiz do erro quadrado médio e erro percentual absoluto médio. A AF pode ser estimada a partir do LW das folhas utilizando as equações alométricas $\hat{y} = 0,72 * LW$ (modelo linear sem intercepto) e $\hat{y} = 0,69 * LW^{1,00}$ (modelo potência). As equações alométricas são precisas e seguras para estimar a área foliar em mudas de gravioleira, permitindo medições repetidas ao longo do desenvolvimento e contribuindo para estudos agronômicos.

Palavras-chave: Gravioleira, biometria, dimensões foliares, modelo matemático, equações alométricas.

ABSTRACT

Estimating leaf area (LA) in fruit plants using non-destructive methods is a valuable parameter, since leaves function as the main interface between plants and the environment, directly contributing to photosynthetic capacity. Therefore, the objective was to determine allometric equations to estimate the leaf area of soursop using linear dimensions (length and width) of the leaves. Eight hundred and twenty-five soursop leaves of the cultivar 'Morada' were randomly collected from healthy seedlings. Length (L), width (W), and LA measurements were performed using digitized images, followed by the calculation of the product between length and width (LW), length and length (L^2), and width and width (W^2). Linear regression, linear regression without intercept, power regression, and exponential regression models were applied, based on leaf dimensions L and W, to estimate the LA of the species. The best models and equations were chosen based on the highest coefficients of determination and Pearson correlation, Willmott's index of agreement, and the lowest Akaike information criterion, root mean square error, and mean absolute percent error. Leaf area (LA) can be estimated from leaf width (LW) using the allometric equations $\hat{y} = 0.72 * LW$ (linear model without intercept) and $\hat{y} = 0.69 * LW^{1.00}$ (power model). The allometric equations are accurate and reliable for estimating leaf area in soursop seedlings, allowing repeated measurements throughout development and contributing to agronomic studies.

Keywords: Soursop, biometry, leaf dimensions, mathematical model, allometric equations.

INTRODUÇÃO

A determinação da área foliar no cultivo frutícola desempenha papel crucial em estudos agrônômicos. As folhas servem como a principal interface entre as plantas e seus agroecossistemas (Rodriguez-Paez *et al.*, 2023), influenciando diretamente na capacidade fotossintética e na interceptação de luz (Delgado *et al.*, 2024), o que impacta a biomassa, o balanço energético e o vigor geral das plantas.

Na maioria dos casos, a área foliar pode ser determinada por métodos diretos, geralmente destrutivos, ou por métodos indiretos, baseados em modelos alométricos (Cabral *et al.*, 2023). No entanto, a avaliação direta torna-se inviável quando envolve grande número de folhas, pois é trabalhosa, demorada, dispendiosa e requer equipamentos específicos (Jaime-Guerreiro *et al.*, 2023). Por outro lado, os modelos alométricos, baseados em análises de regressão, permitem a estimativa da área foliar de forma rápida, precisa e não destrutiva, utilizando medições simples da lâmina foliar (Gupta *et al.*, 2023; Puntel *et al.*, 2023; Rodriguez-Paez *et al.*, 2023). Além de reduzirem custos e tempo de avaliação, esses modelos possibilitam o monitoramento do crescimento foliar ao longo do desenvolvimento da planta, sem necessidade de remoção das folhas, tornando-os ferramentas importantes para o manejo agrícola de espécies frutíferas (Delgado *et al.*, 2024; Soysal, 2024). Modelos alométricos estimando a área foliar em função das dimensões foliares do comprimento e largura das folhas foram desenvolvidos por pesquisadores em espécies frutíferas como *Psidium guava* L. (Gonçalves *et al.*, 2022), *Spondias tuberosa* Arruda (Amorim *et al.*, 2024b), *Spondias* sp. (Amorim *et al.*, 2024a), *Euterpe oleracea* e *Euterpe precatoria* (Delgado *et al.*, 2024).

A gravioleira (*Annona muricata* L.) é uma das plantas frutíferas mais importantes, tanto do ponto de vista econômico quanto medicinal, da família Annonaceae, cultivada em regiões tropicais e subtropicais, principalmente no Brasil. Seus frutos possuem alto valor nutricional devido à abundância de carboidratos, cálcio, fósforo, ferro, tiamina, niacina e riboflavina (Leal; Paull, 2023). São comercialmente preferidos frescos devido ao seu sabor agradável e adocicado. No entanto, a produção de polpa é o principal destino da fruta (Santos *et al.*, 2023). A gravioleira, por conter diversos fitoquímicos, também pode ser utilizada medicinalmente no tratamento de ampla variedade de doenças, como diabetes, câncer, estresse oxidativo, hipertensão, doenças hemorrágicas e na redução do colesterol (Afzaal *et al.*, 2022).

No entanto, apesar do seu potencial agrícola e farmacêutico, a estimativa da área

foliar da gravioleira por meio de modelos alométricos é escassa. Assim, hipotetizamos que a área foliar da gravioleira pode ser estimada com precisão utilizando modelos alométricos baseados em medidas lineares simples das folhas (comprimento e largura), proporcionando alternativa rápida, de baixo custo e não destrutiva. Portanto, objetivou-se determinar equações alométricas para estimar a área foliar da graviola considerando as dimensões lineares das folhas (comprimento e largura).

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em casa de vegetação na Universidade Federal Rural do Semiárido (UFERSA), Mossoró Rio Grande do Norte, Brasil (5°12'14,2"S e 37°19'29,3"W, com altitude média de 18 m), em 2023. O clima da região, segundo a classificação climática de Köppen, é do tipo BSh (seco e muito quente) (Alvares *et al.* 2013), com precipitação pluviométrica média anual de 555 mm e temperatura média anual de 27,8 °C (Climate-Data, 2024). Durante o experimento, as temperaturas mínima, média e máxima registradas dentro da casa de vegetação foram de 24,9 °C, 33,73 °C e 42,10 °C, respectivamente, ao passo que a umidade relativa do ar apresentou valores mínimo, médio e máximo de 25,6%, 39,0% e 71,9%, respectivamente. Esses dados foram registrados por meio de um termo-higrômetro digital (SH-122, J-Prolab, Brasil).

As mudas de gravioleira da cultivar 'Morada' foram obtidas por meio de sementes extraídas de frutos sadios de plantas matrizes com boas condições fitossanitárias na zona rural de Mossoró, RN. As sementes foram extraídas de frutos despolpados, lavadas em água corrente e secas em papel toalha à sombra por 7 dias. A semeadura de três sementes foi realizada a uma profundidade de 1,5 cm em sacos plásticos com capacidade de 2 dm³, contendo substrato composto por areia e substrato comercial Tropstrato® (Vida Verde, Mogi Mirim, SP, Brasil) na proporção 2:1 (v/v). Após 20 dias da emergência, foi realizado o desbaste, ficando apenas uma muda por saco. Aos 130 dias, as mudas foram transplantadas para vasos plásticos de 5 L, preenchidos com o mesmo substrato e proporção. As características químicas do substrato foram analisadas nos Laboratórios de Solo, Água e Análise de Plantas e Laboratório de Nutrição de Plantas da UFERSA (Tabela 1). O espaçamento entre linhas foi de 1,0 m, e entre mudas, de 0,5 m.

Tabela 1. Características químicas do substrato utilizado no experimento.

Caracterização inicial												
pH	CE	M.O.	P	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SB	T	CEC	V	ESP
(H ₂ O)	(dS m ⁻¹)	(g kg ⁻¹)	(mg dm ⁻³).....			cmol _c dm ³					(%).....	
1:2.5	1:2.5											
4,82	1,00	27,84	214,30	225,10	251,48	5,60	2,60	9,87	9,87	12,84	76,9	8,5

Fonte: A autora (2026). pH: potencial hidrogeniônico; CE: condutividade elétrica da pasta saturada; MO: matéria orgânica; P, K⁺ e Na⁺: fósforo, potássio e sódio foram extraídos com solução de Mehlich 1; Al³⁺, Ca²⁺ e Mg²⁺ – alumínio, cálcio e magnésio foram extraídos com solução de KCl 1 M; SB: soma das bases; T: capacidade de troca catiônica efetiva; CTC: capacidade potencial de troca catiônica em pH 7,0; V: saturação de bases; ESP: porcentagem de sódio trocável. Os valores para alumínio trocável (Al³⁺) e saturação de alumínio (m) foram zero.

A irrigação foi realizada manualmente, utilizando o método gravimétrico, com base em pesagens diárias e na reposição da água perdida pelo substrato, por meio de uma proveta graduada, até atingir o peso correspondente a 100% da capacidade de retenção de água (CRA), conforme Souza *et al.* (2000). As pesagens foram efetuadas empregando uma balança digital com capacidade de 31 kg.

As mudas receberam adubação semanal com nitrogênio, potássio e fósforo (NPK), parcelada em doze aplicações, via fertirrigação, sendo 50% de 100 mg de N, 300 mg de P₂O₅ e 150 mg de K₂O por dm⁻³ de solo (Novais; Neves; Barros, 1991). Para a adubação, foram aplicados 400 mg de ureia, 1.250 mg de fosfato monoamônico e 650 mg de cloreto de potássio por vaso. Durante a condução do experimento, as mudas receberam, quando necessário, manejo cultural e fitossanitário.

Aos 120 dias após o transplântio, foram coletadas aleatoriamente 825 folhas saudáveis das mudas de grávieiras, sem problemas fitossanitários, sintomas visíveis de deficiências nutricionais ou desenvolvimento anormal, e apresentando diferentes tamanhos. As folhas foram armazenadas em sacos plásticos e transportadas para o Laboratório de Fruticultura da UFERSA, Mossoró, RN. Em seguida, as folhas foram digitalizadas com um scanner de mesa (Samsung Xpress SL-C480FW, Samsung, Brasil), com resolução de 600 dpi. As imagens foram analisadas e processadas utilizando o software ImageJ[®] versão 1.53e, de domínio público (Schneider; Rasband; Eliceiri, 2012).

As medidas alométricas, o comprimento (L, cm) e largura (W, cm) foram obtidas para o desenvolvimento de equações alométricas. O comprimento (L) foi medido da ponta da lâmina até o ponto de interseção entre a folha e o pecíolo, e a largura (W), obtida pela medição ponta a ponta entre a parte mais larga da lâmina exatamente perpendicular à nervura central da lâmina (Figura 1), sendo variáveis independentes, e a área foliar (AF),

sendo variável dependente. Além disso, foram calculados o produto do comprimento pela largura (LW , cm^2), produto do comprimento pelo comprimento (L^2), produto da largura pela largura (W^2), sendo considerados como variáveis independentes.

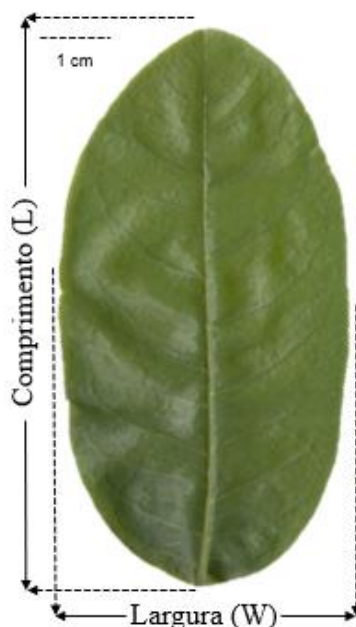


Figura 1. Folhas de graviola utilizadas para estimar a área foliar. Fonte: A autora (2026).

O grau de colinearidade entre os parâmetros foi avaliado para verificar se havia precisão nas estimativas dos coeficientes de regressão entre L e W . Para isso, foram calculados o fator de inflação da variância (VIF) (Equação 1) (Marquardt, 1970) e o valor de tolerância (T) (Equação 2) (Gill, 1986). Valores altos de VIF (>10) ou baixos de T ($<0,1$) indicam multicolinearidade entre L e W (Gill, 1986).

$$VIF = \frac{1}{1 - r^2} \quad (1)$$

$$T = \frac{1}{VIF} \quad (2)$$

onde: r representa o coeficiente de correlação entre L e W .

O fator de inflação da variância (VIF) variou de 10,3 a 125,2, ao passo que os valores de tolerância (T) variaram de 0,007 a 0,09.

Os modelos de regressão linear simples, linear sem intercepto (0,0), potência e exponencial foram aplicados para construção das equações alométricas (Tabela 2).

Tabela 2. Modelos e descrição dos modelos utilizadas para estimar a área foliar de gramineleira através das dimensões lineares das folhas.

Modelo	Descrição
Linear	$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 * x + \varepsilon_i$
Linear (0,0)	$\hat{y} = \beta_1 * x + \varepsilon_i$
Potência	$\hat{y} = \beta_0 * x^{\beta_1} + \varepsilon_i$
Exponencial	$\hat{y} = \beta_0 * \beta_1^x + \varepsilon_i$

Fonte: A autora (2026). $\hat{y}$: Área foliar; x: dimensões lineares das folhas; β_0, β_1 : Coeficientes do modelo; ε_i : Erro aleatório.

A escolha dos melhores modelos e equações alométricas foi baseada nos seguintes critérios: maior coeficiente de determinação (R^2) (Equação 3), coeficiente de correlação de Pearson (r) (Equação 4), índice de concordância de Willmott (d) (Equação 5), menor critério de informação de Akaike (AIC) (Equação 6), raiz do erro quadrado médio (RMSE) (Equação 7) e erro percentual absoluto médio (MAPE) (Equação 8).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y'_i)^2} \quad (3)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}} \quad (4)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|\hat{y}'_i| + |y'_i|)^2} \quad (5)$$

$$AIC = -2 \ln L (x \backslash \hat{\theta}) + 2(p) \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad (7)$$

$$MAEP = \frac{\sum_{i=1}^n |\hat{y}_i - y_i| * 100}{n} \quad (8)$$

onde: $\hat{y}_i$ = valores estimados da área de folíolos; y_i = valores da área de folíolos observados; $\bar{y}_i$ = média dos valores observados; $\hat{y}'_i = \hat{y}_i - \bar{y}$; $y'_i = y_i - \bar{y}$; $L(x|\hat{\theta})$: função de máxima verossimilhança; p = número de parâmetros do modelo; n = número de observações; x_i e y_i observações das variáveis y e x ; $\bar{y}$ e $\bar{x}$ = média das variáveis y e x .

A análise descritiva dos dados foi utilizada para determinar o valor mínimo, máximo, média, amplitude, mediana, variância, desvio padrão, erro padrão, coeficiente de variação, coeficiente de assimetria e curtose das variáveis independentes (L , W , LW , L^2 e W^2) e dependente (AF). A normalidade dos dados foi verificada utilizando o teste de Shapiro-Wilk com um nível de significância de 5% (Shapiro e Wilk, 1965). Os valores de área foliar das folhas observadas (OLA) e estimadas (ELA) foram comparados pelo teste t de Student para amostras pareadas ($p \leq 0,01$). A análise dos dados foi realizada por meio do *software* R v. 4.4.1 (R Core Team, 2023).

RESULTADOS

As estatísticas descritivas com os valores do comprimento (L), largura (W), produto do comprimento pela largura (LW), produto do comprimento pelo comprimento (L^2), produto da largura pela largura (W^2) e área foliar (AF) foram descritas na Figura 2. As folhas medidas apresentaram comprimento (L) e largura (W) variando de 1,464 a 16,364 cm, e 0,727 a 7,039 cm, respectivamente (Figuras 2A e 2B).

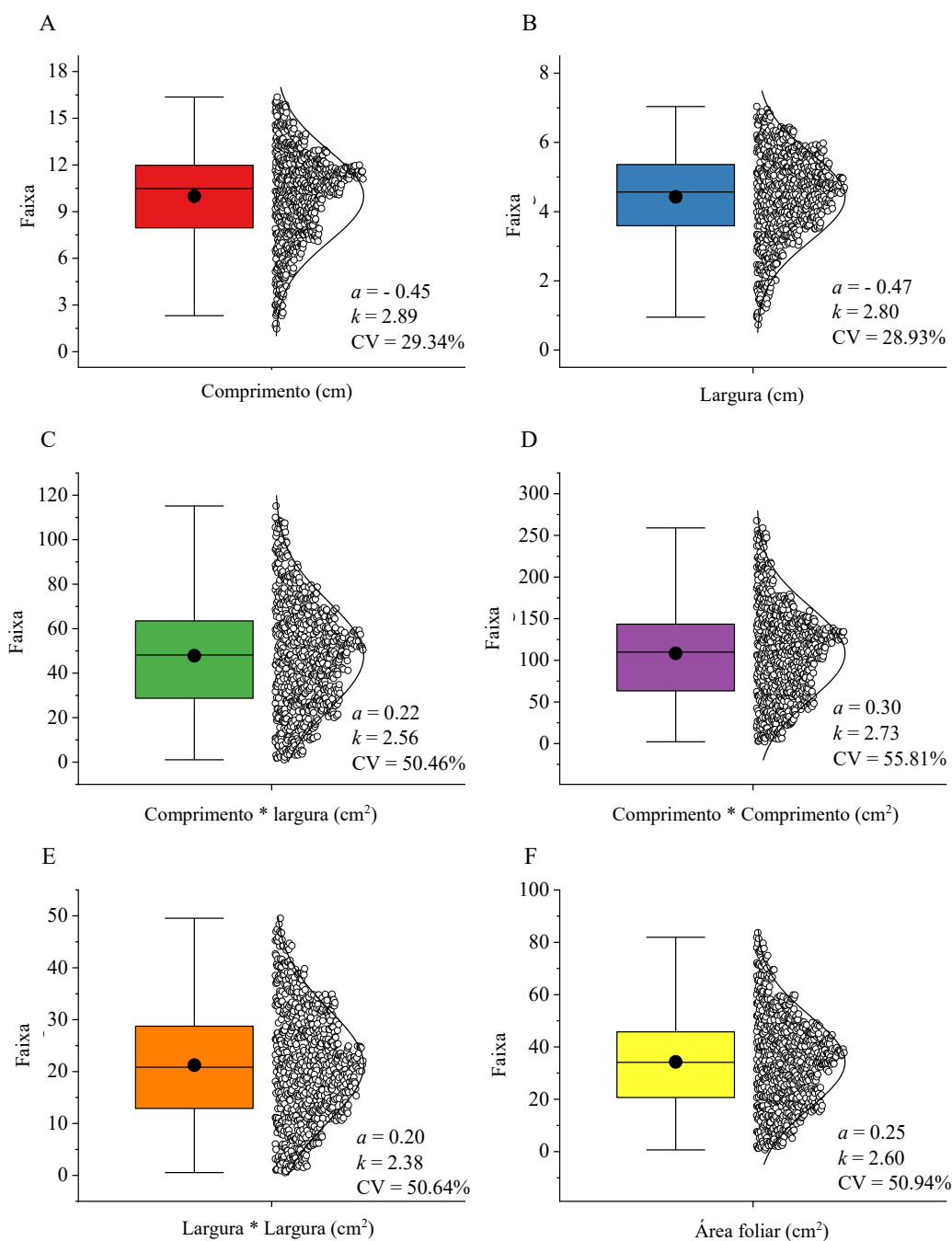


Figura 2. Análise descritiva do comprimento (A), largura (B), produto entre comprimento e largura (C), produto entre o comprimento e comprimento (D), produto entre largura e largura (E) e área foliar (F) de folhas de gravioleira. As extremidades superior e inferior de cada caixa representam os quartis 1/4 e 3/4; a linha horizontal de cada caixa se refere à mediana. A distribuição dos pontos superior e inferior para caixas representa os valores extremos mínimos e máximos dos dados. Os símbolos (·) dentro das caixas representam as médias. Os números na lateral da distribuição se referem aos coeficientes de assimetria (a), curtose (k) e variação (CV%). Fonte: A autora (2026).

O produto entre o comprimento e largura (LW) variou 1,064 a 115,186 cm² nas folhas de graviroleira (Figura 2C). Os valores entre o produto entre comprimento e comprimento (L²) variaram de 2,143 a 267,780 cm² (Figura 2D). O produto entre largura e largura (W²) variou de 0,529 a 49,548 cm² (Figura 2E). Em relação à área foliar (AF) das folhas da graviroleira, houve variação de 0,687 a 83,661 cm² (Figura 2F).

Os coeficientes de variação (CV) encontrados para LW (50,46%), L² (55,81%), W² (50,64%) e AF (50,94%) foram superiores aos de L (29,34%) e W (28,93%) (Figura 2A e 2B). Os menores coeficientes de assimetria (*a*) foram observados no L (-0,45) e W (-0,47) quando comparados a LW (0,22), L² (0,30), W² (0,20) e AF (0,25) (Figura 2C, 2D, 2E e 2F). Ademais, os coeficientes de curtose (*k*) das variáveis dependentes e independentes apresentaram distribuições semelhantes dos dados, com curvas platicúrticas (*k* < 3,26), indicando que os dados estão mais achatados e tem caudas mais finas que uma distribuição normal, além de menor probabilidade de eventos extremos (Figures 2A, 2B, 2C, 2D, 2E e 2F).

A distribuição percentual das classes de tamanho de AF das 825 folhas de graviroleira é apresentada na Figura 3. As folhas das mudas de graviroleira mostraram que 32,36% da AF estão dentro do intervalo $30,01 \leq AF \leq 45,00$ cm² (Figura 3), caracterizando a maioria das folhas coletadas como de tamanho médio.

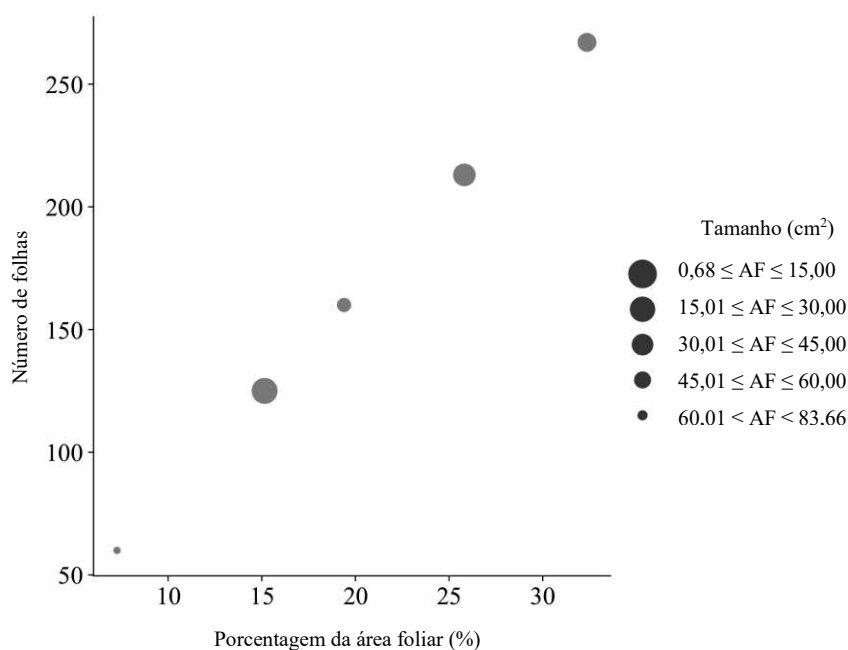


Figura 3. Relação entre o número de folhas de graviroleira e a porcentagem de área foliar classificada em classes de tamanho. Fonte: A autora (2026).

Comportamentos lineares e não lineares foram obtidos com as dimensões lineares das folhas da graviroleira entre as variáveis independentes (L , W , LW , L^2 e W^2) e dependente (AF) (Figura 4). As folhas de graviroleira possuem relações lineares entre LW e AF , L^2 e AF , W^2 e AF e não lineares entre L e AF e W e AF (Figura 4).

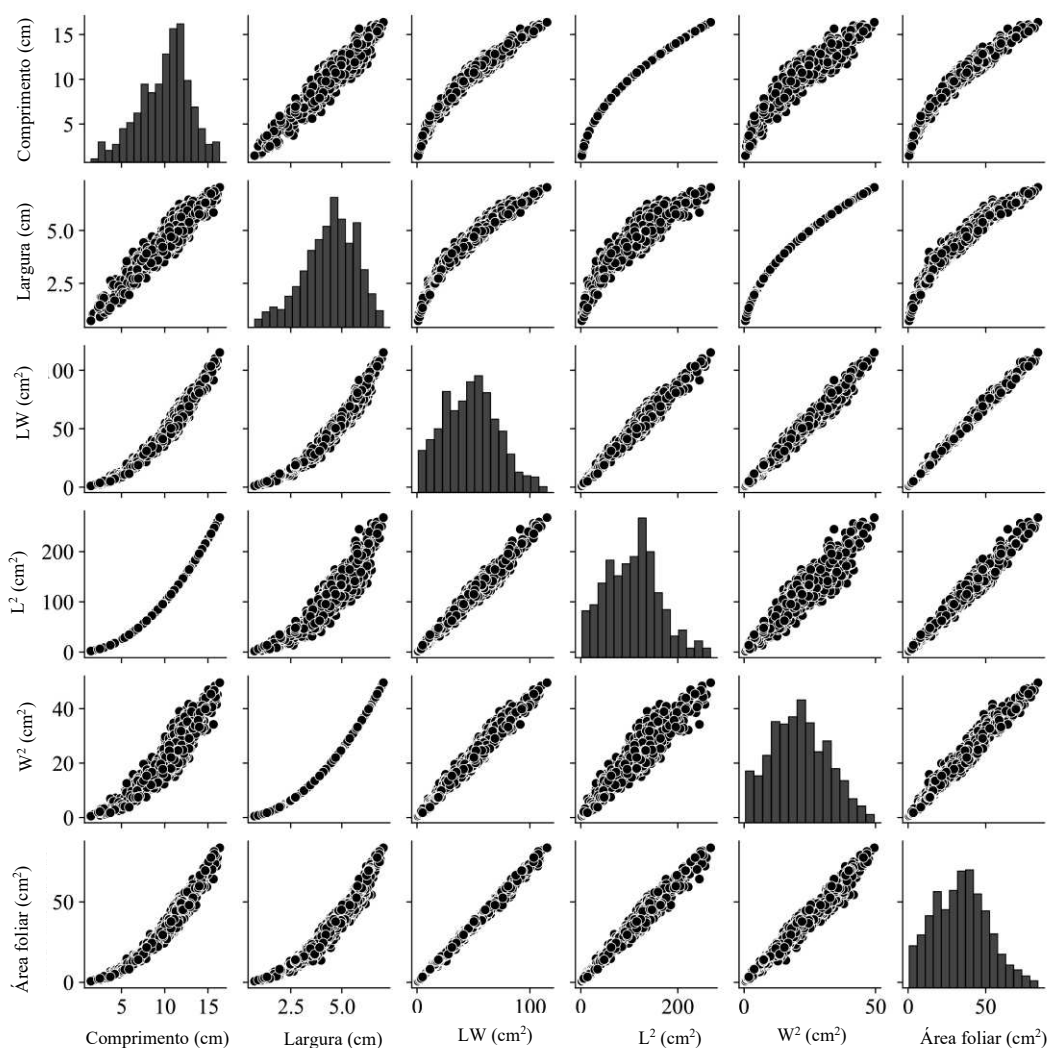


Figura 4. Histograma de frequência (na diagonal) e dispersão de dados entre comprimento (L), largura (W), produto de comprimento e largura (LW), produto do comprimento entre comprimento (L^2), produto da largura e largura (W^2) e área foliar (AF) graviroleira. Fonte: A autora (2026).

Os modelos de regressão e equações mais adequados e precisos para estimar a área foliar da graviroleira, conforme os critérios de seleção, são apresentados na Tabela 3. Os modelos de regressão linear sem intercepto e potência em função do LW exibiram os maiores R^2 (0,9984 e 0,9921), r (0,9980 e 0,9960) e d (0,9980 e 0,9980) e os menores AIC (3,064,9 e 3,063,6), RMSE (1,5449 e 1,5437) e MAPE (0,0368 e 0,0364). Desta

forma, as equações $\hat{y} = 0,72 * LW$ e $\hat{y} = 0,69 * LW^{1,00}$ foram as melhores para estimar a área foliar de mudas da espécie estudada (Tabela 3).

Tabela 3. Modelo de regressão, equações, coeficiente de determinação (R^2), coeficiente de correlação de Pearson (r), informação de Akaike (AIC), índice de concordância de Willmott (d), erro quadrático médio (RMSE) e erro percentual absoluto médio (MAPE), obtido em função de dimensões foliares de graviroleira.

Modelo	R^2	r	d	AIC	RMSE	MAPE	Equação
$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 * L + \varepsilon_i$	0,9350	0,9670	0,9829	4810,7	4,4504	0,2675	$\hat{y} = - 23,28 + 5,76 * L$
$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 * W + \varepsilon_i$	0,9252	0,9619	0,9802	4927,4	4,7768	0,4094	$\hat{y} = - 23,80 + 13,12 * W$
$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 * LW + \varepsilon_i$	0,9922	0,9960	0,9980	3065,4	1,5449	0,0368	$\hat{y} = - 0,19 + 0,72 * LW$
$\hat{y} = \beta_1 * LW + \varepsilon_i$	0,9984	0,9960	0,9980	3064,9	1,5449	0,0368	$\hat{y} = 0,72 * LW$
$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 * LL + \varepsilon_i$	0,9663	0,9830	0,9913	4269,6	3,2061	0,0857	$\hat{y} = 0,93 + 0,31 * LL$
$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 * WW + \varepsilon_i$	0,9583	0,9789	0,9892	4445,8	3,5676	0,0938	$\hat{y} = 0,52 + 1,59 * WW$
$\hat{y} = \beta_0 + L^{\beta_1} + \varepsilon_i$	0,9667	0,9832	0,9914	4260,6	3,1886	0,0837	$\hat{y} = 0,38 * L^{1,92}$
$\hat{y} = \beta_0 + W^{\beta_1} + \varepsilon_i$	0,9583	0,9789	0,9892	4445,7	3,5672	0,0938	$\hat{y} = 1,71 * W^{1,96}$
$\hat{y} = \beta_0 + LW^{\beta_1} + \varepsilon_i$	0,9921	0,9960	0,9980	3063,6	1,5437	0,0364	$\hat{y} = 0,69 * LW^{1,00}$
$\hat{y} = \beta_0 + LL^{\beta_1} + \varepsilon_i$	0,9667	0,9832	0,9914	4260,6	3,1886	0,0837	$\hat{y} = 0,38 * LL^{0,96}$
$\hat{y} = \beta_0 + WW^{\beta_1} + \varepsilon_i$	0,9583	0,9789	0,9892	4445,7	3,5672	0,0938	$\hat{y} = 1,70 * WW^{0,98}$
$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1^L + \varepsilon_i$	0,9459	0,9725	0,9846	4695,8	4,1512	0,1310	$\hat{y} = 5,58 * 1,18^L$
$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1^W + \varepsilon_i$	0,9456	0,9724	0,9849	4685,1	4,1243	0,1326	$\hat{y} = 5,09 * 1,49^W$
$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1^{LW} + \varepsilon_i$	0,9258	0,9622	0,9777	4971,4	4,9057	0,1483	$\hat{y} = 13,77 * 1,01^{LW}$
$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1^{LL} + \varepsilon_i$	0,8875	0,9420	0,9654	5303,9	6,0010	0,1714	$\hat{y} = 14,65 * 1,00^{LL}$
$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1^{WW} + \varepsilon_i$	0,9031	0,9503	0,9715	5169,7	5,5322	0,1679	$\hat{y} = 13,58 * 1,04^{WW}$

Fonte: A autora (2026). $\hat{y}$: área foliar estimada; β_0 e β_1 : parâmetros de regressão; ε_i : erro aleatório; L: comprimento da folha; W: largura da folha; LW: produto do comprimento pela largura; LL: quadrado do comprimento; WW: quadrado da largura.

Os modelos de regressão linear sem intercepto e potência apresentaram alta correlação linear entre a AF e LW, com coeficientes de determinação (R^2) de 0,9984 e 0,9921, respectivamente (Figura 5). Ademais, a homogeneidade e boa distribuição dos resíduos (inserção da Figura 5) torna essas equações confiáveis para a predição da área foliar da graviroleira.

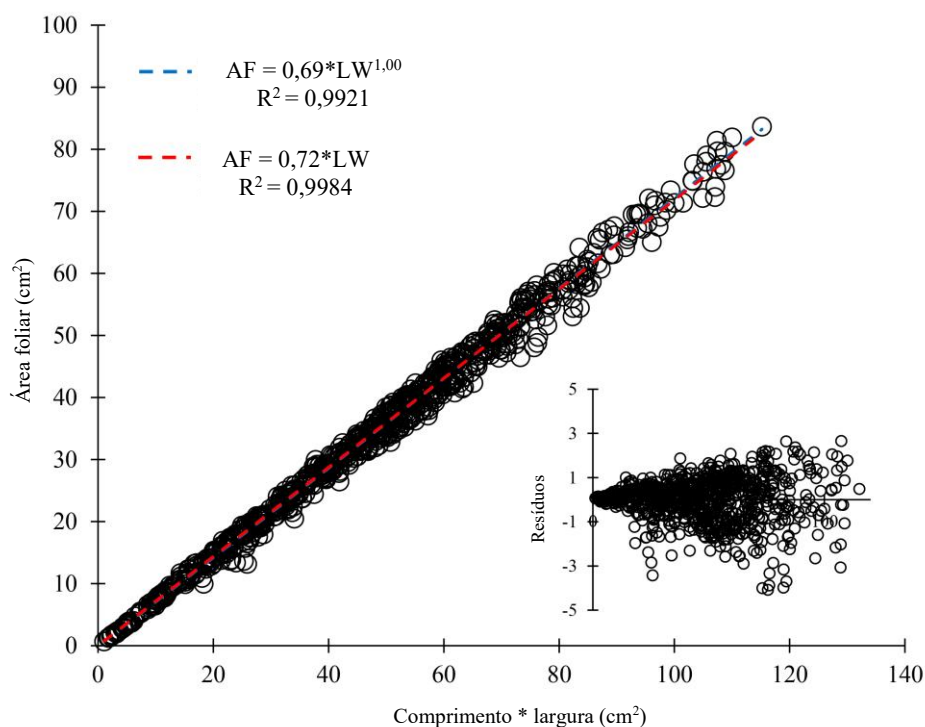


Figura 5. Relação entre a área foliar real e o produto entre comprimento e largura das folhas de graviola, a partir dos modelos linear sem intercepto e potência. A análise de dispersão dos resíduos é apresentada na inserção. Fonte: A autora (2026).

A área foliar estimada (ELA) pelas equações comparadas com área foliar observada (OLA) é mostrada na Figura 6. É evidente que a ELA pelos modelos lineares sem intercepto e potência utilizando o LW possuem correlação alta e positiva com a OLA, com R^2 (0,9961 e 0,9960) (Figuras 6A e 6B). Além disso, a ELA e OLA em ambos os modelos não apresentaram diferença significativa ($p \geq 0,01$), indicando que os modelos propostos podem ser utilizados para estimar a área foliar da graviola por meio do LW (Figura 6C).

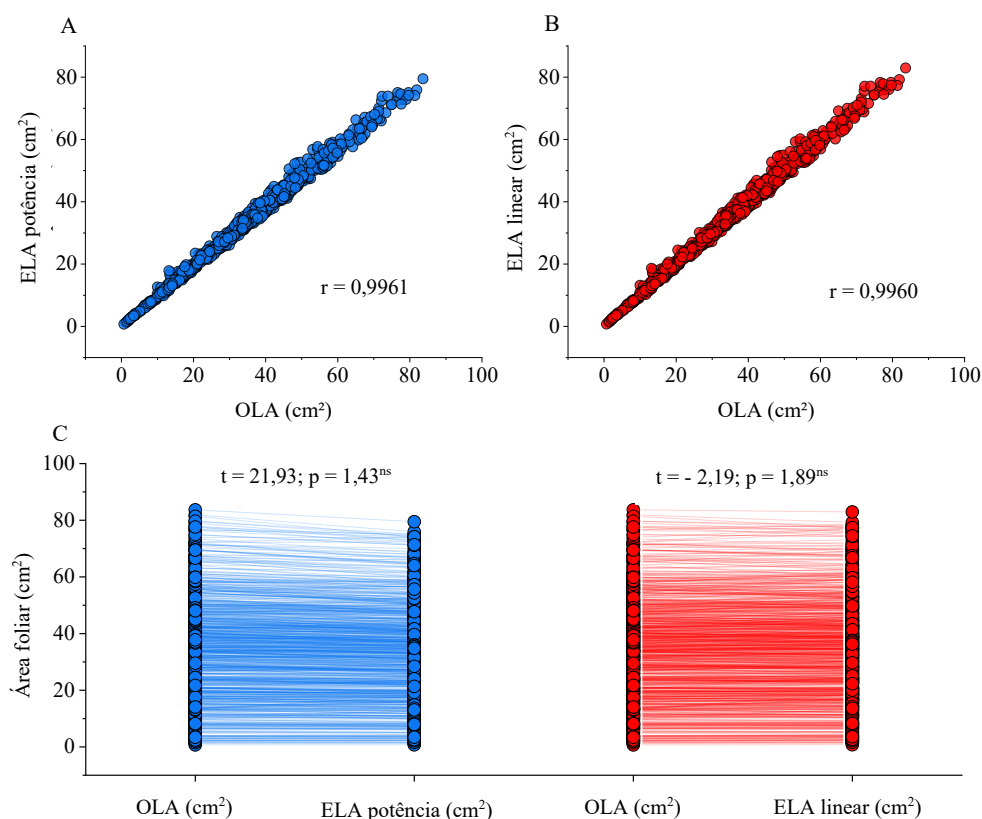


Figura 6. Relação da área foliar observada e área foliar estimada utilizando os modelos lineares sem intercepto e potência em função do produto da largura e comprimento das folhas da gravioleira (A e B). Áreas foliares comparadas pelo teste t de Student ($p \leq 0,01$)(C). ^{ns} – não significativo pelo teste t Student ($p \leq 0,01$). Fonte: A autora (2026).

DISCUSSÃO

A modelagem alométrica é uma ferramenta confiável, precisa e barata para estimação não destrutiva da área foliar de plantas (Dias *et al.*, 2022), contribuindo, assim, para pesquisas no cultivo de espécies agrícolas. Nosso estudo é um dos poucos que estimam a área foliar em mudas de gravioleira da cultivar Morada de forma não destrutiva.

A alta variabilidade observada nas variáveis independentes decorre principalmente da heterogeneidade de tamanhos das folhas, que contribui para a construção de modelos mais representativos e próximos da área real, uma vez que possuem tanto folhas grandes quanto pequenas (Gupta *et al.*, 2023, Ribeiro *et al.*, 2024). Além disso, o elevado número de folhas (825) associado às diferentes classes de tamanhos de área foliar foi eficaz para essa alta variabilidade da amostra, proporcionando ajuste de modelo eficiente para estimativa da área foliar em diversas dimensões (Barbosa *et al.*,

2020, Cabral *et al.*, 2023). Essas características dos dados coletados reduzem equações tendenciosas e com baixa confiabilidade na estimação da área foliar (Silva *et al.*, 2023).

Nosso estudo revelou a necessidade de modelos lineares e não lineares para estimar adequadamente a área foliar da graviroleira (cv. Morada), permitindo resultados mais significativos com bom ajuste e validação dos dados (Ribeiro *et al.*, 2024). Assim, foram gerados diversos modelos, porém os melhores ajustes, considerando o maior R^2 , r , d e menor AIC, RMSE e MAPE, foram encontrados nos modelos regressão linear sem intercepto e potência, que aplicaram LW. Em estudos anteriores, esses modelos também foram mais indicados para a predição da área foliar de outras espécies, como *Manilkara zapota* L. (Ribeiro *et al.*, 2023), *Spondias tuberosa* Arruda (Amorim *et al.*, 2024b), *Euterpe oleracea* (Sousa *et al.*, 2024), *Spondias* sp. (Amorim *et al.*, 2024a) e *Ipomoea batatas* L. (Ribeiro *et al.*, 2024).

Além de tudo, a relação entre AF e LW dos modelos e equações escolhidas confirmam que a AF das mudas de graviroleira cv. 'Morada' pode ser estimada utilizando o LW, pois os R^2 explicaram mais de 99% da variabilidade dos dados. Os resultados obtidos corroboram com a pesquisa de Jaime-Guerreiro *et al.* (2023), que também comprovaram que para estimar a área foliar de *Passiflora edulis* fo. *edulis*, o maior R^2 e a melhor relação entre área foliar e variáveis independentes foram encontrados entre LW da folha. Vale destacar que as equações escolhidas, $\hat{y} = 0,72 * LW$ e $\hat{y} = 0,69 * LW^{1,00}$, apresentaram homocedasticidade e boa dispersão de resíduos, indicando que os valores são homogêneos e reiterando o bom ajuste dos modelos selecionados (Junges; Anzanello, 2021).

No entanto, o estudo também fornece resultados significativos para modelos que utilizam dimensões foliares únicas, sugerindo que modelos ajustados podem ser usados para estimar a área foliar de mudas de graviroleira da cultivar Morada. Esses modelos baseados em dimensões simples das folhas, como comprimento e largura, facilitam uma avaliação rápida e precisa do crescimento das plantas (Junges; Anzanello, 2021, Gonçalves *et al.*, 2022, Puntel *et al.*, 2023). Contudo, nosso estudo demonstrou maior precisão em modelos bidimensionais, o que pode estar associado a uma maior quantidade de informações fornecidas.

No ajuste e validação dos modelos lineares sem intercepto e potência a correlação positiva e semelhança estatística entre OLA e ELA, os modelos podem ser considerados confiáveis e precisos para estimar a área foliar de mudas de graviroleira. Segundo Soysal

(2024), a validação da precisão de um modelo de área foliar é um passo importante para superar as implicações das equações produzidas para a predição da área foliar.

Vale ressaltar que as equações alométricas propostas neste estudo foram ajustadas a partir de dados obtidos em mudas de graviroleira da cultivar ‘Morada’, cultivadas nas condições experimentais já descritas. Portanto, a aplicação desses modelos a plantas adultas, indivíduos cultivados em campo ou outras cultivares deve ser realizada com precaução, uma vez que variações morfológicas e fisiológicas entre estádios de desenvolvimento, ambientes de cultivo e materiais genéticos podem comprometer a precisão das estimativas. Portanto, são necessários estudos adicionais para validar essas equações para diferentes fases fenológicas, sistemas de cultivo e cultivares. Por fim, vale ressaltar que a estimativa da área foliar utilizando equações alométricas para mudas de graviola da cultivar Morada é essencial para pesquisadores e produtores.

Estudos morfofisiológicos de folhas têm despertado interesse agrônomo, especialmente no que diz respeito ao uso de recursos naturais como água, nutrientes e luz (Dias *et al.*, 2022), uma vez que influenciam diretamente o desempenho, o rendimento e a produtividade das plantas.

CONCLUSÕES

Um método não destrutivo que utiliza equações alométricas do modelo linear sem intercepto e potência pode estimar com precisão e segurança a área foliar de mudas de graviroleira.

As equações alométricas $\hat{y} = 0,72 * LW$ e $\hat{y} = 0,69 * LW^{1,00}$ são as mais adequadas para a estimativa precisa e rápida da área foliar da graviroleira.

Em geral, os modelos propostos são recomendados para uso prático, pois constituem uma alternativa simples, eficiente, de baixo custo e não destrutiva aos métodos diretos, permitindo medições repetidas ao longo do desenvolvimento da muda e contribuindo para estudos agrônômicos.

REFERÊNCIAS

- AFZAAL, M. *et al.* Nutritional and therapeutic potential of soursop. **Journal of Food Quality**, v. 2022, n. 1, p. 8828358, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/8828358>
- ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- AMORIM, P. E. C. *et al.* Allometric models for non-destructive estimation of leaflet area of umbu-cajazeira (*Spondias* sp.). **Ciência e Agrotecnologia**, v. 48, p. e009924, 2024a. <https://doi.org/10.1590/14137054202448009924>
- AMORIM, P. E. C. *et al.* A non-destructive method for leaflet area prediction of *Spondias tuberosa* Arruda: an approach to regression models. **Bragantia**, v. 83, p. e20230269, 2024b. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.20230269>
- BARBOSA, A. J. S.; SANTOS, J. N. B.; ALBUQUERQUE, M. B. Allometric relations in leaves of *Erythroxylum paufferrense*: Endemic species of Alto-Montana Forest in the northeast region, Brazil. **Floresta e Ambiente**, v. 27, n. 1, p. e20171130, 2020. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.113017>
- CABRAL, M. O. *et al.* Allometric model for estimating leaf area of ora-pro-nobis genotypes. **Horticultura Brasileira**, v. 41, p. e2601, 2023. <https://doi.org/10.1590/s0102-0536-2023-e2601>
- CLIMATE-DATE. **Clima Mossoró-RN**. 2024. Disponível em: <https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/rio-grande-do-norte/mossoro-4448/>. Acesso em: 15 Novembro, 2024.
- DELGADO, J. P. M. *et al.* Morphology and Allometry of Juvenile Açaí Palms Under Cultivation Conditions in Central Amazonia. **Horticulturae**, v. 10, n. 10, p. 1119, 2024. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10101119>
- DIAS, M. G. *et al.* Leaf area estimation of *Congea tomentosa* using a non-destructive method. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 26, p. 729-734, 2022. <https://doi.org/10.1590/18071929/agriambi.v26n10p729-734>
- GILL, J. L. Outliers, residuals, and influence in multiple regression. **Zeitschrift fuer Tierzuechtung und Zuechtungsbiologie**, v. 103, n. 3, p. 161-175, 1986. 10.1111/j.1439-0388.1986.tb00079.x
- GONÇALVES, M. P.; RIBEIRO, R. V.; AMORIM, L. Non-destructive models for estimating leaf area of guava cultivars. **Bragantia**, v. 81, p. e2822, 2022. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.20210342>
- GUPTA, R. *et al.* Non-destructive mathematical models to estimate leaf area in noni (*Morinda citrifolia*). **Acta Physiol Plant**, v. 45, n. 9, p. 109, 2023. <https://doi.org/10.1007/s11738-023-03585-w>

JAIME-GUERRERO, M.; ÁLVARES-HERRERA, J. G.; CAMACHO-TAMAYO, J. H. Modelo no destructivo para estimar el área foliar individual mediante parámetros alométricos en gulupa (*Passiflora edulis* fo. *edulis*). **Actualidad y Divulgación UDCA**, v. 26, n. 2, p. 9, 2023. <https://doi.org/10.31910/rudca.v26.n2.2023.2356>

JUNGES, A. H.; ANZANELLO, R. Non-destructive simple model to estimate the leaf area through midvein in cultivars of *Vitis vinifera*. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 43, n. 5, p. e-795, 2021. <https://doi.org/10.1590/0100-29452021795>

LEAL, F.; PAULL, R. E. The soursop (*Annona muricata*): Botany, horticulture, and utilization. **Crop Science**, v. 63, n. 2, p. 362-389, 2023. <https://doi.org/10.1002/csc2.20894>

MARQUARDT, D.W. Generalized inverses, ridge regression, biased linear estimation, and nonlinear estimation. **Technometrics**, v. 12, n. 3, p. 591-612, 1970. <https://doi.org/10.1080/00401706.1970.10488699>

NOVAIS, R. F.; NEVES, J. C. L.; BARROS, N. F. Ensaio em ambiente controlado. In: Oliveira, A. J.; Garrido, W. E.; Araujo, J. D.; Lourenco, S. **Métodos de pesquisa em fertilidade do solo**. Brasília: Embrapa-SEA, 1991. p. 189-254.

PUNTEL, S. *et al.* Non-destructive models for leaf area estimation in chickpea cultivars (*Cicer arietinum* L.). **Revista Ceres**, v. 70, p. e70518, 2023. <https://doi.org/10.1590/0034737X202370050018>

R Core Team. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2024. Disponível em: <https://www.r-project.org/>. Acesso em: 06 outubro, 2024.

RIBEIRO, J. E. S. *et al.* Nondestructive method for estimating the leaf area of sapodilla from linear leaf dimensions. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 27, p. 209-215, 2023. <https://doi.org/10.1590/18071929/agriambi.v27n3p209-215>

RIBEIRO, J. E. S. *et al.* Leaf area prediction of sweet potato cultivars: An approach to a non-destructive and accurate method. **South African Journal of Botany**, v. 172, p. 42-51, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2024.07.006>

RODRIGUEZ-PAEZ, L. A. *et al.* Leaf Area Estimation of Yellow Oleander *Thevetia peruviana* (Pers.) K. Schum Using a Non-Destructive Allometric Model. **Forests**, v. 15, n. 1, p. 57, 2023. <https://doi.org/10.3390/f15010057>

SANTOS, I. L. *et al.* Soursop (*Annona muricata*) properties and perspectives for integral valorization. **Foods**, v. 12, n. 7, p. 1448, 2023. <https://doi.org/10.3390/foods12071448>

SHAPIRO, S. S., WILK, M. B. Analysis of variance test for normality. **Biometrika**, v. 52, n. 3-4, p. 591-611, 1965. <https://doi.org/10.2307/2333709>

SILVA, T. I. *et al.* Non-destructive method for estimating chrysanthemum leaf area. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 27, p. 934-940, 2023. <https://doi.org/10.1590/18071929/agriambi.v27n12p934-940>

SCHNEIDER, C. A.; RASBAND, Wayne S.; ELICEIRI, Kevin W. NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. **Nature methods**, v. 9, n. 7, p. 671-675, 2012. <https://doi.org/10.1038/nmeth.2089>

SOUSA, S. K. *et al.* Allometric models for non-destructive estimation of the leaflet area in acai (*Euterpe oleracea* Mart.). **Trees**, v. 38, n. 1, p. 169-178, 2024. <https://doi.org/10.1007/s00468-023-02474-6>

SOUZA, C. C. *et al.* Avaliação de métodos de determinação de água disponível e manejo da irrigação em terra roxa sob cultivo de algodoeiro herbáceo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 4, p. 338-342, 2000. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662000000300006>

SOYSAL, D. A Non-destructive Leaf Area Prediction Model and Some Physical Leaf Properties in Apples. **Applied Fruit Science**, v. 66, n. 4, p. 1181-1186, 2024. <https://doi.org/10.1007/s10341-024-01103-x>

CAPÍTULO II

MODELOS ALOMÉTRICOS PARA ESTIMATIVA NÃO DESTRUTIVA DA ÁREA DE FOLÍOLOS DA UMBU-CAJAZEIRA (*Spondias* sp.)

RESUMO

A umbu-cajazeira (*Spondias* sp.) é uma frutífera nativa do semiárido brasileiro, com grande potencial ambiental e agrossocioeconômico para região. A determinação da área foliar (AF) é importante para compreensão das interações entre o crescimento, fisiologia, nutrição das plantas e o ambiente. Assim, esta pesquisa tem como objetivo construir equações alométricas que estimem de forma não destrutiva a área dos folíolos de umbu-cajazeira (*Spondias* sp.), considerando as dimensões dos folíolos (comprimento e largura). Os folíolos foram coletados de plantas matrizes de umbu-cajazeira (*Spondias* sp.), e medidos individualmente quanto ao comprimento (L), largura (W) e AF por meio de imagens digitalizadas. Estes dados foram submetidos à análise descritiva e de regressão. A AF foi estimada utilizando os modelos de regressão linear, potência e exponencial, baseados no L e W dos folíolos. O melhor modelo e equação foi escolhido com base nos critérios de seleção: coeficiente de determinação, índice de concordância de Willmott, raiz do erro quadrático médio e erro absoluto médio. O modelo de potência usando LW apresentou a melhor equação $\hat{y} = 0,76 * LW^{0,98}$ para estimar a área dos folíolos de umbu cajazeira (*Spondias* sp.). Este estudo fornece uma abordagem confiável, precisa, rápida e não destrutiva para pesquisadores e produtores do meio agrônomo determinarem a AF da espécie.

Palavras-chave: Método não destrutivo; dimensões foliares; modelo matemático; equações alométricas; Anacardiaceae.

ABSTRACT

The umbu-cajazeira (*Spondias* sp.) is a fruit tree native to the semi-arid of Brazil, with significant environmental and agro-socioeconomic potential for the region. Determining leaflet area (LA) is essential for understanding the interactions between plant growth, physiology, nutrition, and environment. Thus, this research aims to construct allometric equations that nondestructively estimate the umbu-cajazeira (*Spondias* sp.) leaflet area, considering the leaflet dimensions (length and width). The leaflets were collected from mother plants of umbu-cajazeira (*Spondias* sp.) and individually measured for length (L), width (W), and LA using digitized images. These data were submitted for descriptive and regression analysis. The LA was estimated using, linear power, and exponential regression models based on the L and W of the leaflets. The best model and equation were chosen based on the following selection criteria: coefficient of determination, Willmott agreement index, root mean square error, and mean absolute error. The power model using LW presented the best equation $\hat{y} = 0.76 * LW^{0.98}$ to estimate the leaflet area of umbu-cajazeira (*Spondias* sp.). This study provides a reliable, accurate, fast, and non-destructive approach for agronomic researchers and growers to determine the LA of the species.

Keywords: Non-destructive method; leaflet dimensions; mathematical model; allometric equations; Anacardiaceae.

INTRODUÇÃO

A umbu-cajazeira (*Spondias* sp.), pertencente à família Anacardiaceae, é considerada um híbrido natural entre a cajazeira (*Spondias mombim* L.) e o umbuzeiro (*Spondias tuberosa* Arruda) (Santos *et al.*, 2023). É uma frutífera nativa do semiárido Nordeste brasileiro, com grande potencial ambiental, agrossocioeconômico e fitoterápico (Mendes *et al.*, 2019; Santos *et al.*, 2020; Santos *et al.*, 2023). A espécie é amplamente conhecida pelos seus frutos nutritivos que são comercializados *in natura* ou na forma de polpas, doces, sorvetes e sucos. É essencial à diversificação do agronegócio de frutas na região semiárida.

A folha é um órgão vital para as plantas, participando de processos fotossintéticos, que se refletem no crescimento, desenvolvimento e produtividade das plantas (Vieira *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2022). A determinação da área foliar é um parâmetro valioso para pesquisas agrônomicas, como análises de crescimento, ecofisiológicas, nutrição de plantas, proteção de plantas, relação planta-solo-água e adaptações da planta ao ambiente (Boyacı; Küçükönder, 2022; Das *et al.*, 2022; Gonçalves; Ribeiro; Amorim, 2022). Assim, a avaliação precisa da área foliar é necessária em vários estudos para compreender as interações entre crescimento da planta e o ambiente (Sabouri *et al.*, 2021).

A determinação da área foliar pode ser feita por métodos diretos e indiretos, bem como métodos destrutivos e não destrutivos (Marshall, 1968). No entanto, apesar de serem mais precisos e práticos, os métodos diretos e destrutivos tornam muito difíceis as medições sucessivas das mesmas folhas ao longo do desenvolvimento da planta (Gonçalves; Ribeiro; Amorim, 2022), uma vez que extraem as folhas das plantas. Por outro lado, os métodos indiretos e não destrutivos podem ser aplicados, como a modelagem, que envolve um grupo de diferentes técnicas estatísticas que usam modelos de regressão (Basak *et al.*, 2019). Este método é baseado em medições foliares que podem ser obtidas sem técnicas de amostragem destrutiva (Suárez; Casanoves; Di Rienzo, 2022) para o desenvolvimento dos modelos e equações alométricas, e parece ser mais confiável e viável em condições e orçamentos limitados devido à necessidade de ferramenta simples (Budiarto *et al.*, 2021; Sousa *et al.*, 2024). Desta forma, surge como uma solução fundamental e de fácil previsão, oferecendo um meio para compreender de forma abrangente a AF contínua durante os estádios fenológicos ao longo do ciclo da planta (Rodríguez-Páez *et al.*, 2023).

Equações alométricas para estimar a AF em função do comprimento e largura das

folhas foram desenvolvidos para diversas culturas como, por exemplo, em *Chrysanthemum morifolium* (Fanourakis; Kazakos; Nektarios, 2021), *Vitis vinifera* (Junges; Anzanello, 2021), *Salvia hispânica* L. (Goergen *et al.*, 2021), *Citrus hystrix* (Budiarto *et al.*, 2021), Apple cultivars (Boyacı; Küçükönder, 2022), *Phaseolus vulgaris* L. (Suárez; Casanoves; Di Rienzo, 2022), *Psidium guajava* L. (Gonçalves; Ribeiro; Amorim, 2022), *Musa* spp (Vieira *et al.*, 2022), *Manilkara zapota* L. (Ribeiro *et al.*, 2023a), *Coffea arabica* (Mielke *et al.*, 2023), *Dendranthema grandiflora* (Silva *et al.*, 2023), *Spondias tuberosa* Arruda (Amorim *et al.*, 2024), cultivares de batata-doce (Ribeiro *et al.*, 2024) e *Eutерpe oleracea* (Sousa *et al.*, 2024). Portanto, levantamos a hipótese de que modelos construídos utilizando comprimento e largura de folíolos são os mais confiáveis para a predição da área foliar do umbu-cajazeira. Porém, durante a busca bibliográfica, não foram encontrados estudos sobre a espécie, sugerindo que nosso estudo é pioneiro na estimativa da área foliar do umbu-cajazeira (*Spondias* sp.). Assim, esta pesquisa tem como objetivo construir equações alométricas que estimem de forma não destrutiva a área dos folíolos do umbu-cajazeira (*Spondias* sp.), considerando as dimensões dos folíolos (comprimento e largura).

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado com folíolos de árvores matrizes de umbu-cajazeira (*Spondias* sp.) provenientes da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (*campus* Mossoró) (5° 12' 19,8" S, 37° 19' 23,6" W) e da Fazenda Rafael Fernandes da UFERSA no município de Mossoró, Rio Grande do Norte, Brasil (5° 03' 39" S, 37° 24' 07" W). O clima da região é do tipo BSh (seco e muito quente) (Alvares *et al.*, 2013), com precipitação pluviométrica média anual de 555 mm e temperatura média anual de 27,8 °C (Climate-data, 2024).

Para realização das medidas alométricas, folíolos sadios, de diversos tamanhos e formas e livres de danos por doenças, pragas ou estresses ambientais foram coletados aleatoriamente. Quatrocentos e sessenta e quatro folíolos foram coletados e armazenados em sacos plásticos para evitar perda de água pela transpiração e, em seguida, levados ao Laboratório de Fruticultura da UFERSA, Mossoró, RN.

Os folíolos foram digitalizados com um *scanner* de mesa (modelo Samsung Xpress SL-C480FW), com resolução de 600 dpi. Após a obtenção das imagens, elas

foram processadas e analisadas por meio do *software* ImageJ® e transformadas em escalas em preto e branco para análise de dimensões e área dos folíolos.

Em cada folíolo, foram medidos o comprimento máximo (L) (medido da ponta do limbo até o ponto de intersecção entre o folíolo e o pecíolo), a largura máxima (W) (medida da ponta até a ponta entre a parte mais larga da lâmina precisamente perpendicular à nervura central do limbo) (Figura 1), consideradas variáveis independentes, e a área do folíolo (AF), considerada variável dependente. Posteriormente, foram calculados o produto do comprimento pela largura (LW), o produto do comprimento pelo comprimento (LL) e o produto da largura pela largura (WW).



Figura 1. Folíolo de umbu-cajazeira (*Spondias* sp.) utilizado para estimativa da área do folíolo. Fonte: A autora (2026).

A partir das dimensões foliares (L, W, LW, LL e WW) e área do folíolo (AF), foram realizadas análises descritivas, determinando-se o mínimo, máximo, média, amplitude, mediana, variância, desvio padrão, erro padrão e coeficiente de variação (CV). As equações alométricas foram construídas utilizando modelos de regressão linear simples, regressão de potência e regressão exponencial (Tabela 1).

Tabela 1. Modelos e descrições dos modelos utilizados para estimar a área dos folíolos da umbu-cajazeira (*Spondias* sp.) através das dimensões lineares dos folíolos.

Modelo	Descrição
Linear	$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 * x + \varepsilon_i$
Potência	$\hat{y} = \beta_0 * x^{\beta_1} + \varepsilon_i$
Exponencial	$\hat{y} = \beta_0 * \beta_1^x + \varepsilon_i$

Fonte: A autora (2026). $\hat{y}$: Área do folíolo; x : Dimensões lineares dos folíolos; β_0, β_1 : Coeficientes do modelo; ε_i : Erro aleatório.

O melhor modelo e equação foram selecionados utilizando os seguintes critérios: maior coeficiente de determinação (R^2) (Equação 1), índice de concordância de Willmott (d) (Equação 2), raiz do erro quadrado médio (RMSE) (Equação 3) e erro absoluto médio (MAE) (Equação 4).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y'_i)^2} \quad (1)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|\hat{y}'_i| + |y'_i|)^2} \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad (3)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |\hat{y}_i - y_i|}{n} \quad (4)$$

onde: $\hat{y}_i$ = valores estimados da área de folíolos; y_i = valores da área de folíolos observados; $\bar{y}_i$ = média dos valores observados; $\hat{y}'_i = \hat{y}_i - \bar{y}$; $y'_i = y_i - \bar{y}$; $L(x|\hat{\theta})$: função de máxima verossimilhança; p = número de parâmetros do modelo; n = número de observações; x_i e y_i observações das variáveis y e x ; $\bar{y}$ e $\bar{x}$ = média das variáveis y e x .

Os dados foram submetidos à análise descritiva e de regressão para esclarecer as relações entre área foliar dos folíolos e as variáveis independentes e ajustar o modelo estatístico apropriado. A normalidade dos dados foi verificada por meio do teste Shapiro-Wilk (Shapiro; Wilk, 1965). A área observada do folheto e a área estimada dos folíolos

foram comparadas usando o teste t de Student para amostras pareadas ($p < 0,01$). As análises foram realizadas usando o *software* R (R Core Team, 2024).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A área foliar é crítica na avaliação de características fisiológicas, ecológicas, evolutivas e anatômicas que afetam a sobrevivência e o crescimento das plantas. Este estudo descreve a aplicação de modelagem como ferramenta para permitir estimativa precisa, prática e fácil, não destrutiva, da área dos folíolos. Notavelmente, nosso estudo é o primeiro a estimar a área foliar de umbu-cajazeira (*Spondias* sp.) e um dos poucos realizados com espécies do gênero *Spondias*.

A análise descritiva com os valores do comprimento (L), largura (W), produto do comprimento pela largura (LW), produto do comprimento pelo comprimento (LL), produto da largura pela largura (WW) e área do folíolo (AF) está exposta na Tabela 2. O L dos folíolos variou de 1,49 cm a 17,36 cm, com média de 6,69 cm e amplitude de 15,87 cm. A W mínima e máxima de 0,94 cm e 8,29 cm, com média de 3,63 cm e amplitude de 7,33 cm (Tabela 2). Resultados semelhantes dos valores médios de L e W foram obtidos por Amorim *et al.* (2024) em *Spondias tuberosa* Arruda, que encontraram valores de 5,20 cm (L) e 3,25 cm (W).

Tabela 2. Análise descritiva do comprimento (L), largura (W), produto do comprimento pela largura (LW), produto do comprimento pelo comprimento (LL), produto da largura pela largura (WW) e área do folíolo (AF) de umbu-cajazeira (*Spondias* sp.).

Estatística descritiva	L	W	LW	LL	WW	AF
Mínimo	1,493	0,948	1,5184	2,229	0,8987	1,107
Máximo	17,367	8,292	133,7606	301,6127	68,7573	92,238
Amplitude	15,874	7,344	132,2423	299,3836	67,8586	91,131
Mediana	5,6445	3,3005	19,4033	31,8604	10,8933	13,8185
Média	6,6963	3,6304	30,0632	57,4654	15,9771	21,1385
Variância	12,6519	2,803	903,6045	3857,549	219,1841	433,7355
Desvio padrão	3,557	1,6742	30,06	62,1092	14,8049	20,8263
Erro padrão	0,1651	0,0777	1,3955	2,8833	0,6873	0,9668
Coeficiente de variação	53,12%	46,12%	99,99%	108,08%	92,66%	98,52%

Fonte: A autora (2026).

O produto do comprimento pela largura (LW) variou de 1,51 cm² a 133,76 cm², com média de 30,06 cm² e amplitude de 132,24 cm². Os valores do produto do comprimento pela largura (LL) variaram de 2,22 a 301,61 cm², com média de 57,46 cm² e amplitude de 299,38 cm². O produto da largura pela largura (WW) variou de 0,89 cm² a 68,75 cm², com média de 15,97 cm² e amplitude de 67,85 cm². A área do folíolo (AF) variou de 1,10 cm² a 68,75 cm², com média de 15,97 cm² e amplitude de 67,85 cm² (Tabela 2).

O menor coeficiente de variação (CV) foi observado em L (53,12%) e W (46,12%), e o maior CV foi encontrado em LL (108,08%), LW (99,99%), AF (98,52%) e WW (92,66%) (Tabela 2). Nossos resultados indicam alta variabilidade nos dados das variáveis LL, LW, WW e AF, possivelmente devido aos diferentes formatos e tamanhos dos folíolos, o que é essencial para a constituição dos modelos e equações confiáveis e precisos, pois abrange folhas pequenas, médias e grandes (Goergen *et al.*, 2021). Isto garante a representatividade das condições encontradas em campo, além da possibilidade de realizar medições em diferentes folíolos do início ao fim do ciclo de vida da planta (Junges; Anzanello, 2021; Ribeiro *et al.*, 2023b).

Padrões de associação lineares e não lineares entre os valores das variáveis independentes e dependentes foram utilizados para construir os modelos de regressão para estimar a AF (Figura 2). Padrões lineares foram observados entre LW e AF, LL e AF, e WW e AF, ao passo que L e AF, e W e AF indicam um padrão não linear (Figura 2). Estes resultados revelaram a necessidade da utilização de padrões lineares e não lineares, sugerindo que para estimar a área dos folíolos da umbu-cajazeira (*Spondias* sp.) é fundamental utilizar diferentes modelos de regressão para ajustar e validar os dados (Ribeiro *et al.*, 2023a).

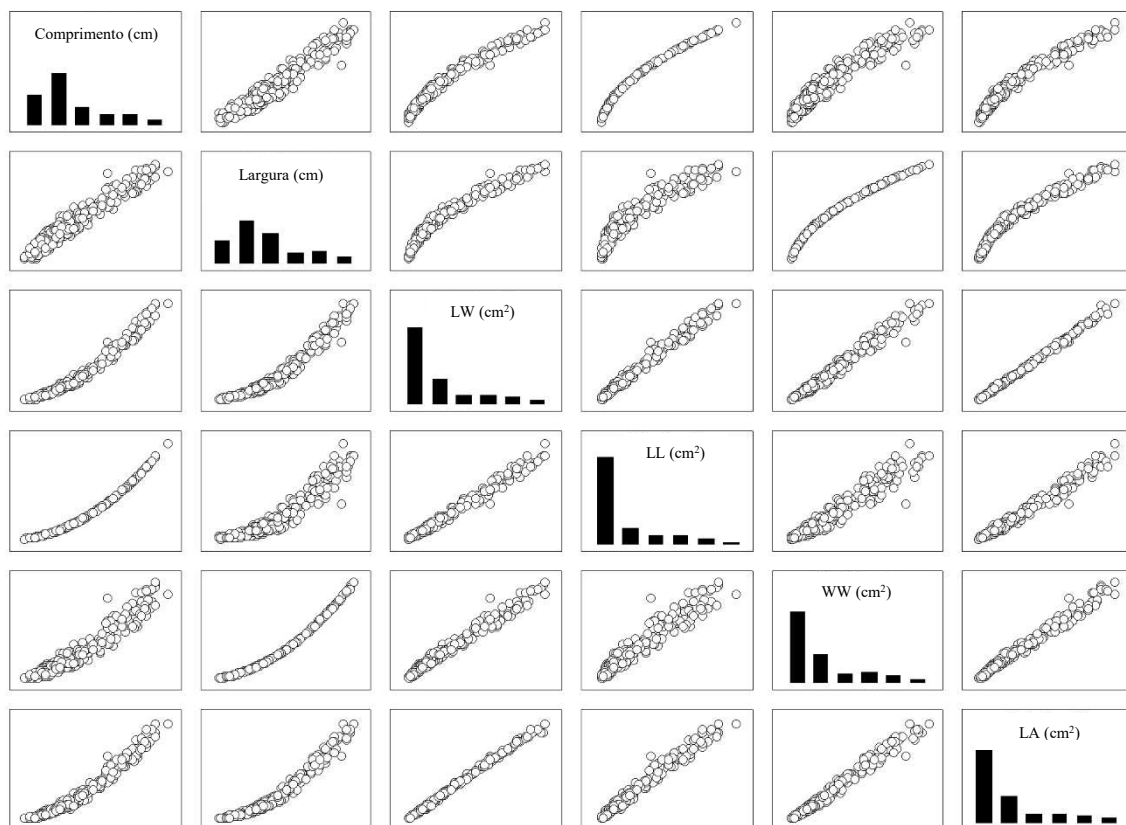


Figura 2. Histograma de frequência (diagonal) e dispersão de dados entre comprimento (L), largura (W), produto de comprimento e largura (LW), produto do comprimento entre comprimento (LL), produto da largura e largura (WW) e área do folíolo (AF) de umbu-cajazeira (*Spondias* sp.). Fonte: A autora (2026).

As equações obtidas foram apresentadas na Tabela 3, com base nos modelos de regressão linear, potência e exponencial. O modelo potência foi o melhor modelo para estimar a área do folíolo segundo os critérios de seleção, tendo como variável independente o produto do comprimento pela largura (LW). Este modelo apresentou os maiores R^2 (0,9980) e d (0,9995), além de menores RMSE (0,9250) e MAE (0,4922), sendo, portanto, mais preciso e exato.

O modelo escolhido apresenta bom ajuste, sendo considerado um modelo simples e de alta precisão (Gonçalves; Ribeiro; Amorim, 2022). Resultados semelhantes foram demonstrados em outras plantas, como *Capsicum annuum* L. (Basak *et al.*, 2019), *Khaya senegalensis* (Adji *et al.*, 2021), *Citrus hystrix* (Budiarto *et al.*, 2021), *Vitis vinifera* (Junges; Anzanello, 2021), *Musa* spp (Vieira *et al.*, 2022), *Psidium guajava* L. (Gonçalves; Ribeiro; Amorim, 2022), Apple cultivars (Boyacı; Küçükönder, 2022) e *Cassia fistula* L. (Ribeiro *et al.*, 2023b).

Tabela 3. Modelo de regressão, equações, coeficiente de determinação (R^2), índice de concordância de Willmott (d), raiz do erro quadrático médio (RMSE) e erro absoluto médio (MAE) obtidos em função das medidas de tamanho do folíolo de umbu-cajazeira (*Spondias* sp.).

Modelo	x ¹	R ²	d	RMSE	MAE	Equação
Linear	L	0,9527	0,9877	4,5190	3,5180	$\hat{y} = -17,13 + 5,71 \cdot L$
Linear	W	0,9286	0,9812	5,5518	4,4795	$\hat{y} = -22,38 + 11,99 \cdot W$
Linear	LW	0,9979	0,9994	0,9600	0,5327	$\hat{y} = 0,33 + 0,69 \cdot LW$
Linear	LL	0,9803	0,9950	2,9177	2,0032	$\hat{y} = 2,06 + 0,33 \cdot LL$
Linear	WW	0,9830	0,9957	2,7109	1,8709	$\hat{y} = -1,14 + 1,39 \cdot WW$
Potência	L	0,9824	0,9955	2,7585	1,8175	$\hat{y} = 0,58 \cdot L^{1,79}$
Potência	W	0,9830	0,9956	2,7136	1,7915	$\hat{y} = 1,15 \cdot W^{2,09}$
Potência	LW	0,9980	0,9995	0,9250	0,4922	$\hat{y} = 0,76 \cdot LW^{0,98}$
Potência	LL	0,9824	0,9955	2,7585	1,8174	$\hat{y} = 0,58 \cdot LL^{0,90}$
Potência	WW	0,9824	0,9955	2,7584	1,8174	$\hat{y} = 0,58 \cdot WW^{1,80}$
Exponencial	L	0,9528	0,9863	4,6765	3,5016	$\hat{y} = 4,98 \cdot 1,20^L$
Exponencial	W	0,9547	0,9867	4,6003	3,5310	$\hat{y} = 3,92 \cdot 1,49^W$
Exponencial	LW	0,9029	0,9698	6,7244	5,4412	$\hat{y} = 10,76 \cdot 1,02^{LW}$
Exponencial	LL	0,8748	0,9604	7,5962	5,8759	$\hat{y} = 11,54 \cdot 1,01^{LL}$
Exponencial	WW	0,8838	0,9632	7,3473	5,8543	$\hat{y} = 10,49 \cdot 1,04^{WW}$

Fonte: A autora (2026). x: variáveis independentes (L, W, LW, LL e WW).

A equação alométrica obtida por meio do modelo potência ($\hat{y} = 0,76 \cdot LW^{0,98}$) utilizando LW é a mais adequada para estimar a área dos folíolos de umbu-cajazeira (*Spondias* sp.) (Tabela 3), apresentando um coeficiente de determinação superior a 0,99. Essa informação dá a entender que a equação explicou no mínimo 99% das variações na área dos folíolos. Isso significa que o produto comprimento e largura da folha é um parâmetro importante para calcular com precisão a área foliar (He *et al.*, 2020). Este resultado é consistente com os estudos sobre *Moringa oleifera* (Macário *et al.*, 2020), espécies de Magnoliaceae (He *et al.*, 2020), *Chrysanthemum morifolium* (Fanourakis; Kazakos; Nektarios, 2021), *Salvia hispânica* L. (Goergen *et al.*, 2021), *Phaseolus vulgaris* L. (Suárez, Casanoves; Di Rienzo, 2022), Apple cultivars (Boyacı; Küçükönder, 2022), *Psidium guajava* L. (Gonçalves; Ribeiro; Amorim, 2022), *Dendranthema grandiflora* (Silva *et al.*, 2023), *Manilkara zapota* L. (Ribeiro *et al.*, 2023a) e *Euterpe oleracea* (Sousa *et al.*, 2024).

Vale ressaltar que os modelos de regressão linear simples e potência com dimensões lineares únicas (L e W) apresentaram ajustes adequados para estimar área dos folíolos de umbu-cajazeira (*Spondias* sp.) (Tabela 3). Tais modelos facilitariam e proporcionariam rapidez, praticidade e análises mais diretas e seriam considerados alternativas adequadas para diferentes culturas (Junges; Anzanello, 2021; Suárez, Casanoves; Di Rienzo, 2022; Vieira *et al.*, 2022). No entanto, a aplicação de modelos de unidimensionais leva à validação sobrecarregada, baixa precisão e área foliar não representada na sua totalidade (Fanourakis; Kazakos; Nektarios, 2021; Amorim *et al.*, 2024). Além disso, ao incorporar ambas as dimensões, os coeficientes de determinação são maiores do que aqueles envolvendo apenas uma dimensão (Rodrigues-Páez *et al.*, 2023), o que pode ser comprovado no nosso estudo.

A equação proposta para estimar a AF da umbu-cajazeira (*Spondias* sp.) por meio de LW apresentou alta relação e bom ajuste dos dados, com coeficiente de determinação ($R^2 = 0,9980$) (Figura 3A). Além disso, houve variância residual homogênea e pouca dispersão dos dados (Figura 3B), o que torna essa equação muito confiável para prever a AF de umbu-cajazeira (*Spondias* sp.).

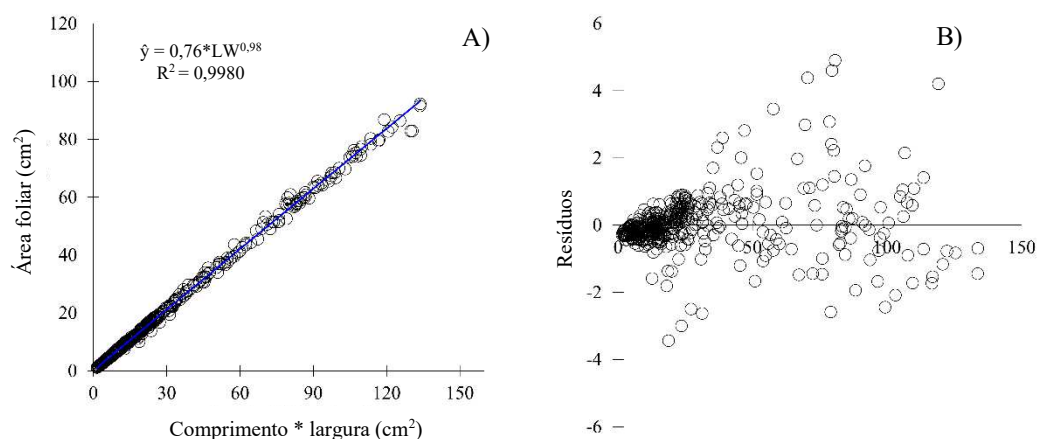


Figura 3. Relação entre a área real dos folíolos e o produto entre comprimento e largura dos folíolos de umbu-cajazeira (*Spondias* sp.), com base no modelo de potência (A). A análise de dispersão dos resíduos é apresentada no encarte (B). Fonte: A autora (2026).

Ressalta-se que a escolha desta equação ($\hat{y} = 0,76 * LW^{0,98}$) confirma que o comprimento e largura estão fortemente correlacionados com a área foliar (Gomes *et al.*, 2020). Além disso, a avaliação dos resíduos serve como abordagem complementar para examinar a adequação geral do modelo (Rodrigues-Páez *et al.*, 2023), o que em nosso estudo foi considerado apropriado (Figura 3B), uma vez que houve homocedasticidade na distribuição do erro residual, o que indica que a distribuição dos dados atendeu ao padrão esperado de normalidade (Sousa *et al.*, 2024).

A relação e comparação entre os valores observados e estimados são mostradas na Figura 4. Foi verificado que o AF estimado apresentou correlação forte e muito alta com os valores observados, mostrando que pode ser estimado com precisão ($R^2 = 0,9980$) (Figura 4A). Além disso, não houve diferenças significativas entre AF observada e estimada no modelo escolhido, confirmando valores semelhantes e relações significativas. Portanto, o modelo de potência pode ser usado com precisão para estimar a área do folíolo de umbu-cajazeira (*Spondias* sp.) (Figura 4B).

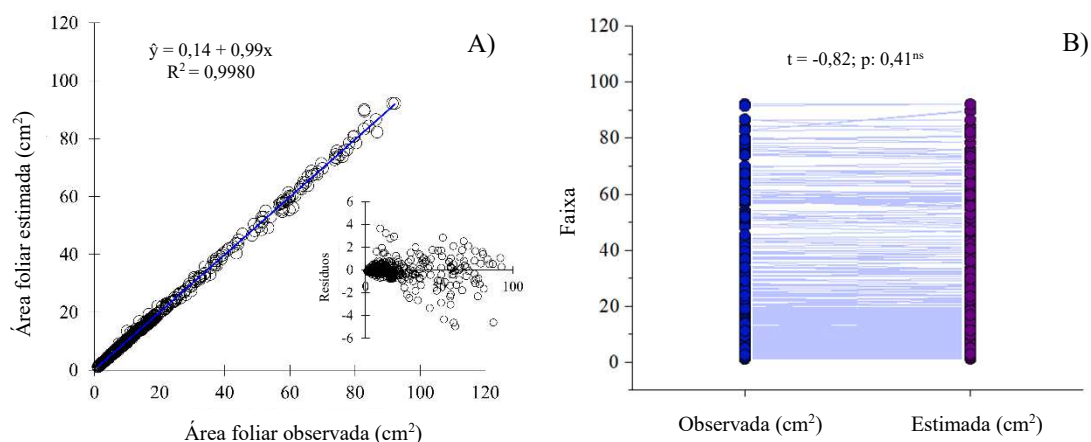


Figura 4. Relação entre área foliar observada e área foliar estimada utilizando o modelo potência em função do LW (A) e comparação entre área foliar observada e área foliar estimada de folíolos de umbu-cajazeira (*Spondias* sp.) usando o teste t de Student ($p < 0,01$) (B). Fonte: A autora (2026).

Boyacı e Küçükönder (2022), ao estudarem cultivares de maçã, também encontraram coeficientes de determinação entre os valores de área foliar previstos e estimados próximos a 1,0 para o modelo de potência, indicando que ele é confiável e eficaz para estimar a área foliar. Essa informação é confirmada por autores que estudaram

o ajuste de modelos de regressão para estimar a área foliar das espécies *Dendranthema grandiflora* (Silva *et al.*, 2023) e *Manilkara zapota* L. (Ribeiro *et al.*, 2023a).

CONCLUSÕES

A equação alométrica do modelo potência ($\hat{y} = 0,76 * LW^{0,98}$), utilizando o L, foi o melhor método de modelagem não destrutivo para estimar com precisão e confiabilidade a área dos folíolos de plantas de umbu-cajazeira (*Spondias* sp.).

A equação é prática, precisa e exata na obtenção da área dos folíolos sem destruir as plantas de umbu-cajazeira (*Spondias* sp.), contribuindo para pesquisas atuais e futuras em agronomia e meio ambiente.

REFERÊNCIAS

- ADJI, B. I. *et al.* Allometric models for non-destructive estimation of dry biomass and leaf area in *Khaya senegalensis* (Desr.) A. Juss., 1830 (Meliaceae), *Pterocarpus erinaceus* Poir., 1804 (Fabaceae) and *Parkia biglobosa*, Jack, R. Br., 1830 (Fabaceae). **Trees**, v. 35, n. 6, p. 1905-1920, 2021. <https://doi.org/10.1007/s00468-021-02159-y>
- ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- AMORIM, P. E. C. *et al.* A non-destructive method for leaflet area prediction of *Spondias tuberosa* Arruda: an approach to regression models. **Bragantia**, v. 83, p. e20230269, 2024b. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.20230269>
- BASAK, J. K. *et al.* Regression analysis to estimate morphology parameters of pepper plant in a controlled greenhouse system. **Journal of Biosystems Engineering**, v. 44, n. 2, p. 57-68, 2019. <https://doi.org/10.1007/s42853-019-00014-0>
- BOYACÏ, S.; KÜÇÜKÖNDER, H. A. A research on non-destructive leaf area estimation modeling for some apple cultivars. **Erwerbs-obstbau**, v. 64, n. 1, p. 1-7, 2022. <https://doi.org/10.1007/s10341-021-00619-w>
- BUDIARTO, R. *et al.* Allometric model to estimate bifoliate leaf area and weight of kaffir lime (*Citrus hystrix*). **Biodiversitas Journal of Biological Diversity**, v. 22, n. 5, p. 2815-2820, 2021. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d220545>
- CLIMATE-DATE. **Clima Mossoró-RN**. 2024. Disponível em: <https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/rio-grande-do-norte/mossoro-4448/>. Acesso em: 15 Novembro, 2024.
- DAS, M. *et al.* A machine learning approach for the non-destructive estimation of leaf area in medicinal orchid *Dendrobium nobile* L. **Applied Sciences**, v. 12, n. 9, p. 4770, 2022. <https://doi.org/10.3390/app12094770>
- FANOURAKIS, D.; KAZAKOS, F.; NEKTARIOS, P. A. Allometric individual leaf area estimation in chrysanthemum. **Agronomy**, v. 11, n. 4, p. 795, 2021. <https://doi.org/10.3390/agronomy11040795>
- GOERGEN, P. C. *et al.* Allometric relationship and leaf area modeling estimation on chia by non-destructive method. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 25, n. 5, p. 305-311, 2021. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v25n5p305-311>
- GOMES, F. R. *et al.* Estimativa da área foliar de *Anacardium humile*. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 42, p. e-628, 2020. <https://doi.org/10.1590/0100-29452020628>
- GONÇALVES, M. P.; RIBEIRO, R. V.; AMORIM, L. Non-destructive models for estimating leaf area of guava cultivars. **Bragantia**, v. 81, p. e2822, 2022. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.20210342>

HE, J. *et al.* A general formula for calculating surface area of the similarly shaped leaves: Evidence from six Magnoliaceae species. **Global Ecology and Conservation**, v. 23, p. e01129, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01129>

JUNGES, A. H.; ANZANELLO, R. Non-destructive simple model to estimate the leaf area through midvein in cultivars of *Vitis vinifera*. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 43, n. 5, p. e-795, 2021. <https://doi.org/10.1590/0100-29452021795>

MACÁRIO, A. P. S. *et al.* Allometric models for estimating Moringa oleifera leaflets area. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 44, p. e005220, 2020. <https://doi.org/10.1590/1413-7054202044005220>

MARSHALL, J. K. Methods for leaf area measurement of large and small leaf samples. **Photosynthetica**, v. 2, n. 1, p. 41-47, 1968.

MENDES, N. V. B. *et al.* Agrochemicals and stem cutting types for plantlet production of *Spondias* sp. **Revista Caatinga**, v. 32, n. 4, p. 1104-1110, 2019. <https://doi.org/10.1590/1983-21252019v32n427rc>

MIELKE, M. S. *et al.* Allometric models to estimate the individual leaf area of arabica coffee: an approach from frequentist and Bayesian statistics. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 45, n. 3, p. 39, 2023. <https://doi.org/10.1007/s11738-023-03514-x>

R Core Team. **R**: A language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2024. Disponível em: <https://www.r-project.org/>. Acesso em: 06 fevereiro, 2024.

RIBEIRO, J. E. D. S. *et al.* Nondestructive method for estimating the leaf area of sapodilla from linear leaf dimensions. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 27, p. 209-215, 2023a. <https://doi.org/10.1590/18071929/agriambi.v27n3p209-215>

RIBEIRO, J. E. D. S. *et al.* A non-destructive method for predicting the leaflet area of *Cassia fistula* L.: An approach to regression models. **South African Journal of Botany**, v. 163, p. 30-36, 2023b. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2023.10.016>

RIBEIRO, J. E. D. S. *et al.* Leaf area prediction of sweet potato cultivars: An approach to a non-destructive and accurate method. **South African Journal of Botany**, v. 172, p. 42-51, 2024.

RODRIGUEZ-PAEZ, L. A. *et al.* Leaf Area Estimation of Yellow Oleander *Thevetia peruviana* (Pers.) K. Schum Using a Non-Destructive Allometric Model. **Forests**, v. 15, n. 1, p. 57, 2023. <https://doi.org/10.3390/f15010057>

SABOURI, H. *et al.* Image processing and prediction of leaf area in cereals: A comparison of artificial neural networks, an adaptive neuro-fuzzy inference system, and regression methods. **Crop Science**, v. 61, n. 2, p. 1013-1029, 2021. <https://doi.org/10.1002/csc2.20373>

SANTOS, É. M. D. *et al.* *Spondias* sp: shedding light on its vast pharmaceutical potential. **Molecules**, v. 28, n. 4, p. 1862, 2023. <https://doi.org/10.3390/molecules28041862>

SANTOS, L. J. S. *et al.* Leaf contents and biochemical cycling of nutrients in accessions of umbu and umbu-caja. **Revista Caatinga**, v. 33, p. 690-701, 2020. <https://doi.org/10.1590/1983-21252020v33n312rc>

SHAPIRO, S. S., WILK, M. B. Analysis of variance test for normality. **Biometrika**, v. 52, n. 3-4, p. 591-611, 1965. <https://doi.org/10.2307/2333709>

SILVA, T. I. D. *et al.* Non-destructive method for estimating chrysanthemum leaf area. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 27, p. 934-940, 2023. <https://doi.org/10.1590/18071929/agriambi.v27n12p934-940>

SOUSA, S. K. D. *et al.* Allometric models for non-destructive estimation of the leaflet area in acai (*Euterpe oleracea* Mart.). **Trees**, v. 38, n. 1, p. 169-178, 2024. <https://doi.org/10.1007/s00468-023-02474-6>

SUÁREZ, J. C.; CASANOVES, F.; DI RIENZO, J. Non-destructive estimation of the leaf weight and leaf area in common bean. **Agronomy**, v. 12, n. 3, p. 711, 2022. <https://doi.org/10.3390/agronomy12030711>

VIEIRA, J. G. V. *et al.* Use of mathematical models to estimate the total leaf area of banana. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 44, p. e-119, 2022. <https://doi.org/10.1590/0100-29452022119>

ZHANG, L. *et al.* Spatial variability of maize leaf area and relationship with yield. **Agronomy Journal**, v. 114, n. 1, p. 461-470, 2022. <https://doi.org/10.1002/agj2.20963>

CAPÍTULO III

ECOFISIOLOGIA DE MUDAS DE GRAVIOLEIRAS ADUBADAS COM SILICATO DE CÁLCIO SOB DIFERENTES FREQUÊNCIAS DE IRRIGAÇÃO

RESUMO

A gravioleira (*Annona muricata* L.) é uma frutífera tropical cultivada na região semiárida do Brasil, porém sensível ao déficit hídrico. Nesse contexto, a aplicação de silicato de cálcio pode promover benefícios à espécie, contribuindo para o crescimento e desenvolvimento das plantas. Portanto, objetivou-se avaliar as alterações ecofisiológicas e bioquímicas em mudas de gravioleira adubadas com silicato de cálcio sob diferentes frequências de irrigação. O experimento foi conduzido em casa de vegetação, utilizando delineamento em blocos casualizados em esquema fatorial 4 x 2, com quatro repetições. O primeiro fator foi constituído por quatro turnos de rega (TR): TR1 – irrigação diária; TR2 – irrigação a cada dois dias; TR3 – irrigação a cada quatro dias; TR4 – irrigação a cada seis dias; e o segundo fator correspondendo à presença ou ausência de silicato de cálcio (CaSiO_3), aplicado via solo, na dose de 3,5 g planta⁻¹. Foram analisados o crescimento, as trocas gasosas foliares, fluorescência da clorofila *a*, clorofila *a*, *b* e total, açúcares solúveis totais, concentração de prolina, teores de silício e cálcio foliar, índice qualidade de Dikson e de tolerância. As mudas de gravioleira submetidas ao TR3 associadas ao CaSiO_3 apresentaram melhora nas trocas gasosas, como transpiração, condutância estomática e taxa fotossintética. A adubação com CaSiO_3 regulou a síntese de prolina, incrementou a biomassa foliar e os teores de silício e cálcio no tecido foliar, conferindo maior tolerância e menor sensibilidade à seca. Os turnos de rega TR2 e TR3 foram semelhantes ao TR1 quanto à altura da planta, número de folhas, área foliar, acúmulo de biomassa, fluorescência da clorofila *a*, conteúdo de clorofila *a*, *b* e total, açúcares solúveis totais e índice de qualidade de Dickson, ao passo que TR4 reduziu significativamente essas variáveis, independentemente da adubação com CaSiO_3 . Portanto, a aplicação do CaSiO_3 no estresse moderado (TR3) aumenta a tolerância das mudas de gravioleira sob regimes de irrigação deficitários.

Palavras-chave: *Annona muricata* L., CaSiO_3 , turno de rega, estresse hídrico.

ABSTRACT

The soursop tree (*Annona muricata* L.) is a tropical fruit tree cultivated in the semi-arid region of Brazil, but it is sensitive to water deficit. In this context, the application of calcium silicate can promote benefits to the species, contributing to the growth and development of the plants. Therefore, the objective was to evaluate the ecophysiological and biochemical changes in soursop seedlings fertilized with calcium silicate under different irrigation frequencies. The experiment was conducted in a greenhouse, using a randomized block design in a 4 x 2 factorial scheme, with four replications. The first factor consisted of four irrigation schedules (TR): TR1 – daily irrigation; TR2 – irrigation every two days; TR3 – irrigation every four days; TR4 – irrigation every six days; and the second factor corresponded to the presence or absence of calcium silicate (CaSiO_3), applied via soil, at a dose of 3.5 g plant^{-1} . Growth, leaf gas exchange, chlorophyll *a*, chlorophyll *a*, *b* and total chlorophyll fluorescence, total soluble sugars, proline concentration, leaf silicon and calcium content, Dikson quality index and tolerance were analyzed. Soursop seedlings subjected to TR3 associated with CaSiO_3 showed improvements in gas exchange, such as transpiration, stomatal conductance and photosynthetic rate. Fertilization with CaSiO_3 regulated proline synthesis, increased leaf biomass and silicon and calcium content in leaf tissue, conferring greater tolerance and less sensitivity to drought. Irrigation schedules TR2 and TR3 were similar to TR1 in terms of plant height, number of leaves, leaf area, biomass accumulation, chlorophyll *a* fluorescence, chlorophyll *a*, *b* and total content, total soluble sugars and Dickson quality index, while TR4 significantly reduced these variables, regardless of fertilization with CaSiO_3 . Therefore, the application of CaSiO_3 under moderate stress (TR3) increases the tolerance of soursop seedlings under deficit irrigation regimes.

Keywords: *Annona muricata* L., CaSiO_3 , irrigation shift, water stress.

INTRODUÇÃO

A gravioleira (*Annona muricata* L.) é uma frutífera tropical nativa da América Central e do Sul, e atualmente cultivada em todo o mundo, incluindo a África e o Sudeste Asiático e, de forma expressiva, na região semiárida do Brasil (Patil; Dhankani; Dhankani, 2023; Sá *et al.*, 2024). Esta cultura, antigamente negligenciada ou subutilizada, possui grande potencial medicinal e contribui para a segurança alimentar, devido ao alto valor nutricional e calórico dos frutos (Yisau *et al.*, 2023; Kome *et al.*, 2024). Seus frutos quando maduros são consumidos *in natura* e, após processados, são utilizados na produção de sucos, geleias, sorvetes, doces, néctares, iogurtes, xaropes, bebidas e *shakes* (Leal; Paull, 2023; Kome *et al.*, 2024). Além disso, tanto os frutos quanto as folhas, sementes e caules possuem atividades biológicas ou farmacológicas importantes, como propriedades antibacterianas, antivirais, antifúngicos, antitumorais, anti-helmínticos, analgésicos, antiartríticos, hipotensores, anti-inflamatórias, antidiabética, antiparasitárias e pesticidas (Patil; Dhankani; Dhankani, 2023; Yisau *et al.*, 2023; Zubaidi *et al.*, 2023).

No Brasil, a gravioleira é amplamente cultivada na região Nordeste, onde contribui para complementação e geração de renda dos agricultores familiares. Nesse contexto, o setor frutícola desempenha papel crucial na economia do semiárido nordestino, tanto pelo abastecimento de mercados locais e regionais quanto pelo potencial de exportação. A região Nordeste corresponde a aproximadamente 27% da produção nacional de frutas, consolidando-se como um dos principais polos frutícolas do país (Alves *et al.*, 2025). No entanto, a gravioleira para crescer e sustentar bons rendimentos, requer uma disponibilidade hídrica adequada, sendo seu crescimento, desenvolvimento e produtividade afetados em condições de déficit hídrico (Leal; Paull, 2023; Yisau *et al.*, 2023; Freitas *et al.*, 2024). Dessa forma, torna-se um desafio produzir mudas da espécie nas áreas semiáridas brasileiras, onde os eventos pluviométricos concentram-se em um período curto e irregular, que torna de grande relevância o entendimento dessa dinâmica para o manejo agrícola (Nogueira *et al.*, 2022).

Em condições semiáridas, os agricultores são frequentemente induzidos a realizar irrigação deficitária, devido à falta de água para irrigação. Essa prática é uma estratégia potencial para permitir que as culturas resistam a um déficit hídrico leve ou moderado, embora a produtividade seja prejudicada (Basso; Chaves; Teixeira, 2021; Salem *et al.*, 2022). O déficit hídrico é um dos principais estresses abióticos na agricultura, afetando aproximadamente 30% da área de terra cultivável do mundo (Rachappanavar *et al.*, 2024).

Esse estresse pode afetar severamente os atributos morfológicos, fisiológicos, bioquímicos e moleculares da planta, com redução da capacidade fotossintética, e da condutância estomática, aumentando a concentração interna de CO₂ e a produção de biomassa (Seleiman *et al.*, 2021; Santos *et al.*, 2022; Silva *et al.*, 2022; Khallizadeh; Nasrabadi; Etesami, 2025). Ademais, provoca a produção excessiva de espécies reativas de oxigênio (EROs) (Silva *et al.*, 2022), diminuição do potencial hídrico da planta, conteúdo relativo de água nos tecidos e ocasiona seca fisiológica (Chen *et al.*, 2018). Esses efeitos prejudicam o crescimento, o desenvolvimento, a produtividade e a qualidade da planta (Seleiman *et al.*, 2021; Khallizadeh; Nasrabadi; Etesami, 2025), o que pode comprometer a sustentabilidade da agricultura e causar escassez de alimentos (Roy *et al.*, 2025). Diante desse cenário, estratégias de manejo para aumentar a tolerância das plantas ao déficit hídrico têm sido amplamente estudadas (Queiroz *et al.*, 2025).

Nesse contexto, a irrigação deficitária emerge não apenas como uma consequência da escassez hídrica, mas como estratégia de manejo racional da água, visando à mitigação dos impactos do estresse hídrico sobre o desempenho das culturas. Essa prática é uma estratégia inteligente e comum para reduzir o consumo de água e melhorar a gestão agrícola sustentável (Zhi *et al.*, 2024; Boujanara *et al.*, 2024). Evidências experimentais indicam que a irrigação deficitária, uma técnica que reduz intencionalmente o fornecimento de água abaixo das necessidades hídricas totais da cultura, apresenta elevado potencial para a economia de água, sendo progressivamente adotada em diferentes regiões do mundo (Dash *et al.*, 2026). Segundo Li *et al.* (2022b), a irrigação deficitária baseia-se na utilização controlada de recursos hídricos restritos para a obtenção de produtividade estável, sendo a definição da frequência de irrigação determinante para o crescimento das plantas e a formação da produtividade (Yuan *et al.*, 2025). Nos últimos anos, estudos demonstram que a irrigação deficitária, associada à definição da frequência de irrigação, pode oferecer benefícios significativos em cenários de disponibilidade hídrica limitada (Silva *et al.*, 2023; Costa *et al.*, 2024; Dash *et al.*, 2026).

Todavia, mesmo com o manejo racional da irrigação, as plantas continuam sujeitas a condições de estresse hídrico, especialmente na fase inicial de desenvolvimento, o que impulsiona a busca por estratégias complementares de mitigação. Nesse sentido, o uso do silicato de cálcio (CaSiO₃) tem se mostrado um agente promissor na mitigação de diferentes condições de estresse abiótico, como o déficit hídrico (Etesami; Jeong; Rizwan, 2020; Souri *et al.*, 2021; Rachappanavar *et al.*, 2024). O silício (Si) mantém o potencial hídrico foliar, o teor de água e o teor de pigmentos fotossintéticos, além de promover os

ajustes osmóticos e reduzir o estresse oxidativo (Wang *et al.*, 2021; Foresti *et al.*, 2024), regular as trocas gasosas, os rendimentos fotoquímicos e o crescimento (Alam *et al.*, 2021; Santos *et al.*, 2022). Além disso, o Si aumenta a absorção de nutrientes e produção de biomassa (Wang *et al.*, 2021; Alizadeh *et al.*, 2025).

Enquanto o cálcio (Ca^{2+}) desempenha papel fundamental na transdução de sinais em resposta ao estresse ambiental (Zhao *et al.*, 2024). Malyukova *et al.* (2022) indicaram que o influxo de Ca^{2+} e os níveis citoplasmáticos são importantes para a transdução do ácido abscísico (ABA) em células-guarda, ao passo que o ABA pode regular a abertura estomática em células-guarda. O Ca^{2+} também desempenha papel essencial na manutenção, estabilidade e a integridade da estrutura celular (Ramírez-Builes *et al.*, 2020), favorecendo a capacidade fotossintética, aliviando os danos oxidativos e acúmulo de osmólitos (Abbas *et al.*, 2021; Zhao *et al.*, 2024).

Estudos prévios relatam que a aplicação de silicato de cálcio aumenta a tolerância à seca em diferentes espécies, como *Oryza sativa* (Yang; Guo, 2018), *Saccharum officinarum* (Verma *et al.*, 2021), *Cucumis sativus* L. (Faroutine *et al.*, 2023), *Zea Mays* L. (Marques *et al.*, 2022). No entanto, os benefícios do Si e Ca dependem da disponibilidade de água no solo, das condições ambientais e das características fisiológicas específicas da espécie (Zhao *et al.*, 2024; Silva *et al.*, 2025).

Portanto, apesar dos efeitos benéficos do silício e cálcio serem conhecidos em diversas espécies, a interação desses elementos, por meio da aplicação de silicato de cálcio em mudas de gravioleira submetidas a diferentes frequências de irrigação (turnos de rega), ainda é pouco explorada. Persiste a lacuna sobre como essa adubação influencia o ajuste osmótico e a eficiência do aparato fotossintético quando o intervalo entre regas é ampliado. Assim, nós hipotetizamos que a aplicação de silicato de cálcio atenua os efeitos da seca, melhorando a eficiência fisiológica das mudas de gravioleira. Portanto, objetivou-se avaliar as alterações ecofisiológicas e bioquímicas em mudas de gravioleira adubadas com silicato de cálcio sob diferentes frequências de irrigação.

MATERIAL E MÉTODOS

Localização e Caracterização da Área Experimental

O experimento foi conduzido em casa de vegetação no setor de produção de mudas do Departamento de Ciências Agrônômicas e Florestais da Universidade Federal

Rural do Semiárido (UFERSA), em Mossoró, Estado do Rio Grande do Norte, Brasil ($5^{\circ}12'14.2''\text{S}$ e $37^{\circ}19'29.3''\text{W}$, com altitude média de 18 m), no período de setembro a dezembro de 2023. A casa de vegetação é protegida por uma cobertura na forma de arco tipo túnel, medindo 7,0 m de largura e 18,0 m de comprimento e pé direito de 3,0 m, coberta com manta de polietileno de baixa densidade, transparente, com 0,15 mm de espessura, a estrutura é de aço galvanizado e as paredes laterais e frontais são confeccionadas com malha tipo sombrite 50%. A Figura 1 mostra a localização da área experimental e a disposição das mudas de graviola na casa de vegetação.

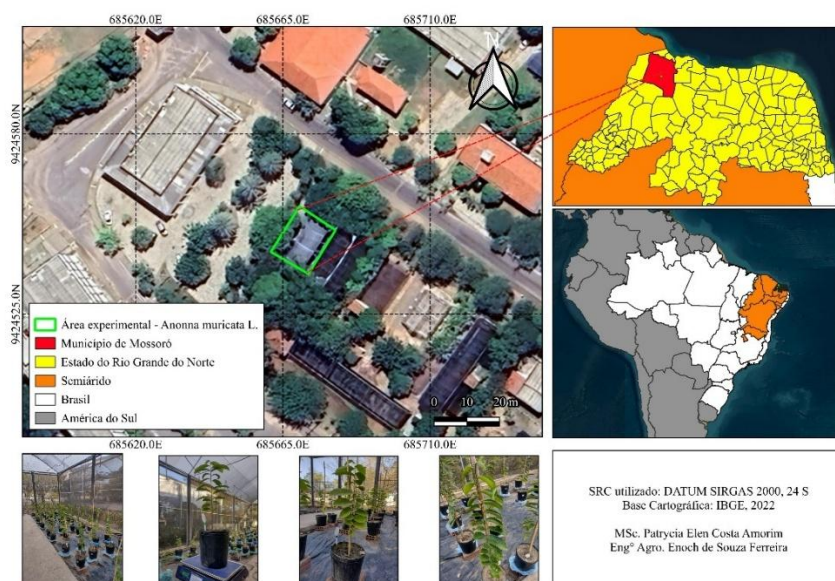


Figura 1. Mapa de localização da área experimental e disposição das mudas de graviola na casa de vegetação. Fonte: A autora (2026).

O clima da região é do tipo BSw^h (quente e seco), com precipitação média de 555 mm ano⁻¹; temperatura média anual de 27,8 °C e umidade relativa do ar média de 68,9% (Alvares *et al.*, 2013; Climate-data, 2024). Os dados climáticos de temperatura e umidade relativa do ar durante o experimento foram registrados por meio de um termo-higrômetro digital (SH-122, J-Prolab, Brasil) e são apresentados na Figura 2.

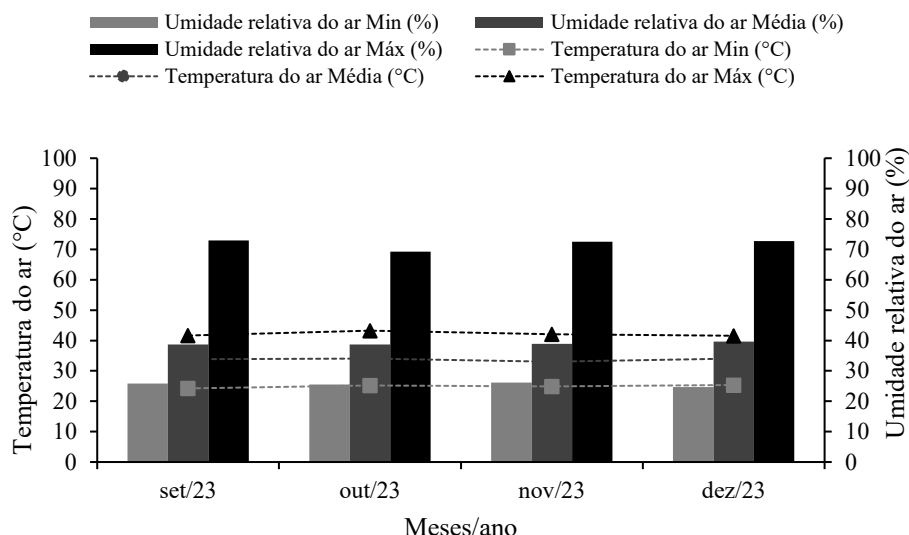


Figura 2. Temperatura e umidade relativa do ar: máxima (máx), mínima (min) e média durante o período experimental. Fonte: A autora (2026).

Material Vegetal e Tratamentos

O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados em esquema fatorial 4 x 2, com quatro repetições, e uma muda por repetição, totalizando 32 unidades experimentais. O primeiro fator foi constituído por quatro turnos de rega: TR1 – irrigação diária; TR2 – irrigação a cada dois dias; TR3 – irrigação a cada quatro dias; TR4 – irrigação a cada seis dias; e o segundo fator correspondeu à presença ou ausência de silicato de cálcio (CaSiO_3), aplicado via solo, na dose de $3,5 \text{ g planta}^{-1}$. Os turnos de rega se basearam nos estudos de Fredrick, Bamalo, Chima (2018) e Yisau *et al.* (2023), e a adubação com CaSiO_3 seguiu as recomendações de Souza *et al.* (2020).

Sementes de *A. muricata* L. (cultivar Morada), que apresentam elevada produtividade, frutos grandes, boa sanidade e qualidade física, conforme descrito por Pinto e Silva (1995) e São José *et al.* (2014), foram obtidas de frutos maduros e com bom aspecto fitossanitário de árvores localizadas na zona rural de Mossoró, Rio Grande do Norte, Brasil. As sementes foram extraídas manualmente, lavadas em água corrente para remoção de resíduos da polpa e secas a sombra sobre papel por sete dias. A semeadura foi realizada em sacos plásticos com capacidade para 2 dm^3 , preenchidos com areia e substrato comercial Tropstrato[®] na proporção de 2:1 (v/v), utilizando três sementes a $1,5 \text{ cm}$ de profundidade, sendo realizado o desbaste aos 20 dias após a emergência, mantendo apenas uma muda por saco. O substrato comercial Tropstrato[®] composto de superfosfato

simples, nitrato de potássio, turfa, vermiculita e casca de pinus, apresenta os seguintes atributos químicos: pH em $\text{CaCl}_2 = 5,75$; $\text{P} = 65,70 \text{ mg dm}^{-3}$; $\text{K} = 1,60 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; $\text{Ca} = 23,80 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; $\text{Mg} = 12,40 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; $\text{Al} = 0,00 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; $\text{H} + \text{Al} = 4,20 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; Soma de bases = $37,80 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; Capacidade de Troca Catiônica = $42,10 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e Saturação por base = 89,8%, conforme dados do fabricante, conforme o fabricante.

Aos 130 dias após o plantio, as mudas de *A. muricata* L. foram transplantadas para vasos plásticos de 5 L, os quais foram distribuídos com espaçamento de 1,0 m entre linhas e 0,5 m entre plantas. Os recipientes foram preenchidos com substrato composto por areia e Tropstrato®, na proporção de 2:1 (v/v), o qual foi pesado em cada vaso para padronização da massa. As mudas foram irrigadas diariamente até a capacidade de retenção de água (CRA) (100% de umidade do solo) por 30 dias para aclimação antes da aplicação dos tratamentos. As propriedades químicas do substrato no início e no fim do experimento estão detalhadas na Tabela 1.

Tabela 1. Características químicas do substrato antes e ao término do experimento.

Caracterização inicial														
	pH	CE	M.O.	P	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SB	T	CTC	Si	V	PST
	(H ₂ O)	(dS m ⁻¹)	(g kg ⁻¹)		(mg dm ⁻³)							(mg kg ⁻¹)	(%)	
	1:25	1:25												
	4,82	1,0	27,84	214,30	225,10	251,48	5,60	2,60	9,87	9,87	12,84	83,68	76,9	8,50
Caracterização após tratamentos														
TR1 Ausência CaSiO ₃	5,91	0,70	8,89	177,70	225,10	491,30	3,70	1,3	11,97	13,67	18,00	125,30	60,90	16,90
TR2 Ausência CaSiO ₃	5,51	1,08	11,21	245,00	214,80	470,50	4,70	2,00	7,71	9,41	12,66	104,60	66,40	14,60
TR3 Ausência CaSiO ₃	5,46	0,81	11,99	256,90	225,10	418,30	4,30	2,20	9,30	10,85	14,00	98,90	66,20	13,50
TR4 Ausência CaSiO ₃	5,33	0,83	11,60	284,20	276,60	355,80	4,50	1,30	8,90	10,70	13,43	76,75	64,40	12,40
TR1 Presença CaSiO ₃	5,45	0,91	7,35	325,90	194,20	460,00	4,60	1,60	8,05	9,80	12,51	98,05	91,30	21,00
TR2 Presença CaSiO ₃	5,44	0,84	17,01	243,30	214,80	439,20	4,40	1,30	8,70	8,70	9,52	89,67	90,80	21,30
TR3 Presença CaSiO ₃	5,40	0,80	18,56	293,60	245,70	418,30	4,20	1,60	8,16	8,16	8,98	101,60	90,90	20,10
TR4 Presença CaSiO ₃	5,48	0,67	17,79	251,00	225,10	397,50	4,20	2,00	8,25	8,25	9,07	109,90	75,20	15,30

Fonte: A autora (2026). TR1 – irrigação diária; TR2 – irrigação a cada dois dias; TR3 – irrigação a cada quatro dias e TR4 – irrigação a cada seis dias. Ausência de CaSiO₃ e presença de CaSiO₃. Al³⁺, (H + Al) e m = 0, P, K⁺, Na⁺: extrator Mehlich 1; Al³⁺, Ca²⁺, Mg²⁺: extrator KCl 1,0 mol L⁻¹; CE: Condutividade elétrica; SB: Soma de base; T: CTC: Capacidade de troca de cátions; M.O.: Matéria orgânica; PST: Percentagem de sódio trocável.

Manejo da irrigação e fertilização

Aos 30 dias após o transplântio das mudas (DAT), iniciou-se a irrigação, conforme o turno de rega estabelecido para cada tratamento, utilizando-se água de abastecimento local (Tabela 2). A irrigação foi realizada manualmente com uma proveta graduada, uma vez ao dia à tarde. Durante esse processo, manteve-se 100% da capacidade de retenção de água (CRA) do substrato, conforme o método gravimétrico (Souza *et al.*, 2000).

Tabela 2. Atributos químicos da água de abastecimento local utilizada na irrigação de mudas de graviola.

pH	CE	K ⁺	Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	RAS	Si
H ₂ O	dS m ⁻¹									
7,50	0,58	0,26	4,59	1,46	0,74	2,40	0,10	3,50	4,4	5,00

Fonte: A autora (2026). pH (H₂O): Potencial hidrogeniônico em água; CE: Condutividade elétrica; K⁺: potássio; Na⁺: sódio; Mg²⁺: magnésio; Ca²⁺: cálcio; Cl⁻: cloro; CO₃²⁻: carbonato; HCO₃⁻: bicarbonato; RAS: razão de adsorção de sódio; Si: silício.

Para determinar com precisão o volume de água necessário, a cada 30 dias todos os vasos foram pesados. Posteriormente, os vasos foram colocados em máxima saturação e cobertos com plásticos na abertura superior para evitar a evaporação da água. Após 24h, os vasos foram submetidos à drenagem do excesso de água, indicando que o substrato apresentou a máxima CRA, e pesados novamente. Dois vasos de referência foram selecionados por tratamento e serviram de base para o cálculo do volume de água a ser aplicado em cada evento de irrigação, permitindo ajustes precisos para manter a CRA-alvo, conforme metodologia adaptada de Souza *et al.* (2000).

O volume aplicado (VI) por vaso foi obtido pela diferença entre a média dos pesos dos vasos de referência (PVr1 e PVr2) e a média dos pesos do vaso de referência antes do evento da irrigação (PVra1 e PVra2) (Eq. 1).

$$VI = \left(\frac{PVr1 + PVr2}{2} \right) - \left(\frac{PVra1 + PVra2}{2} \right) \quad \text{Eq. 1}$$

onde:

VI - Volume de água a ser aplicado no evento de irrigação (L);

PVr1 – Peso do vaso referência 1 (kg);

PVr2 - Peso do vaso referência 2 (kg);

PVra1 - Peso do vaso referência antes do evento da irrigação 1 (kg);

PVra2 - Peso do vaso referência antes do evento da irrigação 2 (kg).

O volume total de irrigação aplicado às mudas de gravioleira, conforme tratamentos, foi quantificado ao longo do período experimental (Tabela 3).

Tabela 3. Volume total de irrigação em mudas de gravioleira adubadas com silicato de cálcio, sob diferentes frequências de irrigação, aos 120 dias.

Turno de rega	Volume de irrigação (L planta ⁻¹)	
	Adubação	
	Ausência CaSiO ₃	Presença CaSiO ₃
TR1	20.258	18.736
TR2	17.602	16.829
TR3	13.433	11.899
TR4	9.624	9.573

Fonte: A autora (2026). TR1 – irrigação diária; TR2 – irrigação a cada dois dias; TR3 – irrigação a cada quatro dias e TR4 – irrigação a cada seis dias. Ausência de CaSiO₃ e presença de CaSiO₃.

O silicato de cálcio (CaSiO₃), composto por 10-25% de óxido de cálcio (CaO) e 75-90% de dióxido de silício (SiO₂), foi aplicado ao solo ao redor do caule das mudas de gravioleira aos 30 DAT, na dosagem de 3,5 g por muda, conforme recomendação de Souza *et al.* (2020). A fertilização com nitrogênio, potássio e fósforo (NPK) foi parcelada em doze aplicações e fornecida semanalmente por meio da fertirrigação, correspondendo a 50% de 100 mg de N, 300 mg de P₂O₅ e 150 mg de K₂O por dm⁻³ de solo, conforme recomendação adaptada de Novais, Neves e Barros (1991). Para adubação com NPK, foram aplicados 400 mg de ureia (45% N), 1,250 mg de fosfato monoamônico (MAP = 12% N e 50% P₂O₅) e 650 mg de cloreto de potássio (KCl = 60% K₂O) por vaso.

Variáveis analisadas

Crescimento e produção de biomassa

Aos 120 dias após a aplicação dos tratamentos, as mudas de gravioleira foram avaliadas quanto à altura de plantas (AP), diâmetro do caule (DC), volume de raiz (VR), número de folhas (NF) e área foliar (AF). A AP foi medida da base até a inserção da gema apical com auxílio de uma trena graduada (cm). O DC foi obtido ao nível do substrato com o auxílio de um paquímetro digital (mm). O VR (cm³) foi determinado pelo método

de deslocamento de água, em que o sistema radicular previamente lavado e seco foi imerso em uma proveta graduada preenchida com um volume conhecido de água; o aumento do volume de água foi então registrado, de acordo com a metodologia descrita por Böhm (1979). O NF foi determinado por contagem direta das folhas totalmente expandidas. A AF (cm²) foi determinada após a coleta das folhas de cada planta, as quais foram digitalizadas com um scanner de mesa (Xpress SL-C480FW, Samsung Electronics, Coreia do Sul), com resolução de 600 dpi. As imagens obtidas foram posteriormente processadas e analisadas no *software* ImageJ[®].

Após a análise de crescimento, as mudas foram coletadas e separadas em folhas, caule e raiz (lavadas em água corrente). Em seguida, o material vegetal foi acondicionado em sacos de papel Kraft e colocado em estufa com circulação forçada de ar a 65 °C até atingir peso constante, após 72h. Posteriormente, as amostras foram pesadas em balança analítica com precisão de 0,0001 g, para determinação da massa seca das diferentes partes das mudas, os resultados foram expressos em g.

Trocas gasosas foliares e fluorescência da clorofila *a*

Aos 115 dias após a aplicação dos tratamentos, as medições das trocas gasosas foliares foram realizadas com um analisador de gases infravermelho (IRGA, GFS-3000, Walz, Effeltrich, Alemanha). O equipamento foi programado com velocidade do impulsor de 7; área de leitura de 8 cm²; temperatura da cubeta com 25 °C; concentração de CO₂ de 400 ppm; taxa de fluxo com 750 μmol min⁻¹; e densidade de fluxo de fótons de 1.200 μmol m⁻² s⁻¹. As medições foram realizadas entre 7h00 e 11h00 na terceira folha totalmente expandida, localizada no terço médio superior de cada planta. Os parâmetros incluíram: taxa de assimilação de CO₂ (A_N - μmol m⁻²s⁻¹), transpiração (E - mmol de H₂O m⁻²s⁻¹), condutância estomática (g_s - mol de H₂O m⁻²s⁻¹), concentração interna de CO₂ (C_i - μmol CO₂ mol ar⁻¹), temperatura foliar (T_l - °C) e déficit de pressão de vapor (VPD - kPa). A partir desses dados, foram calculadas a eficiência do uso da água (WUE) (A_N/E), a eficiência intrínseca do uso da água ($iWUE = A_N/g_s$) e a eficiência de carboxilação (A_N/C_i).

A análise de fluorescência da clorofila *a* foi realizada entre 7h00 e 11h00, nas mesmas folhas utilizadas nas medições de trocas gasosas. As folhas foram submetidas a um período de pré-adaptação ao escuro por 30 min com pinças foliares. Posteriormente, utilizando um fluorômetro portátil (OS-30p, Opti-Sciences Chlorophyll Fluorometer,

Estados Unidos) foram obtidos os valores de fluorescência inicial (F_0) e de fluorescência máxima (F_m). Com base nesses dados, foram calculadas a fluorescência variável (F_v), eficiência quântica potencial do fotossistema II (F_v/F_m), a eficiência máxima primária do fotossistema II (F_v/F_0) e a eficiência quântica basal do processo não fotoquímico do fotossistema II (F_0/F_m) (Fernandes *et al.*, 2015).

Pigmentos fotossintéticos

Os índices de clorofila *a*, *b* e total foram determinados aos 120 DAT no período da manhã, no terço médio da terceira folha totalmente expandida a partir do ápice da muda, por meio de um clorofilômetro portátil (ClorofiLOG® CFL 1030, Falker, Brasil). Os resultados foram expressos em Falker Chlorophyll Index (FCI) (Falker, 2008).

Bioquímica

Aos 113 dias DAT, folhas frescas foram coletadas do terço médio das mudas para análises de açúcares solúveis totais e prolina. Para preparar os extratos brutos, 150 mg de folhas frescas, de três repetições em cada tratamento, foram colocados em tubos de Etephon com 1 mL de álcool a 80% para extração. Os tubos foram colocados em digestor por 2 min, até que o tecido estivesse completamente moído, e o sobrenadante foi coletado. O sobrenadante foi então centrifugado a 10.000 rpm por 5 min a 10 °C para obter o sobrenadante límpido e, em seguida, armazenado sob refrigeração a -80°C e posteriormente utilizado para análises bioquímicas.

Os açúcares solúveis totais (AST) foram determinados pelo método da antrona (Yemm; Willis, 1954) e expressos mg AST g⁻¹ MF. O teor de prolina (PRO) foi obtido a partir do sobrenadante de acordo com a metodologia descrita por Bates, Waldren, Teare (1973), e os resultados foram expressos em mol PRO g⁻¹ MF.

Concentração foliar de K, Ca e Si

A biomassa seca das folhas foi triturada em moinho Wiley de aço inoxidável e armazenados em recipientes hermeticamente fechados para determinação das concentrações de potássio (K) e cálcio (Ca), utilizando o método de digestão sulfúrica (Silva, 2009). Para isso, 0,4 g do material seco foram transferidos para tubos digestores,

aos quais foram adicionados 2 mL de peróxido de hidrogênio (H_2O_2 - 30%), 4 mL de ácido sulfúrico (H_2SO_4 - 98%) e 1 g da mistura de sais. Em seguida, as amostras foram aquecidas lentamente até 350°C (aproximadamente 2h) no bloco digestor para a obtenção de um líquido esverdeado claro, mantendo o aquecimento até atingir coloração incolor (aproximadamente 4h). Após resfriamento, realizou-se a diluição em 50 mL de água deionizada com auxílio de uma proveta graduada em frasco coletor, sendo o extrato devidamente armazenado. A concentração de K foi determinada por fotometria de chama, diluindo 1 mL do extrato em 19 mL de água deionizada.

Para a determinação de cálcio, 1 mL do extrato diluído foi transferido para tubos de ensaio, os quais foram adicionados 19 mL de água deionizada. Em seguida, 1 mL dessa nova diluição foi transferido para outro tubo de ensaio, ao qual se adicionaram 4 mL da solução de lantânio. A concentração de Ca foi quantificada por espectrofotometria de absorção atômica (Silva, 2009). A concentração de Si foi determinada no Laboratório de Análises de Solo e Planta (LASP), em Petrolina-PE, conforme a metodologia de Furlani e Gallo (1978). As amostras foram secas, moídas e submetidas à digestão alcalina para solubilizar o silício. Em seguida, o elemento foi quantificado por meio de um método colorimétrico, com leitura em espectrofotômetro.

A qualidade das mudas foi avaliada com base em dados de altura das plantas (AP), diâmetro do caule (DC) e massa seca total (MST), massa seca da parte aérea (MSPA) e da raiz (MSR). O índice de qualidade de Dickson (IQD) foi calculado de acordo com Dickson *et al.* (1960), conforme demonstrado na Eq.2.

$$\text{IQD} = \frac{\text{MST}}{\frac{\text{AP}}{\text{DC}}} + \frac{\text{MSPA}}{\text{MSR}} \quad \text{Eq. 2}$$

A tolerância à seca (DTE) foi avaliada utilizando a massa seca total das plantas submetidas ao déficit hídrico (Ausência CaSiO_3 e Presença CaSiO_3) durante os diferentes turnos de rega (DMd) e a massa seca total do tratamento controle (TR1Ausência CaSiO_3 ou TR1Presença CaSiO_3) (DMc), e calculada pela fórmula proposta por Fischer *et al.* (1982), conforme demonstrado na Eq.3.

$$\text{DTE} = \frac{\text{DMd}}{\text{DMc}} \quad \text{Eq. 3}$$

O índice de sensibilidade à seca (SDI) foi calculado de acordo com a equação de Ali e El-Sadek (2016), utilizando os mesmos parâmetros descritos na Eq. 4.

$$SDI = \frac{DMc - DMd}{DMc} \quad \text{Eq. 4}$$

Análise estatística

Os dados obtidos foram submetidos aos testes de normalidade, utilizando o método de Shapiro-Wilk ($p \geq 0,05$) (Shapiro; Wilk, 1965). Posteriormente, foram submetidos à análise de variância (ANOVA) pelo teste F ($p \leq 0,05$). Nos casos de significância dos fatores isolados e a interação entre eles, aplicou-se o teste t Student ($p \leq 0,05$) para o fator adubação e teste de Tukey ($p \leq 0,05$) para o fator turnos de rega, utilizando-se o *software* estatístico SISVAR[®], versão 5.3 (Ferreira, 2019).

RESULTADOS

Crescimento

A análise de variância indicou ausência de interação significativa ($p > 0,05$) entre os turnos de rega e a adubação com silicato de cálcio (CaSiO_3) para o diâmetro do caule (DC), altura (AP), número de folhas (NF), área foliar (AF) e volume de raiz (VR) das mudas de graviola (Tabela 4 e Figura 3). No entanto, os turnos de rega, influenciaram significativamente ($p \leq 0,05$) a AP, NF, AF e VR, ao passo que DC não apresentou diferença significativa entre os turnos de rega ($p > 0,05$) (Tabela 4). A adubação com CaSiO_3 , por sua vez, não apresentou efeito significativo sobre nenhuma das variáveis de crescimento analisadas ($p > 0,05$) (Tabela 4).

Tabela 4. Teste F, Tukey e t Student para as variáveis: diâmetro do caule (DC), altura (AP), número de folhas (NF), área foliar (AF) e volume de raiz (VR) em mudas de gramineira adubadas com silicato de cálcio sob diferentes frequências de irrigação, aos 120 dias após transplante.

Teste F (p-valor)					
FV	DC (mm)	AP (cm)	NF	AF (cm ² /planta)	VR (cm ³)
Blocos	0,5754 ^{ns}	0,6648 ^{ns}	0,6766 ^{ns}	0,7472 ^{ns}	0,0969 ^{ns}
TR	0,1810 ^{ns}	0,0026*	0,0060*	0,0000*	0,0001*
CaSiO ₃	0,2663 ^{ns}	0,8391 ^{ns}	0,0891 ^{ns}	0,8950 ^{ns}	0,7111 ^{ns}
TR x CaSiO ₃	0,6678 ^{ns}	0,3993 ^{ns}	0,9580 ^{ns}	0,1335 ^{ns}	0,2094 ^{ns}
TR (dias)	Teste de Tukey (EP, n=8)				
TR1	2,23 ± 0,19 a	41,25 ± 1,68 a	31,38 ± 1,72 a	1113,37 ± 34,39 a	26,25 ± 1,83 ab
TR2	2,20 ± 0,34 a	38,28 ± 2,30 a	25,88 ± 1,41 ab	961,30 ± 45,81 ab	27,50 ± 2,50 a
TR3	1,85 ± 0,15 a	34,88 ± 1,10 ab	28,88 ± 1,79 ab	904,41 ± 39,14 b	20,00 ± 0,00 bc
TR4	1,56 ± 0,19 a	29,09 ± 2,44 b	22,63 ± 1,24 b	597,28 ± 50,82 c	15,00 ± 1,89 c
Adubação	Teste “t” Student (EP, n=16)				
Ausência CaSiO ₃	1,83 ± 0,15 A	35,66 ± 2,15 A	25,75 ± 1,30 A	891,24 ± 66,69 A	22,50 ± 2,14 A
Presença CaSiO ₃	2,10 ± 0,18 A	36,08 ± 1,29 A	28,63 ± 1,32 A	896,94 ± 44,39 A	21,88 ± 1,36 A

Fonte: A autora (2026). TR1 – irrigação diária; TR2 – irrigação a cada dois dias; TR3 – irrigação a cada quatro dias e TR4 – irrigação a cada seis dias. Ausência de CaSiO₃ e presença de CaSiO₃. FV = Fonte de variação. * e ns = Significativo ($p \leq 0,05$) e não significativo ($p > 0,05$), respectivamente, de acordo com o teste F. Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey e “t” Student ($p > 0,05$). ***Médias ± desvio padrão. TR: turno de rega; CaSiO₃: silicato de cálcio.

AP, NF, AF e VR foram reduzidos em 29,48%, 27,88%, 46,35% e 42,86%, respectivamente, no tratamento TR4 em comparação ao tratamento (TR1), independentemente da adubação com CaSiO₃ (Tabela 4). Não houve diferença significativa entre os tratamentos TR1 e TR2 nas variáveis AP, NF e VR, ao passo que para AF não se observou diferença significativa entre os tratamentos TR1 e TR2.

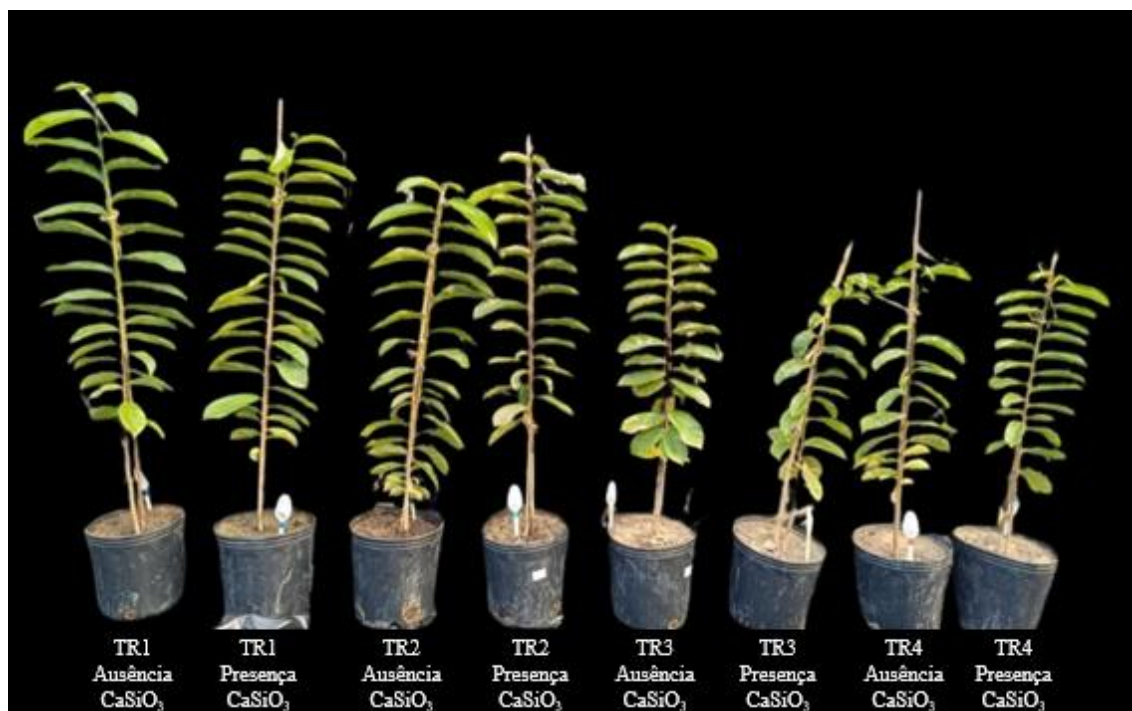


Figura 3. Mudas de graviola adubadas com silicato de cálcio sob diferentes frequências de irrigação. TR1 – irrigação diária; TR2 – irrigação a cada dois dias; TR3 – irrigação a cada quatro dias e TR4 – irrigação a cada seis dias. Ausência de CaSiO_3 e presença de CaSiO_3 . Fonte: A autora (2026).

Trocas gasosas foliares

Houve interação significativa entre os turnos de rega e adubação com CaSiO_3 para transpiração (E), condutância estomática (g_s) e taxa de assimilação de CO_2 (A_N) ($p \leq 0,05$) (Tabela 5). E , g_s e A_N no tratamento TR3 com presença de CaSiO_3 aumentaram 81,05%, 66,48% e 38,84%, respectivamente, em comparação com as mudas sem CaSiO_3 (Tabela 5). As maiores E , g_s e A_N nas mudas com presença de CaSiO_3 ocorreram em TR3, equivalente a incremento de 142,25%, 122,31% e 68,44%, respectivamente, em comparação ao menor desempenho observado no tratamento TR1 (Tabela 5).

Tabela 5. Teste F, Tukey e t Student para as variáveis: transpiração (E), condutância estomática (g_s), taxa de assimilação de CO_2 (A_N) em mudas de graviola adubadas com silicato de cálcio sob diferentes frequências de irrigação, aos 120 dias após transplantio.

Teste F (p-valor)			
FV	E (mmol de $(\text{H}_2\text{O}) \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	g_s (mol de $\text{H}_2\text{O} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	A_N ($\mu\text{mol} (\text{CO}_2) \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)

Blocos	0,0671 ^{ns}	0,1045 ^{ns}	0,1145 ^{ns}
TR	0,0259 [*]	0,0313 [*]	0,1013 ^{ns}
CaSiO ₃	0,4194 ^{ns}	0,3973 ^{ns}	0,4995 ^{ns}
TR x CaSiO ₃	0,0115 [*]	0,0218 [*]	0,0445 [*]

Teste de Tukey e “t” Student (EP, n=4)

TR (dias)	Ausência CaSiO ₃	Presença CaSiO ₃	Ausência CaSiO ₃	Presença CaSiO ₃	Ausência CaSiO ₃	Presença CaSiO ₃
TR1	1,13 ± 0,22 aA	0,71 ± 0,12 bA	50,75 ± 7,69 aA	33,93 ± 3,25 bA	9,28 ± 1,10 aA	6,94 ± 1,32 bA
TR2	1,02 ± 0,13 aA	1,07 ± 0,27 bA	47,97 ± 5,97 aA	50,49 ± 13,38 abA	9,14 ± 1,09 aA	9,33 ± 0,84 abA
TR3	0,95 ± 0,06 aB	1,72 ± 0,22 aA	45,31 ± 5,33 aB	75,43 ± 8,04 aA	8,42 ± 0,82 aB	11,69 ± 0,51 aA
TR4	0,83 ± 0,21 aA	0,81 ± 0,09 bA	39,30 ± 7,65 aA	40,35 ± 2,17 bA	7,65 ± 1,30 aA	8,30 ± 0,39 abA

Fonte: A autora (2026). TR1 – irrigação diária; TR2 – irrigação a cada dois dias; TR3 – irrigação a cada quatro dias e TR4 – irrigação a cada seis dias. Ausência de CaSiO₃ e presença de CaSiO₃. FV = Fonte de variação. * e ns = Significativo ($p \leq 0,05$) e não significativo ($p > 0,05$), respectivamente, de acordo com o teste F. Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p > 0,05$). Médias seguidas da mesma letra maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste de “t” Student ($p > 0,05$). ***Médias ± desvio padrão. TR: turno de rega; CaSiO₃: silicato de cálcio.

O déficit de pressão de vapor (VPD), concentração interna de CO₂ (C_i), eficiência intrínseca do uso da água (EiUa), eficiência instantânea do uso da água (EUA), eficiência instantânea de carboxilação (EiCi) e temperatura foliar (T_l) não foram influenciados significativamente por meio da interação entre os turnos de rega e adubação com CaSiO₃ ou de forma isolada ($p > 0,05$) (Tabela 6).

Tabela 6. Teste F, Tukey e t Student para as variáveis: déficit de pressão de vapor (VPD), concentração interna de CO₂ (C_i), eficiência intrínseca do uso da água (EiUa), eficiência instantânea do uso da água (EUA), eficiência instantânea de carboxilação (EiCi) e temperatura foliar (T_l) em mudas de graviolera adubadas com silicato de cálcio sob diferentes frequências de irrigação, aos 120 dias após transplântio.

Teste F (p-valor)						
FV	VPD (kPa)	C_i ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ air}^{-1}$)	EiUa (A_N/g_s)	EUA (A_N/E)	EiCi	T_l (°C)
Blocos	0,1011 ^{ns}	0,6439 ^{ns}	0,6640 ^{ns}	0,1491 ^{ns}	0,3176 ^{ns}	0,0243 [*]
TR	0,4833 ^{ns}	0,2639 ^{ns}	0,2341 ^{ns}	0,0510 ^{ns}	0,3903 ^{ns}	0,2197 ^{ns}
CaSiO ₃	0,7947 ^{ns}	0,8390 ^{ns}	0,8805 ^{ns}	0,7998 ^{ns}	0,1143 ^{ns}	0,9470 ^{ns}
TR x CaSiO ₃	0,6356 ^{ns}	0,4144 ^{ns}	0,3959 ^{ns}	0,2087 ^{ns}	0,4329 ^{ns}	0,4163 ^{ns}
TR (dias)	Teste de Tukey (EP, n=8)					

TR1	21,20 ± 0,96 a	81,14 ± 17,11 a	0,1927 ± 0,01 a	9,13 ± 0,42 a	0,2683 ± 0,14 a	29,33 ± 0,45 a
TR2	21,44 ± 0,60 a	71,99 ± 18,71 a	0,1979 ± 0,01 a	9,27 ± 0,61 a	0,2285 ± 0,07 a	29,50 ± 0,25 a
TR3	21,95 ± 0,61 a	107,04 ± 13,45 a	0,1731 ± 0,17 a	7,94 ± 0,49 a	0,1030 ± 0,01 a	29,99 ± 0,21 a
TR4	20,35 ± 0,77 a	65,18 ± 6,66 a	0,2013 ± 0,00 a	10,04 ± 0,57 a	0,1320 ± 0,02 a	29,07 ± 0,41 a
Adubação						
Ausência						
CaSiO ₃	21,33 ± 0,55 A	82,91 ± 0,59 A	0,1904 ± 0,00 A	9,03 A ± 0,35	0,1202 ± 0,02 A	29,46 ± 0,24 A
Presença						
CaSiO ₃	21,14 ± 0,52 A	79,76 ± 0,55 A	0,1920 ± 0,01 A	9,16 A ± 0,46	0,2457 ± 0,08 A	29,48 ± 0,26 A

Fonte: A autora (2026). TR1 – irrigação diária; TR2 – irrigação a cada dois dias; TR3 – irrigação a cada quatro dias e TR4 – irrigação a cada seis dias. Ausência de CaSiO₃ e presença de CaSiO₃. FV = Fonte de variação. * e ns = Significativo ($p \leq 0,05$) e não significativo ($p > 0,05$), respectivamente, de acordo com o teste F. Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey e “t” Student ($p > 0,05$). ***Médias ± desvio padrão. TR: turno de rega; CaSiO₃: silicato de cálcio.

Pigmentos fotossintéticos

Não houve interação significativa entre os turnos de rega e a adubação com CaSiO₃ para clorofila *a*, *b* e total ($p > 0,05$) (Tabela 7). O teor de clorofila *a*, *b* e total foi afetado apenas pelos turnos de rega, independentemente da adubação com CaSiO₃, com reduções de 11,81%, 27,49% e 17,18%, respectivamente, no tratamento TR4 em comparação ao TR1 (Tabela 7). Os resultados também mostram que não houve diferença significativa no teor de clorofila *a*, *b* e total entre os tratamentos TR1, TR2 e TR3 das mudas de gravioleira (Tabela 7).

Tabela 7. Teste F, Tukey e t Student para as variáveis: clorofila *a*, *b* e total em mudas de gravioleira adubadas com silicato de cálcio sob diferentes frequências de irrigação, aos 120 dias após transplântio.

Teste t (p-valor)			
FV	Clorofila <i>a</i>	Clorofila <i>b</i>	Clorofila Total
Blocos	0,1935 ^{ns}	0,2394 ^{ns}	0,2178 ^{ns}
TR	0,0017 [*]	0,0057 [*]	0,0032 [*]
CaSiO ₃	0,7160 ^{ns}	0,8577 ^{ns}	0,7939 ^{ns}
TR x CaSiO ₃	0,8836 ^{ns}	0,9159 ^{ns}	0,9051 ^{ns}
TR (dias)	Teste de Tukey (EP, n=8)		
TR1	30,31 ± 0,51 a	15,79 ± 0,63 a	46,10 ± 1,12 a
TR2	30,34 ± 0,73 a	15,43 ± 1,07 a	45,77 ± 1,79 a
TR3	29,21 ± 0,49 ab	14,45 ± 0,67 ab	43,66 ± 1,16 ab

TR4	26,73 ± 0,72 b	11,45 ± 0,77 b	38,18 ± 1,49 b
Adubação			
Teste 't' Student (EP, n=16)			
Ausência CaSiO ₃	29,03 ± 0,59 A	14,20 ± 0,73 A	43,23 ± 1,31 A
Presença CaSiO ₃	29,26 ± 0,55 A	14,35 ± 0,68 A	43,61 ± 1,22 A

Fonte: A autora (2025). TR1 – irrigação diária; TR2 – irrigação a cada dois dias; TR3 – irrigação a cada quatro dias e TR4 – irrigação a cada seis dias. Ausência de CaSiO₃ e presença de CaSiO₃. FV = Fonte de variação. * e ns = Significativo ($p \leq 0,05$) e não significativo ($p > 0,05$), respectivamente, de acordo com o teste F. Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey e “t” Student ($p > 0,05$). ***Médias ± desvio padrão. TR: turno de rega; CaSiO₃: silicato de cálcio.

Fluorescência da clorofila *a*

A análise estatística revelou ausência de interação significativa entre os turnos de rega e adubação com CaSiO₃ ($p > 0,05$), bem como ausência de efeitos isolados significativos ($p > 0,05$) para fluorescência máxima (F_m), fluorescência variável (F_v), máxima eficiência quântica do fotossistema II (PSII) (F_v/F_m), eficiência máxima primária do fotossistema II (PSII) (F_v/F_0), eficiência quântica basal do processo não fotoquímico do fotossistema II (PSII) (F_0/F_m) (Tabela 8). Para a fluorescência inicial (F_0), houve diferença significativa entre os turnos de rega ($p \leq 0,05$) (Tabela 8).

Tabela 8. Teste F, Tukey e t Student para as variáveis: fluorescência inicial (F_0), fluorescência máxima (F_m), fluorescência variável (F_v), máxima eficiência quântica do fotossistema II (PSII) (F_v/F_m), eficiência máxima primária do fotossistema II (PSII) (F_v/F_0), eficiência quântica basal do processo não fotoquímico do fotossistema II (PSII) (F_0/F_m) em mudas de graviola adubadas com silicato de cálcio sob diferentes frequências de irrigação, aos 120 dias após transplantio.

Teste F (p-valor)						
FV	F_0	F_m	F_v	F_v/F_m	F_v/F_0	F_0/F_m
Blocos	0,0020 ^{ns}	0,0235 [*]	0,0847 ^{ns}	0,4956 ^{ns}	0,6928 ^{ns}	0,7202 ^{ns}
TR	0,0062 [*]	0,1715 ^{ns}	0,4248 ^{ns}	0,2193 ^{ns}	0,5794 ^{ns}	0,5658 ^{ns}
CaSiO ₃	0,9371 ^{ns}	0,8900 ^{ns}	0,8664 ^{ns}	0,8937 ^{ns}	0,8762 ^{ns}	0,8985 ^{ns}
TR x CaSiO ₃	0,3063 ^{ns}	0,6559 ^{ns}	0,8093 ^{ns}	0,6971 ^{ns}	0,9405 ^{ns}	0,9114 ^{ns}
Teste de Tukey (EP, n=8)						
TR (dias)						
TR1	95,75 ± 3,67 b	419,00 ± 16,77 a	323,25 ± 14,57 a	0,7708 ± 0,01 a	3,39 ± 0,13 a	0,2294 ± 0,01 a
TR2	93,87 ± 3,64 b	417,00 ± 15,88 a	323,13 ± 12,74 a	0,7741 ± 0,00 a	3,45 ± 0,08 a	0,2254 ± 0,00 a
TR3	99,88 ± 3,11 ab	423,75 ± 21,41 a	323,88 ± 19,83 a	0,7566 ± 0,01 a	3,24 ± 0,17 a	0,2380 ± 0,01 a
TR4	110,25 ± 5,25 a	461,88 ± 14,31 a	351,63 ± 9,90 a	0,7611 ± 0,01 a	3,21 ± 0,09 a	0,2381 ± 0,01 a
Teste “t” Student (EP, n=16)						
Adubação						
Ausência CaSiO ₃	100,06 ± 3,55 A	429,31 ± 12,50 A	329,25 ± 9,81 A	0,7661 ± 0,00 A	3,31 ± 0,08 A	0,2332 ± 0,00 A

Presença CaSiO_3 $99,81 \pm 2,77$ A $431,50 \pm 12,94$ A $331,69 \pm 11,20$ A $0,7652 \pm 0,00$ A $3,33 \pm 0,09$ A $0,2323 \pm 0,00$ A

Fonte: A autora (2026). TR1 – irrigação diária; TR2 – irrigação a cada dois dias; TR3 – irrigação a cada quatro dias e TR4 – irrigação a cada seis dias. Ausência de CaSiO_3 e presença de CaSiO_3 . FV = Fonte de variação. * e ns = Significativo ($p \leq 0,05$) e não significativo ($p > 0,05$), respectivamente, de acordo com o teste F. Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey e “t” Student ($p > 0,05$). ***Médias $\pm$ desvio padrão. TR: turno de rega; CaSiO_3 : silicato de cálcio.

A F_0 nas mudas de gravioleira aumentou em 15,14% no tratamento TR4 em relação ao TR1, independentemente da adubação com CaSiO_3 (Tabela 8). No entanto, não houve reduções significativas entre TR1, TR2 e TR3, indicando que, independentemente dos turnos de rega, as mudas de gravioleiras apresentam desempenho semelhante para F_0 , exceto em comparação com TR4.

Acúmulo de biomassa

Não houve interação significativa entre os turnos de rega e adubação com CaSiO_3 para as massas seca da folha (MSF), do caule (MSC), da parte aérea (MSPA), da raiz (MSR), total (MST) e a relação massa seca da raiz/massa seca da parte aérea ($p > 0,05$) (Tabela 9).

Para a MSF das mudas de gravioleira, os fatores isolados, turnos de rega ($p \leq 0,05$) e adubação com CaSiO_3 ($p \leq 0,05$), apresentaram efeito significativo (Tabela 9). Para a MSC, MSR e MST, o efeito significativo foi observado apenas nos turnos de rega ($p \leq 0,05$) (Tabela 9).

Tabela 9. Teste F, Tukey e t Student para as variáveis: massa seca das folhas (MSF), massa seca do caule (MSC), massa seca da raiz (MSR), massa seca total (MST) e relação massa seca da raiz/massa seca da parte aérea (RRPA) em mudas de gravioleira adubadas com silicato de cálcio sob diferentes frequências de irrigação, aos 120 dias após transplantio.

Teste F (p-valor)					
FV	MSF (g)	MSC (g)	MSR (g)	MST (g)	RRPA
Blocos	0,5314 ^{ns}	0,5936 ^{ns}	0,2141 ^{ns}	0,3752 ^{ns}	0,2929 ^{ns}
TR	0,0000 [*]	0,0109 [*]	0,0044 [*]	0,0001 [*]	0,5988 ^{ns}
CaSiO_3	0,0292 [*]	0,4731 ^{ns}	0,8615 ^{ns}	0,2363 ^{ns}	0,1727 ^{ns}
TR x CaSiO_3	0,3539 ^{ns}	0,9161 ^{ns}	0,4322 ^{ns}	0,8568 ^{ns}	0,5372 ^{ns}
Teste de Tukey (EP, n=8)					
TR (dias)					
TR1	6,06 $\pm$ 0,30 a	6,71 $\pm$ 0,39 a	4,85 $\pm$ 0,27 a	17,62 $\pm$ 0,68 a	0,38 $\pm$ 0,01 a
TR2	4,58 $\pm$ 0,30 b	5,93 $\pm$ 0,56 ab	4,11 $\pm$ 0,36 ab	14,62 $\pm$ 1,12 ab	0,39 $\pm$ 0,02 a
TR3	4,51 $\pm$ 0,26 b	5,42 $\pm$ 0,39 ab	3,85 $\pm$ 0,27 ab	13,78 $\pm$ 0,81 bc	0,39 $\pm$ 0,02 a
TR4	3,07 $\pm$ 0,32 c	4,43 $\pm$ 0,20 b	3,16 $\pm$ 0,25 b	10,68 $\pm$ 0,53 c	0,42 $\pm$ 0,03 a

Adubação		Teste “t” Student (EP, n=16)			
Ausência CaSiO ₃	4,23 ± 0,34 B	5,47 ± 0,35 A	3,97 ± 0,27 A	13,67 ± 0,88 A	0,41 ± 0,41 A
Presença CaSiO ₃	4,88 ± 0,31 A	5,78 ± 0,34 A	4,02 ± 0,24 A	14,68 ± 0,80 A	0,38 ± 0,38 A

Fonte: A autora (2025). TR1 – irrigação diária; TR2 – irrigação a cada dois dias; TR3 – irrigação a cada quatro dias e TR4 – irrigação a cada seis dias. Ausência de CaSiO₃ e presença de CaSiO₃. FV = Fonte de variação. * e ns = Significativo ($p \leq 0,05$) e não significativo ($p > 0,05$), respectivamente, de acordo com o teste F. Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey e “t” Student ($p > 0,05$). ***Médias ± desvio padrão. TR: turno de rega; CaSiO₃: silicato de cálcio.

A MSF da gravioleira irrigada a cada seis dias (TR4) diminuiu 49,33% em relação às mudas irrigadas diariamente (TR1), independentemente do fornecimento de CaSiO₃ (Tabela 9). A presença de CaSiO₃ proporcionou acúmulo de MSF de 15,37% em relação às mudas ausentes de CaSiO₃, independentemente dos turnos de rega (Tabela 9).

A MSC, MSR e MST foram reduzidas pelos turnos de rega em, respectivamente, 33,98%; 34,85% e 39,39% no TR4 em comparação ao TR1, independente do fornecimento de CaSiO₃ (Tabela 9).

A MST apresentou comportamento semelhante entre o TR1 e o TR2 (Tabela 9).

Índices de qualidade de mudas e tolerância ao estresse

Houve efeito isolado ($p \leq 0,05$) do turno de rega para o índice de qualidade de Dickson (IQD) (Tabela 10).

Tabela 10. Teste F, Tukey e t Student para as variáveis: índice de qualidade de Dickson (IQD) em mudas de gravioleira adubadas com silicato de cálcio sob diferentes frequências de irrigação, aos 120 dias após transplântio.

Teste F (p-valor)	
FV	IQD
Blocos	0,4574 ^{ns}
TR	0,0416 [*]
CaSiO ₃	0,0739 ^{ns}
TR x CaSiO ₃	0,5530 ^{ns}
Teste de Tukey (EP, n=8)	
TR (dias)	
TR1	4,27 ± 0,18 a
TR2	4,06 ± 0,20 ab
TR3	3,91 ± 0,16 ab
TR4	3,50 ± 0,21 b
Teste “t” Student (EP, n=16)	
Adubação	
Ausência CaSiO ₃	3,76 ± 0,14 A
Presença CaSiO ₃	4,11 ± 0,14 A

Fonte: A autora (2026). TR1 – irrigação diária; TR2 – irrigação a cada dois dias; TR3 – irrigação a cada quatro dias e TR4 – irrigação a cada seis dias. Ausência de CaSiO₃ e presença de CaSiO₃. FV = Fonte de variação. * e ns = Significativo ($p \leq 0,05$) e não significativo ($p > 0,05$), respectivamente, de acordo com o teste F. Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey e “t” Student ($p > 0,05$). ***Médias ± desvio padrão. TR: turno de rega; CaSiO₃: silicato de cálcio.

O índice de qualidade de Dickson (IQD) foi reduzido em 18,03%, no tratamento TR4 em comparação ao TR1, independentemente da adubação com CaSiO_3 (Tabela 10). No entanto, os tratamentos TR1, TR2 e TR3 não apresentaram diferença significativa entre si (Tabela 10).

A interação ($p \leq 0,05$) entre os turnos de rega e a adubação com CaSiO_3 foi significativa para eficiência de tolerância à seca (DTE) e índice de sensibilidade à seca (DSI) em mudas de gravioleira (Tabela 11).

Tabela 11. Teste F, Tukey e t Student para as variáveis: eficiência de tolerância à seca (DTE) e índice de sensibilidade à seca (DSI) em mudas de gravioleira adubadas com silicato de cálcio sob diferentes frequências de irrigação, aos 120 dias após transplantio.

Teste F (p-valor)				
FV	DTE		DSI	
Blocos	1,0000 ^{ns}		0,0000 [*]	
TR	0,0000 [*]		0,0000 [*]	
CaSiO ₃	0,0000 [*]		0,0000 [*]	
TR x CaSiO ₃	0,0000 [*]		0,0000 [*]	
Teste de Tukey e “t” Student (EP, n=4)				
TR (dias)	Ausência CaSiO ₃	Presença CaSiO ₃	Ausência CaSiO ₃	Presença CaSiO ₃
TR1	-	-	-	-
TR2	0,81 ± 0,00 aB	0,85 ± 0,00 aA	0,19 ± 0,00 aA	0,19 ± 0,00 abA
TR3	0,78 ± 0,00 aB	0,79 ± 0,00 bA	0,22 ± 0,00 bA	0,21 ± 0,00 bB
TR4	0,55 ± 0,00 aB	0,66 ± 0,00 cA	0,45 ± 0,00 cA	0,34 ± 0,00 cB

Fonte: A autora (2026). TR1 – irrigação diária; TR2 – irrigação a cada dois dias; TR3 – irrigação a cada quatro dias e TR4 – irrigação a cada seis dias. Ausência de CaSiO_3 e presença de CaSiO_3 . FV = Fonte de variação. * e ns = Significativo ($p \leq 0,05$) e não significativo ($p > 0,05$), respectivamente, de acordo com o teste F. Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p > 0,05$). Médias seguidas da mesma letra maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste de “t” Student ($p > 0,05$). ***Médias ± desvio padrão. TR: turno de rega; CaSiO_3 : silicato de cálcio.

O déficit hídrico diminuiu a eficiência de tolerância à seca (DTE) nos turnos de rega (Tabela 11). Nos tratamentos TR2, TR3 e TR4, a presença de CaSiO_3 proporcionou aumentos de 4,94%, 1,28% e 20% em comparação às mudas com ausência de CaSiO_3 (Tabela 11). A menor DTE nas mudas com presença de CaSiO_3 foi verificada em TR4, resultando em redução 22,35%, em comparação ao maior valor observado no tratamento TR2 (Tabela 11).

O índice de sensibilidade à seca (DSI) aumentou com o déficit hídrico, independentemente do fornecimento de CaSiO_3 (Tabela 11). A presença de CaSiO_3 reduziu o DSI em 4,54% e 24,44% nos tratamentos TR3 e TR4, respectivamente, em comparação às mudas sem CaSiO_3 (Tabela 11). Os maiores valores de DSI, tanto na ausência quanto na presença de CaSiO_3 , ocorreram no TR4, correspondendo a incrementos de 136, 84% e 78,95%, respectivamente, em comparação ao menor DSI observado no tratamento TR2 (Tabela 11).

Bioquímica

Não houve interação significativa entre os turnos de rega e a adubação com CaSiO_3 no teor de açúcares solúveis totais (AST) ($p > 0,05$) (Tabela 12). Houve apenas efeito isolado ($p \leq 0,05$) para o turno de rega (Tabela 12). O tratamento TR4 proporcionou aumento de 27,50%, no AST, quando comparado ao TR1 (Tabela 12). Observa-se que o tratamento TR2 não diferiu do TR1, TR3 e TR4, indicando que as mudas podem ser irrigadas a cada dois dias sem apresentar estresse hídrico em relação ao AST.

Tabela 12. Teste F, Tukey e t Student para as variáveis: teor de açúcares solúveis totais (AST) nos tecidos foliares em mudas de gravioleira adubadas com silicato de cálcio sob diferentes frequências de irrigação, aos 120 dias após transplântio.

Teste F (p-valor)	
FV	AST (mg AST / g MF)
Blocos	0,0253 *
TR	0,0053 *
CaSiO_3	0,1073 ^{ns}
TR x CaSiO_3	0,0585 ^{ns}
TR (dias)	Teste de Tukey (EP, n=8)
TR1	28,04 ± 1,62 b
TR2	32,57 ± 2,39 ab
TR3	34,02 ± 1,27 a
TR4	35,75 ± 1,48 a
Adubação	Teste “t” Student (EP, n=16)
Ausência CaSiO_3	31,43 ± 1,19 A
Presença CaSiO_3	33,77 ± 1,53 A

Fonte: A autora (2026). TR1 – irrigação diária; TR2 – irrigação a cada dois dias; TR3 – irrigação a cada quatro dias e TR4 – irrigação a cada seis dias. Ausência de CaSiO_3 e presença de CaSiO_3 . FV = Fonte de variação. * e ns = Significativo ($p \leq 0,05$) e não significativo ($p > 0,05$), respectivamente, de acordo com o teste F. Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey e “t” Student ($p > 0,05$). ***Médias ± desvio padrão. TR: turno de rega; CaSiO_3 : silicato de cálcio.

A interação entre os turnos de rega e a adubação com CaSiO_3 foi significativa para prolina (PRO) ($p \leq 0,05$) (Tabela 13).

Tabela 13. Teste F, Tukey e t Student para as variáveis: teor de prolina (PRO) nos tecidos foliares em mudas de gravioleira adubadas com silicato de cálcio sob diferentes frequências de irrigação, aos 120 dias após transplante.

Teste F (p-valor)		
FV	PRO (mol PRO/g MF)	
Blocos	0,2594	
TR	0,0003 [*]	
CaSiO ₃	0,0310 [*]	
TR x CaSiO ₃	0,0057 [*]	
Teste de Tukey (EP, n=4)		
TR (dias)	Ausência CaSiO ₃	Presença CaSiO ₃
TR1	3,65 ± 0,49 bA	2,42 ± 0,79 bA
TR2	2,48 ± 0,39 bA	2,63 ± 0,58 bA
TR3	10, 64 ± 2,43 aA	3,64 ± 0,85 abB
TR4	6,07 ± 0,12 bA	7,08 ± 1,36 aA

Fonte: A autora (2026). TR1 – irrigação diária; TR2 – irrigação a cada dois dias; TR3 – irrigação a cada quatro dias e TR4 – irrigação a cada seis dias. Ausência de CaSiO_3 e presença de CaSiO_3 . FV = Fonte de variação. * e ns = Significativo ($p \leq 0,05$) e não significativo ($p > 0,05$), respectivamente, de acordo com o teste F. Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p > 0,05$). Médias seguidas da mesma letra maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste de “t” Student ($p > 0,05$). ***Médias ± desvio padrão. TR: turno de rega; CaSiO_3 : silicato de cálcio.

O teor de PRO aumentou 192,30% em mudas sem CaSiO_3 no TR3, comparado às mudas com CaSiO_3 (Tabela 13). Na ausência de CaSiO_3 , o maior acúmulo de PRO nas mudas foi observado em TR3, um aumento de 329,03% em comparação ao menor acúmulo, registrado em TR2 (Tabela 13). A presença de CaSiO_3 proporcionou o maior acúmulo de PRO no TR3 e TR4, correspondentes a 50,41% e 192,56%, respectivamente, em comparação ao menor acúmulo observado no TR1 (Tabela 13).

Teor nutricional foliar

Não houve efeito significativo da interação entre os fatores estudados, isolados ou em conjunto, para o teor de potássio (K) ($p > 0,05$) (Tabela 14).

Tabela 14. Teste F, Tukey e t Student para as variáveis: teor de potássio (K) os tecidos foliares em mudas de gravioleira adubadas com silicato de cálcio sob diferentes frequências de irrigação, aos 120 dias após transplantio.

Teste F (p-valor)	
FV	K (g kg ⁻¹)
Blocos	0,2609 ^{ns}
TR	0,0567 ^{ns}
CaSiO ₃	0,9960 ^{ns}
TR x CaSiO ₃	0,7766 ^{ns}
TR (dias)	Teste de Tukey (EP, n=8)
TR1	13,45 ± 0,36 a
TR2	13,22 ± 0,85 a
TR3	11,85 ± 0,35 a
TR4	11,24 ± 0,68 a
Adubação	Teste “t” Student (EP, n=16)
Ausência CaSiO ₃	12,44 ± 0,42 A
Presença CaSiO ₃	12,44 ± 0,53 A

Fonte: A autora (2026). TR1 – irrigação diária; TR2 – irrigação a cada dois dias; TR3 – irrigação a cada quatro dias e TR4 – irrigação a cada seis dias. Ausência de CaSiO₃ e presença de CaSiO₃. FV = Fonte de variação. * e ns = Significativo ($p \leq 0,05$) e não significativo ($p > 0,05$), respectivamente, de acordo com o teste F. Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey e “t” Student ($p > 0,05$). ***Médias ± desvio padrão. TR: turno de rega; CaSiO₃: silicato de cálcio.

A interação entre os turnos de rega e a adubação com CaSiO₃ foi significativa para os teores de silício (Si) e cálcio (Ca) ($p \leq 0,05$) (Tabela 15).

Tabela 15. Teste F, Tukey e t Student para as variáveis: teor de silício (Si) e cálcio (Ca) nos tecidos foliares em mudas de gravioleira adubadas com silicato de cálcio sob diferentes frequências de irrigação, aos 120 dias após transplantio.

Teste F (p-valor)				
FV	Si (g kg ⁻¹)		Ca (g kg ⁻¹)	
Blocos	0,4979 ^{ns}		0,0713 ^{ns}	
TR	0,0000 [*]		0,2647 ^{ns}	
CaSiO ₃	0,0000 [*]		0,0006 [*]	
TR x CaSiO ₃	0,0000 [*]		0,0342 [*]	
Teste de Tukey (EP, n=4)				
TR (dias)	Ausência CaSiO ₃	Presença CaSiO ₃	Ausência CaSiO ₃	Presença CaSiO ₃
TR1	8,57 ± 0,33 aA	9,01 ± 0,25 bA	1,73 ± 0,20 aA	1,69 ± 0,14 bA
TR2	9,05 ± 0,36 aA	9,76 ± 0,40 bA	1,63 ± 0,16 aA	1,86 ± 0,10 abA
TR3	8,58 ± 0,11 aB	14,73 ± 0,10 aA	1,63 ± 0,14 aB	2,32 ± 0,26 aA
TR4	8,31 ± 0,31 aA	8,73 ± 0,27 bA	1,49 ± 0,12 aB	2,27 ± 0,10 abA

Fonte: A autora (2026). TR1 – irrigação diária; TR2 – irrigação a cada dois dias; TR3 – irrigação a cada quatro dias e TR4 – irrigação a cada seis dias. Ausência de CaSiO_3 e presença de CaSiO_3 . FV = Fonte de variação. * e ns = Significativo ($p \leq 0,05$) e não significativo ($p > 0,05$), respectivamente, de acordo com o teste F. Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p > 0,05$). Médias seguidas da mesma letra maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste de “t” Student ($p > 0,05$). ***Médias $\pm$ desvio padrão. TR: turno de rega; CaSiO_3 : silicato de cálcio.

O teor de silício (Si) aumentou em 71,68% no tratamento TR3, quando as mudas foram adubadas com CaSiO_3 , em relação à ausência de CaSiO_3 (Tabela 15). O maior teor de Si nas mudas com presença de CaSiO_3 foi observado em TR3, equivalente a incremento de 68,72%, em relação ao menor teor, observado no TR4 (Tabela 15).

Houve acréscimo no teor de cálcio (Ca) de 42,33% e 52,35% para os tratamentos TR3 e TR4, respectivamente, nas mudas com presença de CaSiO_3 , quando comparado àquelas sem CaSiO_3 (Tabela 15). Na presença de CaSiO_3 , o maior teor de Ca nas mudas foi observado em TR3, correspondente a um aumento de 37,28%, em comparação ao menor teor registrado em TR1 (Tabela 15).

DISCUSSÃO

O estresse hídrico constitui um dos principais fatores limitantes da produção agrícola, afetando profundamente o crescimento, o desenvolvimento e o metabolismo das plantas, especialmente no TR4, irrigado a cada seis dias. Os impactos são ainda mais severos em espécies perenes e de elevado valor econômico, como a gravioleira (*A. muricata* L.), que, nesse estudo, apresentou reduções das variáveis de crescimento, como altura, número de folhas, área foliar e volume radicular (Fredrick, Bamalo, Chima, 2018; Yisau *et al.*, 2023; Freitas *et al.*, 2024; Khallizadeh; Nasrabadi; Etesami, 2025). A aplicação de CaSiO_3 melhora significativamente a taxa de assimilação de CO_2 , condutância estomática, transpiração, biomassa foliar, a modulação da síntese de prolina e o conteúdo de silício e cálcio foliar.

Os efeitos positivos observados com a aplicação do CaSiO_3 ocorrem principalmente pelo fato do silício ser um elemento crucial para algumas culturas frutíferas, ao modificarem várias atividades fisiológicas ao se depositar abaixo da camada da cutícula, reduzindo a perda excessiva de água e mantendo a abertura estomática estável (Rachappanavar *et al.*, 2024). Dessa forma, a espécie manteve o metabolismo celular ativo, mesmo com menos água disponível. A manutenção da hidratação celular favorece a eficiência fisiológica e a resistência das plantas a diversos estresses (Jesus *et al.*, 2018; Rachappanavar *et al.*, 2024; Ali; Bijay-Singh, 2025). Além disso, o cálcio contribui para

a estabilidade das membranas e para a manutenção do turgor celular, que potencializam a fotossíntese e a taxa de transpiração sob estresse hídrico (Gupta *et al.*, 2023).

Nossos resultados demonstram que a irrigação diária (TR1), a cada dois dias (TR2) e a cada quatro dias (TR3) apresentam semelhança no desempenho das variáveis de crescimento, biomassa, fluorescência inicial (F_0), açúcares solúveis totais e índice de qualidade da muda, independentemente da adubação com CaSiO_3 . Tal achado indica que a irrigação deficitária moderada a cada quatro dias (TR3) não compromete a formação de mudas de gravioleira, confirmando que o agendamento da irrigação é um componente importante da agricultura irrigada e sustentável, visando a melhorar a eficiência do uso da água aplicando a quantidade certa de água na hora certa (Marković *et al.*, 2021).

Estes resultados representam uma estratégia importante para região semiárida do Brasil, uma vez que a irregularidade das chuvas exerce ação limitante sobre a produção agrícola, incluindo espécies frutíferas, sendo a irrigação um insumo que mantém a viabilidade econômica e social do sistema de produção (Cavalcante *et al.*, 2021). No entanto, sob estresse severo a cada seis dias (TR4), observou-se redução do crescimento das mudas, uma vez que a gravioleira necessita de boa disponibilidade hídrica (Leal; Paull, 2023; Freitas *et al.*, 2024), e em solos muito secos com regime de umidade árido há severas restrições ao crescimento (Kome *et al.*, 2024). Nessas condições ocorre a redução da pressão de turgor celular que provoca menor divisão e desenvolvimento celulares (Eghlima *et al.*, 2024; Khallizadeh; Nasrabadi; Etesami, 2025), o que contribui para a limitação da expansão de novas folhas, abscisão, murchamento, senescência e redução da área foliar (Seleiman *et al.*, 2021; Yisau *et al.*, 2023; Bonnin *et al.*, 2025).

Em condições de estresse severo (TR4), provavelmente as mudas também realizam um desvio de energia metabólica para a aclimação osmótica e a síntese de solutos compatíveis, a exemplo de açúcares solúveis totais, que se acumulam nas folhas, principalmente no citoplasma, como mecanismos de mitigação dos efeitos adversos do estresse hídrico (Seleiman *et al.*, 2021; Wahab *et al.*, 2022; Rachappanavar *et al.*, 2024), o que resulta em menor disponibilidade de recursos energéticos para o crescimento e produção de biomassa (Nour *et al.*, 2024), comprometendo também a qualidade das mudas de gravioleira (Freitas *et al.*, 2024).

O estresse hídrico também aumentou a F_0 , indicando que na obstrução do fluxo de elétrons pelo fotossistema II (PSII) o aceitador de plastoquinona (QA^-) não pode ser completamente oxidado durante o estresse, o que danifica o PSII e a eficiência fotossintética da espécie (Zhuang *et al.*, 2020; Fernandes *et al.*, 2022). Ademais, a redução

do teor de clorofila evidencia que a seca está diretamente associada à degradação da clorofila, atribuída principalmente à formação excessiva de espécies reativas de oxigênio nos cloroplastos (Yang *et al.*, 2021; Rady *et al.*, 2021; Hussain *et al.*, 2024). Essas alterações interferem na taxa de assimilação de CO₂ e influenciam na redução do crescimento, biomassa e qualidade das mudas de gravioleira.

Por outro lado, a aplicação de CaSiO₃ mostrou-se eficaz na biomassa foliar, nas trocas gasosas, aumento de cálcio e silício foliar e regulação do conteúdo de prolina. O aumento da biomassa foliar pode estar relacionado à incorporação de silício em estruturas vegetais, especialmente folhas, que demandam menos energia do que a síntese de compostos orgânicos, devido à elevada permeabilidade das bicamadas lipídicas (Hao *et al.*, 2020). Dessa forma, o aumento dos teores de silício nos tecidos vegetais pode substituir parcialmente componentes à base de carbono, reforçando as paredes celulares, conferindo maior rigidez e resistência à dessecação e contribuindo para o aumento da biomassa acumulada (Liu *et al.*, 2020). Logo, o aumento da biomassa foliar nas mudas adubadas indica que a aplicação de CaSiO₃ reduziu parcialmente a inibição do crescimento causada pela seca. Os resultados da pesquisa corroboram estudos relatando que as plantas de *Triticum* adubadas com silício aumentaram a massa seca da parte aérea quando expostas a condições de estresse hídrico em comparação ao controle não fertilizado (Seleiman *et al.*, 2021). Esses resultados reforçam o papel do silício como elemento estratégico na mitigação dos impactos negativos da limitação hídrica sobre o desenvolvimento vegetal (Rachappanavar *et al.*, 2024).

Em relação à aplicação de CaSiO₃, vale destacar que nossos resultados indicam que, em condições de déficit hídrico moderado (TR3), ele melhora significativamente a transpiração (E), a condutância estomática (g_s) e a taxa de assimilação de CO₂ (A_N) em mudas de gravioleira. Esses resultados podem ser atribuídos aos depósitos de Si, na forma de sílica amorfa (SiO₂.nH₂O) na parede celular, que formam uma camada dupla de sílica cuticular, proporcionando melhor ajuste osmótico, mantendo o turgor celular e aumentando a capacidade fotossintética (Verma *et al.*, 2020; Pereira *et al.*, 2024). O acúmulo de Si na epiderme da folha pode ajudar a minimizar os danos oxidativos, protegendo as membranas celulares e o aparelho fotossintético (Zhu; Gong; Yin, 2019).

O efeito do Si nas taxas de transpiração varia de acordo com a gravidade do estresse. Sob condições de estresse moderado, Si pode aumentar a absorção de água pela raiz, o que corresponde a taxas de transpiração elevadas e, consequentemente, aumenta o

crescimento da planta sob estresse por seca (Wang *et al.*, 2021). No entanto, foi observada em nossa pesquisa uma manutenção dos parâmetros de crescimento até TR3. Os resultados corroboram pesquisas recentes, que demonstram que A_N , g_s e E atingiram valores superiores às mudas do controle quando tratadas com Si, o que evidencia adaptação da espécie estudada (Neves *et al.*, 2019; Verma *et al.*, 2021; Foresti *et al.*, 2024). O cálcio também atua como mensageiro secundário essencial, amplificando sinais e modulando proteínas de sinalização-alvo, o que culmina na ativação de respostas fisiológicas e potencializa os mecanismos antioxidantes, aumentando a tolerância das plantas à seca (Li *et al.*, 2022a, 2022c).

O acúmulo de prolina em plantas estressadas é um mecanismo de defesa para preservar a pressão osmótica intracelular (Queiroz *et al.*, 2025; Roy *et al.*, 2025), uma vez que é uma molécula antioxidante e participa da sinalização celular (Ramírez-Olvera *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2021). No presente estudo, a redução significativa do teor de prolina em mudas tratadas com silicato de cálcio sob estresse moderado (TR3) sugere que o silicato de cálcio pode refletir o alívio dos danos causados pelo estresse (Al-Mayahi, 2016). Este resultado pode estar relacionado às trocas gasosas foliares e aos benefícios do silício e cálcio na regulação da perda de água na transpiração foliar dependendo do estado hídrico das raízes, o que levaria ao maior transporte de água até as folhas, refletindo-se no aumento do potencial osmótico, reduzindo o estresse da planta e, conseqüentemente, a concentração de prolina (Wang *et al.*, 2021; Ning *et al.*, 2023). Acredita-se que esse ajuste osmótico seja crítico para proteger as estruturas celulares e manter a integridade das membranas e proteínas, prevenindo danos celulares e garantindo a atividade metabólica contínua (Foresti *et al.*, 2024; Renzetti *et al.*, 2024). Resultados semelhantes foram encontrados em *Phoenix dactylifera* L. (Al-Mayahi, 2016); *Oryza sativa* L. (Yan *et al.*, 2020) e *Triticum aestivum* L. (Ning *et al.*, 2023).

O aumento da transpiração no TR3 favoreceu maiores concentrações de Si e Ca nas mudas adubadas com CaSiO_3 . Esse resultado está relacionado ao principal mecanismo de absorção dos elementos, que ocorre predominantemente por fluxo de massa. Nesse processo, o Si é absorvido como ácido silícico no nível da raiz e, uma vez inserido nos vasos do xilema, transportado para os brotos e folhas através da corrente de transpiração (Andreotti *et al.*, 2022). O cálcio, por sua vez, apresenta absorção semelhante, e o seu aumento confirma que o CaSiO_3 atua como fonte direta do nutriente, liberando Ca^{2+} no solo à medida que se solubiliza. Em condições de déficit hídrico, o acúmulo citosólico de Ca^{2+} desempenha papel central na transdução de sinais, ativando

diferentes rotas metabólicas e moleculares relacionadas à adaptação ao estresse (Feng *et al.*, 2023).

Em condições de estresse moderado (TR3), o uso de CaSiO_3 demonstra que os produtores de mudas, pesquisadores ou agricultores podem utilizar a adubação como estratégia sustentável no semiárido. Essa prática possibilita intervalos de irrigação mais longos, sem comprometer o desempenho das trocas gasosas foliares e a nutrição mineral, contribuindo, portanto, para aumentar a tolerância das mudas de gravioleira à seca e reduzir sua sensibilidade hídrica. Para o futuro, recomendamos novos estudos com a espécie, especialmente focados na avaliação de diferentes dosagens de CaSiO_3 , a fim de ampliar o conhecimento sobre seu potencial agrônomo.

De forma geral, as mudas de gravioleira sob irrigação diária, a cada dois dias e quatro dias, apresentam resultados semelhantes no crescimento, pigmentos fotossintéticos, acúmulo de biomassa, fluorescência da clorofila *a* e açúcares solúveis totais, evidenciando manejo de irrigação viável aos quatro dias no ambiente de déficit hídrico. Portanto, a irrigação a cada seis dias, considerada um déficit hídrico severo, restringe o crescimento e desenvolvimento das mudas. A aplicação do CaSiO_3 no turno de rega a cada quatro dias é uma estratégia eficaz para mitigar os impactos da irrigação deficitária nas mudas de gravioleira, promovendo melhorias nas trocas gasosas, biomassa foliar, regulação do acúmulo prolina, incremento na absorção de silício e cálcio. Esses efeitos aumentaram a tolerância das mudas ao déficit hídrico, otimizando o uso eficiente da água e produção mais sustentável.

CONCLUSÕES

A gravioleira submetida ao estresse hídrico e à aplicação de silício apresentou respostas fisiológicas e nutricionais que reforçaram o potencial dessas práticas como estratégia sustentável no semiárido. O turno de rega a cada dois dias manteve as mudas sem estresse hídrico, ao passo que intervalos de até quatro dias se configuraram como manejo viável em condições de déficit hídrico, sem comprometer o crescimento e desenvolvimento das plantas. Por outro lado, a irrigação a cada seis dias afetou negativamente o crescimento, a fisiologia e a bioquímica das mudas, evidenciando os limites de tolerância à seca. A aplicação de CaSiO_3 em condições de estresse moderado com irrigações a cada quatro dias destacou-se como fator decisivo para aumentar a tolerância das mudas de gravioleira sob regimes de irrigação deficitários, mitigando os

efeitos da escassez hídrica. Perspectivas futuras indicam a necessidade de novos estudos com diferentes dosagens de CaSiO_3 , a fim de ampliar o conhecimento sobre seu potencial agronômico para a espécie.

REFERÊNCIAS

- ABBAS, M.; ABDEL-LATTIF, H.; SHAHBA, M. Ameliorative effects of calcium sprays on yield and grain nutritional composition of maize (*Zea mays* L.) cultivars under drought stress. **Agriculture**, v. 11, n. 4, p. 285, 2021. <https://doi.org/10.3390/agriculture11040285>
- ALAM, P. *et al.* Silicon attenuates the negative effects of chromium stress in tomato plants by modifying antioxidant enzyme activities, ascorbate–glutathione cycle and glyoxalase system. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 43, n. 7, p. 110, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11738-021-03276-4>
- ALI, M. B.; EL-SADEK, A. N. Evaluation of drought tolerance indices for wheat (*Triticum aestivum* L.) under irrigated and rainfed conditions. **Communications in Biometry and Crop Science**, v. 11, n. 1, p. 77-89, 2016.
- ALIZADEH, R. *et al.* Enhancing water deficit tolerance in canola (*Brassica napus* L.) through the synergistic application of nano-silicon and sulfur. **BMC Plant Biology**, v. 25, n. 1, p. 486, 2025. <https://doi.org/10.1186/s12870-025-06535-5>
- AL-MAYAH, A. M. W. Effect of silicon (Si) application on *Phoenix dactylifera* L. growth under drought stress induced by polyethylene glycol (PEG) in vitro. **American Journal of Plant Sciences**, v. 7, n. 13, p. 1711-1728, 2016. <https://doi.org/10.4236/ajps.2016.713161>
- ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- ALVES, S. C. *et al.* Multicriteria analysis as a tool to support fruit culture in the Brazilian semi-arid. **Environment, Development and Sustainability**, v. 27, n. 6, p. 14281-14304, 2025. <https://doi.org/10.1007/s10668-024-04521-9>
- ANDREOTTI, C. *et al.* Rate and timing of application of biostimulant substances to enhance fruit tree tolerance toward environmental stresses and fruit quality. **Agronomy**, v. 12, n. 3, p. 603, 2022. <https://doi.org/10.3390/agronomy12030603>
- BASSOI, L. H.; CHAVES, A. R. M.; TEIXEIRA, R. P. Responses of Syrah'grapevine to deficit irrigation in the Brazilian semi-arid region. **Agricultural Water Management**, v. 258, p. 107186, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107186>
- BATES, L. S.; WALDREN, R. P. A.; TEARE, I. D. Rapid determination of free proline for water-stress studies. **Plant and soil**, v. 39, n. 1, p. 205-207, 1973. <https://doi.org/10.1007/BF00018060>
- BÖHM, Wolfgang. Parâmetros radiculares e sua medição. In: **Métodos de estudo de sistemas radiculares**. Berlim, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1979. p. 125-138.
- BONNIN, M. *et al.* Physiologic, Genetic and Epigenetic Determinants of Water Deficit Tolerance in Fruit Trees. **Plants**, v. 14, n. 12, p. 1769, 2025. <https://doi.org/10.3390/plants14121769>

BOUNAJRA, A. *et al.* Towards efficient irrigation management at field scale using new technologies: A systematic literature review. **Agricultural Water Management**, v. 295, p. 108758, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108758>

CAVALCANTE, L. F. *et al.* Soursop production under supplementary irrigation and mulching in the semiarid region of Brazil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 25, n. 8, p. 522-528, 2021. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v25n8p522-528>

CHEN, D. *et al.* How does silicon mediate plant water uptake and loss under water deficiency?. **Frontiers in plant science**, v. 9, p. 281, 2018. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00281>

CLIMATE-DATE. Clima Mossoró-RN, 2024. Disponível em: <<https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/rio-grande-do-norte/mossoro-4448/>>. Acesso em: 15 janeiro de 2025.

COSTA, F. H. R. *et al.* Frequencies of irrigation in millet crop under salt stress. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 28, p. e272197, 2024. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v28n3e272197>

DASH, P. K. *et al.* Enhancing Water Conservation in Hydroponically Grown Strawberries using Potassium Silicate. **Silicon**, p. 1-15, 2025. <https://doi.org/10.1007/s12633-025-03534-x>

DICKSON, A. *et al.* Quality appraisal of white spruce and white pine seedling stock in nurseries. **The Forestry Chronicle**, v. 36, n. 1, p. 10-13, 1960. <https://doi.org/10.5558/tfc36010-1>

EGHLIMA, G. *et al.* Foliar application of nano-silicon enhances drought tolerance rate of pot marigold (*Calendula officinalis* L.) by regulation of abscisic acid signaling. **BMC Plant Biology**, v. 24, n. 1, p. 1220, 2024. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-05986-6>

ETESAMI, H.; JEONG, B. R.; RIZWAN, M. The use of silicon in stressed agriculture management: action mechanisms and future prospects. **Metalloids in plants: advances and future prospects**, p. 381-431, 2020. <https://doi.org/10.1002/9781119487210.ch19>

FALKER AUTOMAÇÃO AGRÍCOLA Ltda. **Manual do medidor eletrônico de teor clorofila: ClorofiLOG / CFL 1030**. Porto Alegre: Falker Automação Agrícola, 2008. 33p.

FAROUTINE, G. *et al.* Effect of calcium silicate and moisture content of the substrate on the growth and productivity parameters of cucumber. **Chilean journal of agricultural research**, v. 83, n. 3, p. 334-346, 2023. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-58392023000300334>

FENG, D. *et al.* Exogenous calcium: Its mechanisms and research advances involved in plant stress tolerance. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, p. 1143963, 2023. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1143963>

FERNANDES, C. S. *et al.* The appropriate source of nitrogen for Italian Zucchini under salt stress conditions. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 22, n. 1, p. 560-570, 2022. <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00668-w>

FERREIRA, D. F. SISVAR: A computer analysis system to fixed effects split plot type designs. **Brazilian Journal of Biometrics**, v. 37, n. 4, p. 529-535, 2019. <https://doi.org/10.28951/rbb.v37i4.450>

FISCHER, K. S. *et al.* Breeding and selection for drought resistance in tropical maize. **Drought resistance in crops with emphasis on rice**, p. 377-399, 1982.

FORESTI, A.C. *et al.* Does silicon in *Eugenia myrcianthes* seedlings under water stress contribute in the tolerance and recovery?. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 24, n. 2, p. 2208-2220, 2024. <https://doi.org/10.1007/s42729-024-01664-6>

FREDRICK, C.; BAMALO, U. M.; CHIMA, U. D. Effect of watering regimes on the germination and early seedling growth of *Annona muricata* Linn. **Production Agriculture and Technology**, v. 14, n. 1, p. 66-72, 2018.

FREITAS, R.S. *et al.* Hydration and dehydration cycles for enhanced soursop (*Annona muricata*) seedling quality and seedling drought stress resistance. **New Forests**, v. 55, n. 6, p. 1843-1861, 2024. <https://doi.org/10.1007/s11056-024-10062-w>

FURLANI, P. R.; GALLO, J. R. Determinação de silício em material vegetal, pelo método colorimétrico do " azul-de-molibdênio". **Bragantia**, v. 37, p. 5-11, 1978. <https://doi.org/10.1590/S0006-87051978000100018>

GUPTA, S. *et al.* Calcium: A master regulator of stress tolerance in plants. **South African Journal of Botany**, v. 163, p. 580-594, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2023.10.047>

HAO, Q. *et al.* Silicon affects plant stoichiometry and accumulation of C, N, and P in grasslands. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, p. 1304, 2020. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.01304>

HUSSAIN, I. *et al.* Exogenous application of silicon and zinc attenuates drought tolerance in *Eruca sativa* L. through increasing chlorophyll pigments, osmoprotectants, and modulating defense mechanisms. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 43, n. 9, p. 3221-3237, 2024. <https://doi.org/10.1007/s00344-023-11116-7>

JESUS, E. G. de *et al.* Growth and gas exchanges of arugula plants under silicon fertilization and water restriction. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 22, n. 2, p. 119-124, 2018. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n2p119-124>

KHALLIZADEH, J.; NASRABADI, R. G.; ETESAMI, H. Synergistic effects of silicate and *Streptomyces chartreusis* on water deficit resistance in soybean (*Glycine max* L.). **Rhizosphere**, v. 34, p. 101064, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2025.101064>

KOME, G. K. *et al.* Baseline edaphic requirements of soursop (*Annona muricata* L.). **Tropical Plants**, v. 3, n. 1, 2024. <https://doi.org/10.48130/tp-0024-0023>

LEAL, F.; PAULL, R. E. The soursop (*Annona muricata*): Botany, horticulture, and utilization. **Crop Science**, v. 63, n. 2, p. 362-389, 2023. <https://doi.org/10.1002/csc2.20894>

LI, H. *et al.* Regulation of the growth of Mongolian pine (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) by calcium-water coupling in a semiarid region. 2022a. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108736>

LI, Q. *et al.* Research on crop irrigation schedules under deficit irrigation—A meta-analysis. **Water Resources Management**, v. 36, n. 12, p. 4799-4817, 2022b. <https://doi.org/10.1007/s11269-022-03278-y>

LI, Y. *et al.* Crosstalk between Ca^{2+} and other regulators assists plants in responding to abiotic stress. **Plants**, v. 11, n. 10, p. 1351, 2022c. <https://doi.org/10.3390/plants11101351>

LIU, L. *et al.* Silicon effects on biomass carbon and phytolith-occluded carbon in grasslands under high-salinity conditions. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, p. 657, 2020. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00657>

MALYUKOVA, L. S. *et al.* Effects of exogenous calcium on the drought response of the tea plant (*Camellia sinensis* (L.) Kuntze). **PeerJ**, v. 10, p. e13997, 2022. <https://doi.org/10.7717/peerj.13997>

MARKOVIĆ, M. *et al.* Sustainable management of water resources in supplementary irrigation management. **Applied Sciences**, v. 11, n. 6, p. 2451, 2021. <https://doi.org/10.3390/app11062451>

MARQUES, D. J. *et al.* Morphophysiological changes resulting from the application of silicon in corn plants under water stress. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 41, n. 2, p. 569-584, 2022. <https://doi.org/10.1007/s00344-021-10322-5>

NEVES, J. M. G *et al.* Silicon and boron mitigate the effects of water deficit on sunflower. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 23, p. 175-182, 2019. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v23n3p175-182>

NING, D. *et al.* The effects of foliar supplementation of silicon on physiological and biochemical responses of winter wheat to drought stress during different growth stages. **Plants**, v. 12, n. 12, p. 2386, 2023. <https://doi.org/10.3390/plants12122386>

NOGUEIRA, D. B. *et al.* Dry spells in a semi-arid region of Brazil and their influence on maize productivity. **Journal of Arid Environments**, v. 209, p. 104892, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2022.104892>

NOUR, M. M. *et al.* Drought responses and adaptation in plants differing in life-form. **Frontiers in Ecology and Evolution**, v. 12, p. 1452427, 2024. <https://doi.org/10.3389/fevo.2024.1452427>

NOVAIS, R. F.; NEVES, J. C. L.; BARROS, N. F. Ensaio em ambiente controlado. In: Oliveira, A. J.; Garrido, W. E.; Araujo, J. D.; Lourenco, S. **Métodos de pesquisa em fertilidade do solo**. Brasília: Embrapa-SEA, 1991. p. 189-254.

PATIL, H. V.; DHANKANI, M. A.; DHANKANI, A. R. A review on Marvel fruit: *Annona muricata*. **Medical Sciences Forum**, v. 21, n. 1, p. 26, 2023. <https://doi.org/10.3390/ECB2023-14355>

PEREIRA, S. *et al.* Silicon, an emergent strategy to lighten the effects of (a) biotic stresses on crops: A review. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 210, n. 6, p. e12762, 2024. <https://doi.org/10.1111/jac.12762>

PINTO, A. C. de Q.; SILVA, E. M. da. A cultura da graviola. Brasília : Embrapa-SPI, 1995. 105 p. (EmbrapaSPI. Coleção Plantar, 31). Disponível em: <https://www.sidalc.net/search/Record/dig-infoteca-e-doc-668905/Description>> Acesso em : 09/11/2024.

QUEIROZ, L. L. G. de *et al.* Foliar Silicon Alleviates Water Deficit in Cowpea by Enhancing Nutrient Uptake, Proline Accumulation, and Antioxidant Activity. **Plants**, v. 14, n. 8, p. 1241, 2025. <https://doi.org/10.3390/plants14081241>

RACHAPPANAVAR, V. *et al.* Silicon derived benefits to combat biotic and abiotic stresses in fruit crops: Current research and future challenges. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 211, p. 108680, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2024.108680>

RADY, M. M. *et al.* Exogenous gibberellic acid or dilute bee honey boosts drought stress tolerance in *Vicia faba* by rebalancing osmoprotectants, antioxidants, nutrients, and phytohormones. **Plants**, v. 10, n. 4, p. 748, 2021. <https://doi.org/10.3390/plants10040748>

RAMÍREZ-BUILES, V. H. *et al.* Calcium nutrition in coffee and its influence on growth, stress tolerance, cations uptake, and productivity. **Frontiers in Agronomy**, v. 2, p. 590892, 2020. <https://doi.org/10.3389/fagro.2020.590892>

RENZETTI, M.; FUNCK, D.; TROVATO, M. Proline and ROS: A unified mechanism in plant development and stress response?. **Plants**, v. 14, n. 1, p. 2, 2024. <https://doi.org/10.3390/plants14010002>

ROY, T. K. *et al.* Application of nanoparticles (NPs) to ameliorate abiotic stress in economically important crop species: a potential review. **Journal of Crop Health**, v. 77, n. 1, p. 19, 2025. <https://doi.org/10.1007/s10343-024-01069-6>

SÁ, F. V. S. *et al.* Ecophysiology of Soursop Seedlings Irrigated with Fish Farming Effluent under NPK Doses. **Sustainability**, v. 16, n. 11, p. 4674, 2024. <https://doi.org/10.3390/su16114674>

SALEM, E. M. M *et al.* Influence of silicon forms on nutrients accumulation and grain yield of wheat under water deficit conditions. **Gesunde Pflanzen**, v. 74, n. 3, p. 539-548, 2022. <https://doi.org/10.1007/s10343-022-00629-y>

SANTOS, C. C. *et al.* The role of silicon in the mitigation of water stress in *Eugenia myrcianthes* Nied. seedlings. **Brazilian Journal of Biology**, v. 82, p. e260420, 2022. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.260420>

SÃO JOSÉ, A. R. *et al.* Atualidades e perspectivas das Anonáceas no mundo. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 36, p. 86-93, 2014. <https://doi.org/10.1590/S0100-29452014000500010>

SELEIMAN, M. F. *et al.* Drought stress impacts on plants and different approaches to alleviate its adverse effects. **Plants**, v. 10, n. 2, p. 259, 2021. <https://doi.org/10.3390/plants10020259>

SHAPIRO, S. S., WILK, M. B. Analysis of variance test for normality. **Biometrika**, v. 52, n. 3-4, p. 591-611, 1965. <https://doi.org/10.2307/2333709>

SILVA, D. B. *et al.* Application of silicon and nitrogen in gas exchange of Arabic coffee plants as a function of water availability. **Journal of Plant Nutrition**, p. 1-11, 2025. <https://doi.org/10.1080/01904167.2025.2519840>

SILVA, F. C. **Manual de Análises Químicas de Solos, Plantas e Fertilizantes**, 2ª ed.; Embrapa informação Tecnológica: Brasília, Brasil, 2009. 627p.

SILVA, L. A. *et al.* Morphophysiology and water relations of *Spondias* rootstocks under different irrigation frequencies. **Revista Caatinga**, v. 36, p. 865-874, 2023. <http://dx.doi.org/10.1590/1983-21252023v36n414rc>

SILVA, M. S. *et al.* Does silicon help to alleviate water deficit stress and in the recovery of *Dipteryx alata* seedlings?. **Brazilian Journal of Biology**, v. 82, p. e259016, 2022. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.259016>

SOURI, Z. *et al.* Silicon and plants: current knowledge and future prospects. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 40, n. 3, p. 906-925, 2021. <https://doi.org/10.1007/s00344-020-10172-7>

SOUZA, T. M. A. D. *et al.* Calcium silicate as salt stress attenuator in seedlings of yellow passion fruit cv. BRS GA1. **Revista Caatinga**, v. 33, n. 2, p. 509-517, 2020. <https://doi.org/10.1590/1983-21252020v33n223rc>

SOUZA, C. C. *et al.* Avaliação de métodos de determinação de água disponível e manejo da irrigação em terra roxa sob cultivo de algodoeiro herbáceo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 4, n. 3, p. 338-342, 2000. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662000000300006>

VERMA, K. K. *et al.* Functional relationship between photosynthetic leaf gas exchange in response to silicon application and water stress mitigation in sugarcane. **Biological Research**, v. 54, n. 1, p. 15, 2021. <https://doi.org/10.1186/s40659-021-00338-2>

VERMA, K. K. *et al.* Interactive role of silicon and plant–rhizobacteria mitigating abiotic stresses: A new approach for sustainable agriculture and climate change. **Plants**, v. 9, n. 9, p. 1055, 2020. <https://doi.org/10.3390/plants9091055>

WAHAB, A. *et al.* Plants' physio-biochemical and phyto-hormonal responses to alleviate the adverse effects of drought stress: A comprehensive review. **Plants**, v. 11, n. 13, p. 1620, 2022. <https://doi.org/10.3390/plants11131620>

WANG, M. *et al.* Functions of silicon in plant drought stress responses. **Horticulture Research**, v. 8, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41438-021-00681-1>

YAN, G. *et al.* Silicon improves rice salinity resistance by alleviating ionic toxicity and osmotic constraint in an organ-specific pattern. **Frontiers in plant science**, v. 11, p. 260, 2020. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00260>

YANG, X. *et al.* Response mechanism of plants to drought stress. **Horticulturae**, v. 7, n. 3, p. 50, 2021. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7030050>

YANG, Y.; GUO, Y. Elucidating the molecular mechanisms mediating plant salt-stress responses. **New phytologist**, v. 217, n. 2, p. 523-539, 2018. <https://doi.org/10.1111/nph.14920>

YEMM, E. W.; WILLIS, A. J. The estimation of carbohydrates in plant extracts by anthrone. **Biochemical journal**, v. 57, n. 3, p. 508, 1954. <https://doi.org/10.1042/bj0570508>

YISAU, J. A. *et al.* Influence of watering regimes on early growth of *Annona muricata* seedlings. **Journal of Research in Forestry, Wildlife and Environment**, v. 15, n. 2, p. 105–112-105–112, 2023.

YUAN, M. *et al.* Optimizing irrigation regimes for foxtail millet (*Setaria italica* L.) in Northwest China: Effects of irrigation quota and frequency on yield and crop water productivity. **Agricultural Water Management**, v. 322, p. 110022, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.110022>

ZHAO, X. *et al.* Exogenous calcium enhances the physiological status and photosynthetic capacity of rose under drought stress. **Horticultural Plant Journal**, v. 10, n. 3, p. 853-865, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.hpj.2023.01.010>

ZHI, X. *et al.* Comprehensive analysis on investigating water-saving potentials of irrigated cotton in semi-arid area in China. **Agricultural Water Management**, v. 301, p. 108960, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108960>

ZHU, Yong-Xing; GONG, Hai-Jun; YIN, Jun-Liang. Role of silicon in mediating salt tolerance in plants: a review. **Plants**, v. 8, n. 6, p. 147, 2019. <https://doi.org/10.3390/plants8060147>

ZHUANG, J. *et al.* Drought stress strengthens the link between chlorophyll fluorescence parameters and photosynthetic traits. **PeerJ**, v. 8, p. e10046, 2020. <http://doi.org/10.7717/peerj.10046>

ZUBAIDI, S. N. *et al.* *Annona muricata*: Comprehensive review on the ethnomedicinal, phytochemistry, and pharmacological aspects focusing on antidiabetic properties. **Life**, v. 13, n. 2, p. 353, 2023. <https://doi.org/10.3390/life13020353>

CAPÍTULO IV

MORFOFISIOLOGIA DE MUDAS DE UMBU-CAJAZEIRA SOB DIFERENTES FREQUÊNCIAS DE IRRIGAÇÃO

RESUMO

Na região semiárida, a ocorrência de déficit hídrico constitui um dos principais fatores limitantes à produção de mudas, afetando inclusive espécies adaptadas às condições locais, como a umbu-cajazeira. Portanto, objetivou-se avaliar o crescimento e as trocas gasosas foliares de mudas de umbu-cajazeira sob diferentes frequências de irrigação. O experimento foi conduzido em casa de vegetação, em delineamento em blocos casualizados, contendo quatro tratamentos (TR1 - irrigação diária; TR2 – irrigação a cada dois dias; TR3 – irrigação a cada quatro dias e TR4 – irrigação a cada seis dias) e seis repetições. As mudas foram avaliadas quanto às características de crescimento, biomassa, trocas gasosas, teor de água e nutrição mineral. O déficit hídrico não afetou significativamente as variáveis como comprimento e diâmetro da haste, diâmetro da estaca, número de folhas, concentração interna de CO₂, transpiração, taxa de assimilação de CO₂ e temperatura foliar. Entretanto, a irrigação diária e a cada seis dias reduziram a área foliar e a produção de biomassa. As mudas de umbu-cajazeira irrigadas a cada seis dias apresentaram os maiores teores de nitrogênio e potássio, porém as menores as concentrações de fósforo e cálcio. Assim, em condições de limitação hídrica, frequências de irrigação entre dois e quatro dias mostram-se alternativas viáveis para a produção de mudas de umbu-cajazeira.

Palavras-chave: *Spondias* sp., turno de rega, estresse hídrico, crescimento, trocas gasosas.

ABSTRACT

In the semi-arid region, water deficit is one of the main limiting factors for seedling production, affecting even species adapted to local conditions, such as the umbu-cajazeira tree. Therefore, the objective was to evaluate the growth and leaf gas exchange of umbu-cajazeira seedlings under different irrigation frequencies. The experiment was conducted in a greenhouse, in a randomized block design, containing four treatments (TR1 - daily irrigation; TR2 - irrigation every two days; TR3 - irrigation every four days; and TR4 - irrigation every six days) and six replications. The seedlings were evaluated for growth characteristics, biomass, gas exchange, water content, and mineral nutrition. Water deficit did not significantly affect variables such as stem length and diameter, cutting diameter, number of leaves, internal CO₂ concentration, transpiration, CO₂ assimilation rate, and leaf temperature. However, daily and every six days irrigation reduced leaf area and biomass production. Umbu-cajazeira seedlings irrigated every six days showed the highest nitrogen and potassium levels, but the lowest concentrations of phosphorus and calcium. Thus, under water-limited conditions, irrigation frequencies between two and four days appear to be viable alternatives for the production of umbu-cajazeira seedlings.

Keywords: *Spondias* sp., irrigation schedule, water stress, growth, gas exchange.

INTRODUÇÃO

A umbu-cajazeira (*Spondias* sp.) é uma frutífera pertencente à família Anacardiaceae e ao gênero *Spondias*, nativa do semiárido brasileiro (Amorim *et al.*, 2024; Amorim *et al.*, 2025), sendo encontrada principalmente em quintais e em sistemas agrícolas familiares. A espécie destaca-se pelo seu potencial agroindustrial e medicinal, bem como pela adaptação às condições edafoclimáticas da região, o que lhe confere relevância socioeconômica significativa (Gadelha *et al.*, 2024). Ademais, essa espécie apresenta propriedades funcionais relevantes, incluindo atividades antioxidantes e anti-inflamatórias, dentre outras características promotoras da saúde (Santos *et al.*, 2023). No entanto, a produção de mudas frutíferas no semiárido brasileiro é prejudicada pelas deficiências hídricas, decorrentes de longos períodos de estiagem. Essas condições comprometem o desenvolvimento de algumas espécies do gênero *Spondias* (Silva *et al.*, 2023), que, apesar de serem consideradas tolerantes à seca, podem ter seu rendimento afetado por baixos níveis de disponibilidade de água, como a umbu-cajazeira (Gadelha *et al.*, 2024).

A água é um dos fatores essenciais à manutenção da vida de todos os organismos vivos, incluindo as plantas (Oguz *et al.*, 2022). Em condições de déficit hídrico, as plantas desencadeiam um conjunto de alterações morfoanatômicas, fisiológicas e bioquímicas, principalmente associadas à redução da perda de água pela transpiração com a tentativa de aumentar a eficiência do uso da água (Kapoor *et al.*, 2020; Haghpanah *et al.*, 2024). Assim, compreender os padrões e mecanismos de respostas das plantas ao estresse hídrico é fundamental para prever a funcionalidade e a resiliência das plantas diante de episódios de seca cada vez mais frequentes (Sun *et al.*, 2020).

Nesse contexto, em regiões semiáridas, as respostas das plantas ao déficit hídrico em diferentes estágios fenológicos devem ser investigadas também para o uso eficiente dos recursos hídricos e ao manejo sustentável da irrigação (Yavuz *et al.*, 2021). Práticas de irrigação ineficientes agravam o problema, promovendo o esgotamento acelerado dos recursos hídricos regionais (Si *et al.*, 2024), o que reforça a necessidade imperativa de otimizar as estratégias de irrigação para uma agricultura sustentável (Duan *et al.*, 2025).

Assim, em regiões semiáridas, onde os recursos hídricos agrícolas são limitados, o desenvolvimento de estratégias de irrigação eficientes e a adoção de tecnologias de irrigação que economizam água são cruciais para o uso sustentável desses recursos (Zhang *et al.*, 2025a). Dentre as estratégias de manejo da irrigação, destaca-se a

frequência de irrigação, definida como o intervalo de tempo, em dias, entre eventos sucessivos de irrigação (Oliveira *et al.*, 2025). A frequência de irrigação adequada para uma cultura depende de fatores como clima, solo, espécie vegetal e manejo adotadas; no entanto, o planejamento adequado garante a disponibilidade hídrica para o crescimento e a produtividade da planta (Costa *et al.*, 2024; Oliveira *et al.*, 2025).

Nesse cenário, a irrigação deficitária surge como abordagem viável para aumentar a produtividade da água na agricultura, uma vez que utiliza recursos hídricos limitados de forma estratégica, buscando manter níveis aceitáveis de crescimento e produtividade das culturas (Li *et al.*, 2022a). Essa abordagem tem sido amplamente estudada em diversas culturas como estratégia para equilibrar a conservação da água e o desempenho agrônômico (Wang *et al.*, 2025); no entanto, ainda são escassos os estudos avaliando seus efeitos em mudas de *Spondias* sp., especialmente no semiárido brasileiro. Assim, nós hipotetizamos que a aplicação de irrigação deficitária em mudas de *Spondias* sp. cultivadas na região semiárida brasileira pode aumentar a eficiência do uso da água sem comprometer significativamente o seu crescimento inicial e os parâmetros fisiológicos. Portanto, objetivou-se avaliar o crescimento e as trocas gasosas foliares de mudas de umbu-cajazeira sob diferentes frequências de irrigação.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em casa de vegetação, no período de dezembro de 2023 a março de 2024, no setor de produção de mudas do Departamento de Ciências Agrônômicas e Florestais da Universidade Federal Rural do Semiárido (UFERSA), Mossoró, Estado do Rio Grande do Norte, Brasil (5°12'14.2"S e 37°19'29.3"W, com altitude média de 18 m). A Figura 1 mostra a localização da área experimental e a disposição das mudas de umbu-cajazeira na casa de vegetação.

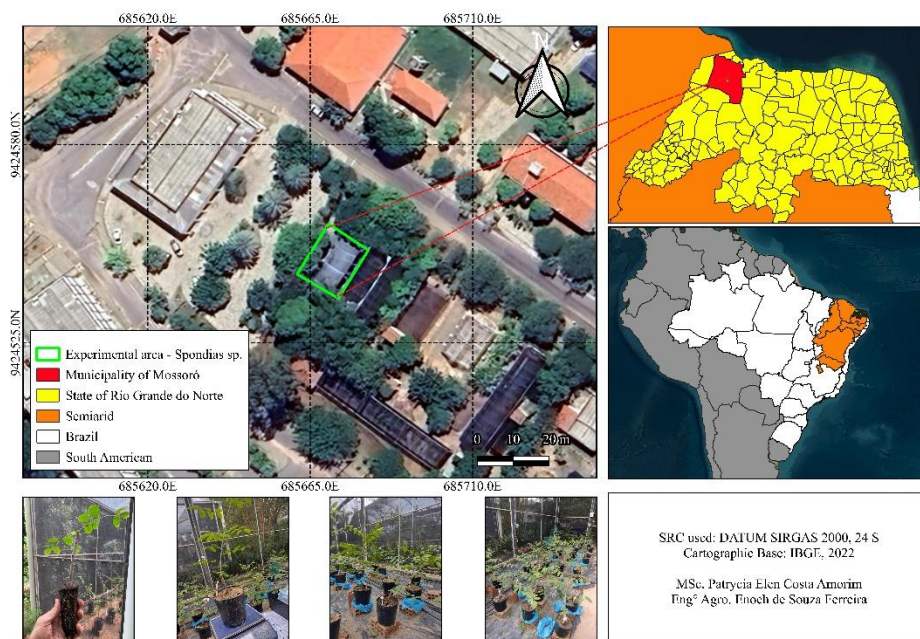


Figura 1. Mapa de localização da área experimental e disposição das mudas de umbu-ajazeira na casa de vegetação. Fonte: A autora (2026).

O clima da região, segundo Köppen-Geiger, é do tipo BSh', considerado seco e muito quente, com estação seca e chuvas de verão. A precipitação média anual é de 555 mm, com uma temperatura média anual de 27.8 °C (Alvares *et al.*, 2013; Climate-Data, 2024). Os dados climáticos (temperatura e umidade relativa do ar) da casa de vegetação durante o período experimental (dezembro de 2023 a março de 2024) foram monitorados por um termo-higrômetro digital (SH-122, J-Prolab, Brasil) (Figura 2).

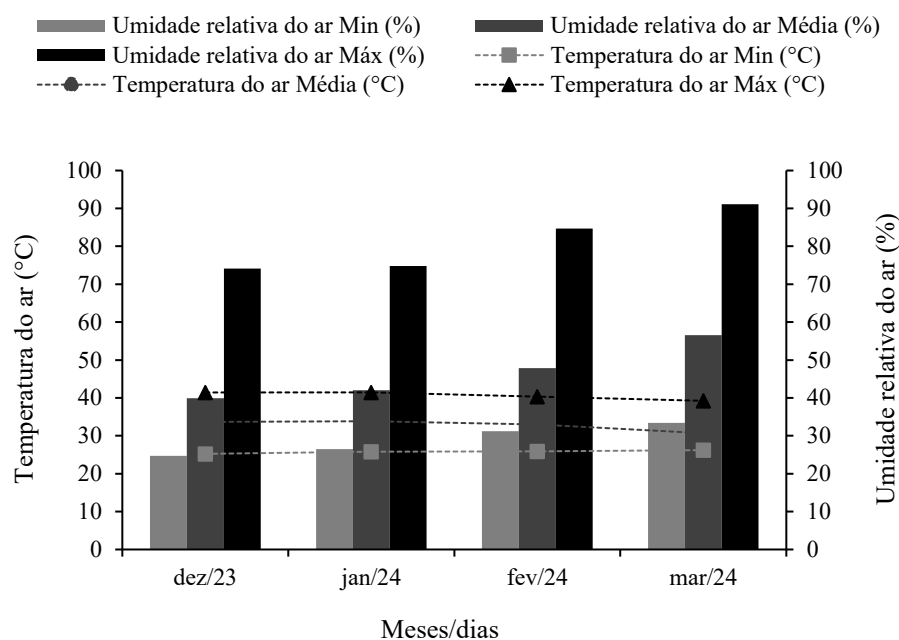


Figura 2. Dados climatológicos sobre temperatura e umidade relativa do ar: máxima (máx), mínima (min) e média durante o período experimental (11 de dezembro de 2023 a 12 março de 2024). Fonte: A autora (2026).

O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com quatro tratamentos (TR1 - irrigação diária; TR2 – irrigação a cada dois dias; TR3 – irrigação a cada quatro dias; e TR4 – irrigação a cada seis dias) e seis repetições, com uma muda por repetição, totalizando 24 unidades experimentais. Os turnos de rega foram determinados conforme os estudos realizados por Silva *et al.* (2023) para *Spondias tuberosa* e a *Spondias mombin* e por Yisau *et al.* (2023) para espécie *Annona muricata* L.

As estacas foram provenientes de matrizes com boas condições fitossanitárias e produtivas de plantas de umbu-cajazeira, situadas no *Campus Mossoró* da UFERSA, Rio Grande do Norte, Brasil. Os ramos foram retirados no fim do repouso vegetativo das partes mediana e superior da copa das plantas. As estacas foram padronizadas com cerca de 15 cm de comprimento e diâmetro médio entre 7,0 a 9,0 mm (Almeida *et al.*, 2017).

O plantio foi realizado em tubetes de polipropileno com capacidade volumétrica de 250 cm³, preenchidos com substrato comercial Tropstrato® (composto de superfosfato simples, nitrato de potássio, turfa, vermiculita e casca de pinus), com os seguintes atributos químicos: pH em CaCl₂ = 5,75; P = 65,70 mg dm⁻³; K = 1,60 cmol_c dm⁻³; Ca = 23,80 cmol_c dm⁻³; Mg = 12,40 cmol_c dm⁻³; Al = 0,00 cmol_c dm⁻³; H+Al = 4,20 cmol_c dm⁻³; Soma de bases = 37,80 cmol_c dm⁻³; Capacidade Troca Catiônica = 42,10 cmol_c dm⁻³ e Saturação por base = 89,8%, conforme o fabricante.

Aos 120 dias após o plantio, as mudas enraizadas foram transplantadas para vasos plásticos de 5,0 L, espaçados 1,0 m entre linhas e 0,5 m entre plantas, contendo substrato composto por areia e Tropstrato®, na proporção 2:1, o qual foi pesado em cada vaso para padronização da massa. Nesse período, as mudas foram mantidas sob irrigação diária mantendo o substrato próximo à capacidade de retenção de água (CRA) (100% de umidade do solo) por 120 dias. Antes e ao término do experimento, os substratos foram caracterizados quanto aos atributos químicos, conforme Silva (2009) (Tabela 1).

Tabela 1. Características químicas do substrato antes e ao término do experimento.

Caracterização inicial													
	pH	CE	M.O.	P	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SB	T	CTC	V	PST
		(dS m ⁻¹)	(g kg ⁻¹)	(mg dm ⁻³).....			cmolc dm ⁻³					(%).....	
	(H ₂ O)	¹)	¹)										
	1:2,5	1:2,5											
	4,40	2,87	29,00	180,20	66,3	397,50	3,70	3,70	9,13	9,13	9,13	100	18,90
Caracterização após tratamentos													
TR1	5,92	1,41	21,21	200,70	240,20	635,00	5,40	2,20	10,98	10,98	14,49	79,80	19,70
TR2	5,76	1,37	22,04	211,35	240,55	564,30	5,50	1,75	10,32	11,25	13,17	82,70	19,35
TR3	5,60	1,63	13,73	184,45	302,00	674,10	5,60	2,90	12,21	13,06	15,05	83,95	20,40
TR4	5,59	1,47	13,15	149,15	296,85	621,95	5,85	2,50	11,82	12,67	14,83	83,25	19,15

Fonte: A autora (2026). TR1 - irrigação diária; TR2 – irrigação a cada dois dias; TR3 – irrigação a cada quatro dias e TR4 – irrigação a cada seis dias. Al³⁺, (H + Al) e m = 0, P, K⁺, Na⁺: extrator Mehlich 1; Al³⁺, Ca²⁺, Mg²⁺: extrator KCl 1,0 mol L⁻¹; CE: Condutividade elétrica; SB: Soma de base; T: Capacidade de troca de cátions; M.O.: Matéria orgânica; PST: Percentagem de sódio trocável.

Aos 240 dias após o transplante das mudas (DAT), iniciou-se a irrigação com as referidas frequências de irrigação, conforme os tratamentos, com água de abastecimento local (Tabela 2). As mudas foram irrigadas manualmente com proveta graduada por 90 dias, e o volume aplicado foi calculado pelo método gravimétrico, mantendo-se a umidade do substrato em 100% da capacidade de retenção de água (CRA), conforme recomendado por Souza *et al.* (2000).

Tabela 2. Atributos físico-químicos da água de abastecimento local utilizada na irrigação de mudas de umbu-cajazeira.

pH	CE	K ⁺	Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	RAS
H ₂ O	dS m ⁻¹	mmol L ⁻¹	mmol L ⁻¹	mmol L ⁻¹	mmol L ⁻¹	mmol L ⁻¹	mmol L ⁻¹	mmol L ⁻¹	mmol L ⁻¹
7,50	0,58	0,26	4,59	1,46	0,74	2,40	0,10	3,50	4,4

Fonte: A autora (2026). pH (H₂O): Potencial hidrogeniônico em água; CE: Condutividade elétrica; K⁺: potássio; Na⁺: sódio; Mg²⁺: magnésio; Ca²⁺: cálcio; Cl⁻: cloro; CO₃²⁻: carbonato; HCO₃⁻: bicarbonato; RAS: razão de adsorção de sódio; Si: silício.

O volume de água a ser aplicado nas mudas de umbu-cajazeira foi determinado pela Eq.1:

$$VI = \left(\frac{PVr1 + PVr2}{2} \right) - \left(\frac{PVra1 + PVra2}{2} \right) \quad \text{Eq.1}$$

onde:

VI - Volume de água a ser aplicado no evento de irrigação (L);

PVr1 – Peso do vaso referência 1 (kg);

PVr2 - Peso do vaso referência 2 (kg);

PVra1 - Peso do vaso referência antes do evento da irrigação 1 (kg);

PVra2 - Peso do vaso referência antes do evento da irrigação 2 (kg).

O volume total de irrigação aplicado às mudas de umbu-cajazeira, conforme os tratamentos, foram determinados ao longo do período experimental (Tabela 3).

Tabela 3. Volume total de irrigação aplicado em mudas de umbu-cajazeira sob diferentes frequências de irrigação.

Turno de Rega (dias)	Volume de irrigação (L planta ⁻¹)
TR1	15.415,25
TR2	12.351,25
TR3	10.430,5
TR4	8.561

Fonte: A autora (2026). TR1 - irrigação diária; TR2 – irrigação a cada dois dias; TR3 – irrigação a cada quatro dias e TR4 – irrigação a cada seis dias.

A adubação mineral correspondeu a 50 mg de N, 150 mg de P₂O₅ e 75 mg de K₂O por dm⁻³ de solo, conforme Amorim *et al.* (2025), aplicando-se 400 mg de ureia (45% N), 1.250 mg de fosfato monoamônico (MAP = 12% N e 50% P₂O₅⁻) e 650 mg de cloreto de potássio (KCl = 60% K₂O) por vaso. A adubação foi aplicada semanalmente parcelada em 12 aplicações via fertirrigação.

Aos 90 após a aplicação dos tratamentos, foram analisadas as seguintes variáveis de crescimento: o comprimento da haste (C. haste, cm) com auxílio de uma trena, mensurado da base até a gema apical, o diâmetro da estaca (D. estaca, mm), determinado

com paquímetro digital, a uma distância de 5 cm da superfície do solo, o diâmetro da haste (D. haste, mm), aferido com paquímetro digital, a partir de 1 cm da base até a gema apical e para o número de folhas (NF), considerou-se a contagem direta das folhas totalmente expandidas. A área dos folíolos foi determinada por meio de coleta de todos os folíolos de cada muda e, em seguida, foram fotografadas sobre EVA (Etileno Vinil Acetato) (40 x 60 cm) contendo uma régua graduada em milímetros como escala de referência, sendo as imagens processadas e analisadas individualmente pelo *software* público ImageJ® (Ribeiro; Barbosa; Albuquerque, 2018).

Aos 85 dias após a aplicação dos tratamentos, foram analisadas as trocas gasosas: a medida foi realizada na terceira folha totalmente expandida contada a partir da gema apical entre 7h00 e 11h00 com o analisador de gás infravermelho (IRGA, GFS-3000, Walz, Effeltrich, Alemanha); o equipamento operou com velocidade do impulsor de 7; área de leitura de 8 cm²; temperatura da cubeta com 25 °C; concentração de CO₂ de 400 ppm; taxa de fluxo com 750 μmol min⁻¹; e densidade de fluxo de fótons de 1.200 μmol m⁻² s⁻¹. Foram obtidas as variáveis de déficit de pressão de vapor (VPD, kPa), taxa de assimilação de CO₂ (A_N , μmol m⁻²s⁻¹), transpiração (E , mmol de H₂O m⁻²s⁻¹), condutância estomática (g_s , mol de H₂O m⁻²s⁻¹), concentração interna de CO₂ (C_i , μmol CO₂ mol air⁻¹) e temperatura foliar (T_l , °C).

Para determinação da massa fresca das folhas (MFF, g), massa fresca da estaca (MFE, g), massa fresca da haste (MFH, g) e massa fresca da raiz (MFR, g), as diferentes partes das mudas foram coletadas separadamente e pesadas em balança semianalítica com precisão de 0,001 g (BL3200H, Marconi, Brasil). Em seguida, as amostras foram acondicionadas em sacos de papel Kraft e levados à estufa de circulação forçada a 65 °C até atingirem massa constante. Posteriormente, foram determinadas a massa seca das folhas (MSF, g), massa seca da estaca (MSE, g), massa seca da haste (MSH, g). A pesagem foi realizada com o auxílio de uma balança semianalítica (0,001 g) (BL3200H, Marconi, Brasil), sendo a massa seca da parte aérea (MSPA, g) obtida pelo somatório de MSF, MSE e MSH, e a massa seca total (MST, g) foi calculada pelo somatório de todas as partes da muda.

O teor de água (TA) das folhas (TAF), haste (TAH), estaca (TAE) e raiz (TAR) foram determinadas a partir da pesagem da massa fresca (MF) e seca (MS) das diferentes partes das mudas, e calculado segundo a fórmula proposta por Slavik *et al.* (1974), conforme apresentado na Eq.2.

$$TA (\%) = \left(\frac{MF - MS}{MF} \right) * 100 \quad \text{Eq.2}$$

O material foliar, após secagem, foi triturado em moinho de aço do tipo Willey (TE-650, Tecnal, Brasil) e, em seguida, armazenado em sacos plásticos identificados, para análises nutricionais de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg), utilizando o produto da digestão sulfúrica, conforme a metodologia proposta por Silva (2009).

Os dados obtidos foram submetidos ao teste de normalidade de Shapiro-Wilk ($p \geq 0,05$) (Shapiro; Wilk, 1965) e, estando dentro dos padrões de normalidade, foram submetidos à análise de variância pelo teste F ($p \leq 0,05$). Em casos de significância, aplicou-se o teste de Tukey a 5% de significância, utilizando o programa estatístico SISVAR[®], versão 5.3 (Ferreira, 2019).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A área dos folíolos (AF) de mudas de umbu-cajazeira foi influenciada significativamente pelos turnos de rega estudados ($p \leq 0,05$) (Tabela 4). A maior área do folíolo (AF) foi observada em TR2 (1.024 cm²), e as menores áreas foram obtidas em TR1 (778,310 cm²) e TR4 (778,585 cm²), resultando em reduções de 23,99% e 23,96%, respectivamente, para TR1 e TR4 (Tabela 4). Nosso resultado sugere que a irrigação diária (TR1) e o déficit de irrigação de seis dias (TR4) têm influência negativa para área dos folíolos. Em condições de saturação do solo, ocorre a limitação da difusão de oxigênio até as raízes, provocando a hipóxia (Joseph; Apollon; Oliveira, 2025), o que contribui para a redução da área foliar. Além disso, as folhas apresentam várias respostas ao déficit hídrico, incluindo redução da área (Dong; Luo; Wang, 2025). Segundo Seleiman *et al.* (2021), a redução da área foliar é um mecanismo de tolerância adaptativa no nível da maquinaria fotossintética, o que pode reduzir a taxa de assimilação de CO₂ e o rendimento da cultura (Kapoor *et al.*, 2020).

Tabela 4. Teste F e Tukey para comprimento da haste (C. haste), diâmetro da estaca (D. estaca), diâmetro da haste (D. haste), número de folhas (NF) e área do folíolo (AF) em mudas de umbu-cajazeira submetidas a diferentes frequências de irrigação.

Teste F (p-valor)					
FV	C. haste (cm)	D. estaca (mm)	D. haste (mm)	Número de Folhas	AF (cm ²)
Tratamento	0,6708 ^{ns}	0,8934 ^{ns}	0,4900 ^{ns}	0,4310 ^{ns}	0,0173*
Bloco	0,1035 ^{ns}	0,9250 ^{ns}	0,2918 ^{ns}	0,0239*	0,0199*
Teste de Tukey (EP, n=6)					
TR1	41,45 ± 3,81 a	9,75 ± 1,24 a	5,47 ± 1,71 a	10,50 ± 1,18 a	778,310 ± 109,68 b
TR2	46,95 ± 4,78 a	8,53 ± 1,50 a	5,32 ± 1,36 a	11,33 ± 0,80 a	1.024 ± 61,30 a
TR3	44,67 ± 7,19 a	9,08 ± 1,47 a	6,56 ± 1,44 a	9,83 ± 0,65 a	953,435 ± 56,924 ab
TR4	39,20 ± 5,28 a	7,98 ± 1,80 a	3,51 ± 1,17 a	10,17 ± 0,60 a	778,585 ± 62,499 b

Fonte: A autora (2026). TR1 - irrigação diária; TR2 – irrigação a cada dois dias; TR3 – irrigação a cada quatro dias e TR4 – irrigação a cada seis dias. FV = Fonte de variação. * e ^{ns} = Significativo a 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente, de acordo com o teste F e Tukey. Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey.

Não houve diferença significativa ($p > 0,05$) no comprimento da haste (C. haste), diâmetro da estaca (D. estaca), diâmetro da haste (D. haste) e número de folhas (NF) (Tabela 4 e Figura 3). Entre os turnos de rega, não se observou diferença estatisticamente significativa nas demais variáveis de crescimento. Essa resposta pode estar relacionada às características de adaptação das espécies do gênero *Spondias* às condições edafoclimáticas da região semiárida do Nordeste do Brasil, o que contribui para desempenhos satisfatórios e plantas resistentes à baixa disponibilidade hídrica (Santos *et al.*, 2020; Silva *et al.*, 2023; Gadelha *et al.*, 2024).



Figura 3. Crescimento de mudas de umbu-cajazeira sob diferentes frequências de irrigação. TR1 - irrigação diária; TR2 - irrigação a cada dois dias; TR3 - irrigação a cada quatro dias; TR4 - irrigação a cada seis dias. Fonte: A autora (2026).

A massa seca das folhas (MSF), massa seca da haste (MSH), massa seca da parte aérea (MSPA) e massa seca total (MST) foram influenciadas significativamente pelos turnos de rega (Tabela 5). No entanto, a massa seca da estaca (MSE) e massa seca da raiz (MSR) não apresentaram diferença significativa em função dos turnos de rega estudados ($p > 0,05$) (Tabela 5).

Tabela 5. Teste F e Tukey para matéria seca das folhas (MSF), matéria seca da estaca (MSE), matéria seca da haste (MSH), matéria seca da raiz (MSR), matéria seca total (MST) e matéria seca da parte aérea (MSPA) em mudas de umbu-cajazeira submetidas a diferentes frequências de irrigação.

Teste F (p-valor)						
FV	MSF (g)	MSE (g)	MSH (g)	MSPA (g)	MSR (g)	MST (g)
Tratamento	0,0289*	0,6125 ^{ns}	0,0003*	0,0075*	0,1639 ^{ns}	0,0343*
Bloco	0,2885 ^{ns}	0,4084 ^{ns}	0,1163 ^{ns}	0,4328 ^{ns}	0,5701 ^{ns}	0,7221 ^{ns}
Teste deTukey (EP, n=6)						
TR1	4,71 ± 0,88 ab	7,35 ± 0,47 a	4,13 ± 0,57 bc	16,19 ± 1,42 ab	16,30 ± 1,70 a	32,48 ± 2,41 ab
TR2	6,05 ± 0,36 a	8,13 ± 1,19 a	6,87 ± 0,82 ab	21,05 ± 1,69 a	17,44 ± 3,01 a	38,49 ± 4,57 ab
TR3	5,79 ± 0,27 ab	8,13 ± 1,43 a	7,23 ± 1,12 a	21,16 ± 2,02 a	19,07 ± 1,77 a	40,23 ± 3,60 a
TR4	4,00 ± 0,14 b	6,20 ± 1,35 a	2,38 ± 0,29 c	12,58 ± 1,71 b	11,88 ± 1,81 a	24,46 ± 2,97 b

Fonte: A autora (2026). TR1 - irrigação diária; TR2 – irrigação a cada dois dias; TR3 – irrigação a cada quatro dias e TR4 – irrigação a cada seis dias. FV = Fonte de variação. * e ^{ns} = Significativo a 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente, de acordo com o teste F e Tukey. Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey.

A maior massa seca das folhas (MSF) foi obtida em TR2 (6,05 g), correspondendo a um incremento de 51,25% em relação a TR4 (Tabela 5). Para massa seca da haste (MSH), massa seca da parte aérea (MSPA) e massa seca total (MST), os maiores valores foram obtidos em TR3, com 7,23 g, 21,16 g e 40,23 g, respectivamente (Tabela 5). Contudo, os menores acúmulos de massa seca foram verificados em TR4, resultando em reduções expressivas de 67,08% para MSH, 40,55% para MSPA e 39,20% para MST, em comparação a TR3. As reduções do acúmulo de biomassa estão associadas à diminuição da divisão celular e expansão foliar sob estresse hídrico, consequentemente reduzindo o acúmulo de biomassa vegetal (Cao *et al.*, 2024). Resultados semelhantes foram descritos por Fernando e Marengo (2023), que observaram diminuição do acúmulo de biomassa em mudas de *Hancornia speciosa* Gomes, em resposta ao déficit hídrico e a ciclos sucessivos de secagem e umedecimento do solo.

Os resultados obtidos indicam que os turnos de rega TR2 e TR3 proporcionaram melhor gestão dos recursos hídricos para o acúmulo de biomassa nas mudas de umbu-cajazeira na região semiárida. Isso evidencia que a irrigação em intervalos aumenta a eficiência no uso consuntivo dos recursos hídricos disponíveis, ao ajustar a disponibilidade hídrica à demanda das plantas e reduzir perdas improdutivas (Wenzel *et al.*, 2025). Quando a umidade do solo é suficiente, as plantas promovem a capacidade fotossintética, aumentando a razão de distribuição da biomassa acima do solo (Song *et al.*, 2022), o que se refletiu em maiores valores de MSH e MSPA das mudas de umbu-cajazeira. Assim, a estratégia de alocação de biomassa é diretamente influenciada pela capacidade das plantas de se adaptarem ao seu ambiente, especialmente à disponibilidade hídrica (Song *et al.*, 2022).

Não houve diferença significativa ($p > 0,05$) no déficit de pressão de vapor (VPD), na concentração interna de CO₂ (C_i), na transpiração (E), na condutância estomática (g_s), na taxa de assimilação de CO₂ (A_N) e temperatura foliar (T_l) em função dos turnos de rega (Tabela 6).

Tabela 6. Teste F e Tukey para déficit de pressão de vapor (VPD), concentração interna de CO₂ (*Ci*), transpiração (*E*), condutância estomática (*gs*), taxa de assimilação de CO₂ (*A_N*) e temperatura foliar (*Tl*) em mudas de umbu-cajazeira submetidas a diferentes frequências de irrigação.

Teste F (p-valor)						
FV	VPD (kPa)	<i>Ci</i> ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol air}^{-1}$)	<i>E</i> (mmol de (H ₂ O) m ⁻² s ⁻¹)	<i>gs</i> (mol de H ₂ O m ⁻² s ⁻¹)	<i>A_N</i> ($\mu\text{mol (CO}_2\text{) m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	<i>Tl</i> (°C)
Tratamento	0,6248 ^{ns}	0,3896 ^{ns}	0,7465 ^{ns}	0,5286 ^{ns}	0,6932 ^{ns}	0,8469 ^{ns}
Bloco	0,4571 ^{ns}	0,5408 ^{ns}	0,6015 ^{ns}	0,6384 ^{ns}	0,0803 ^{ns}	0,4441 ^{ns}
Teste de Tukey (EP, n=4)						
TR1	15,08 ± 0,60 a	239,13 ± 5,07 a	1,24 ± 0,12 a	81,52 ± 6,71 a	7,50 ± 0,61 a	26,84 ± 0,32 a
TR2	14,57 ± 0,52 a	251,35 ± 22,88 a	1,44 ± 0,24 a	98,05 ± 14,44 a	7,33 ± 0,64 a	26,70 ± 0,32 a
TR3	15,12 ± 0,65 a	220,39 ± 6,98 a	1,22 ± 0,09 a	81,70 ± 7,58 a	8,36 ± 0,58 a	26,85 ± 0,30 a
TR4	14,26 ± 0,31 a	253,27 ± 14,81 a	1,38 ± 0,14 a	96,88 ± 9,60 a	8,02 ± 1,17 a	26,53 ± 0,18 a

Fonte: A autora (2026). TR1 - irrigação diária; TR2 – irrigação a cada dois dias; TR3 – irrigação a cada quatro dias e TR4 – irrigação a cada seis dias. FV = Fonte de variação. * e ^{ns} = Significativo a 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente, de acordo com o teste F e Tukey. Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey.

As respostas às trocas gasosas indicam que um intervalo maior entre as irrigações não impacta negativamente as mudas de umbu-cajazeira. Este resultado é influenciado em grande parte pelo número de folhas, uma vez que houve comportamento semelhante nessa variável (Tabela 1), o que contribui para os processos fotossintéticos, uma vez que as folhas são a parte principal da planta onde a maioria dos produtos fotossintéticos são sintetizados (Kapoor *et al.*, 2020). Resultados contrários às trocas gasosas foram observados por Silva *et al.* (2023) em porta-enxertos de *Spondias* sob diferentes frequências de irrigação. Os autores identificaram que o intervalo de irrigação de cinco dias resultou em déficit hídrico, porém promoveu o desenvolvimento de mecanismos adaptativos em *S. tuberosa* e *S. mombim* visando à sobrevivência a essa condição não estressante.

Houve diferença significativa ($p \leq 0,05$) no teor de água na haste (TAH) e teor de água na raiz (TAR) em função dos turnos de regas estudados. Não houve influência dos turnos de rega ($p > 0,05$) para o teor de água na folha (TAF) e estaca (TAE) (Tabela 7).

Tabela 7. Teste F e Tukey para teor de água nas folhas (TAF), teor de água na haste (TAH), teor de água na estaca (TAE) e teor de água na raiz (TAR) em mudas de umbu-cajazeira submetidas a diferentes frequências de irrigação.

Teste F (p-valor)				
FV	TAF	TAH	TAE	TAR
Tratamento	0,1979 ^{ns}	0,0056*	0,2127 ^{ns}	0,0246*
Bloco	0,4693	0,2868	0,5648	0,1159
Teste de Tukey (EP, n=6)				
TR1	77,02 ± 0,75 a	69,83 ± 1,27 ab	77,68 ± 0,90 a	59,64 ± 0,98 ab
TR2	76,84 ± 0,63 a	67,31 ± 0,99 b	78,34 ± 0,83 a	58,86 ± 2,45 ab
TR3	75,88 ± 0,76 a	65,62 ± 1,26 b	77,52 ± 0,39 a	56,94 ± 1,65 b
TR4	78,15 ± 0,63 a	73,15 ± 1,81 a	79,56 ± 0,51 a	63,95 ± 1,07 a

Fonte: A autora (2026). TR1 - irrigação diária; TR2 – irrigação a cada dois dias; TR3 – irrigação a cada quatro dias e TR4 – irrigação a cada seis dias. FV = Fonte de variação. * e ^{ns} = Significativo a 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente, de acordo com o teste F e Tukey. Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey.

O turno de rega TR4 incrementou o TAR e o TAH em 12,31% e 11,48%, respectivamente, em mudas de umbu-cajazeira em comparação às submetidas ao TR3. Isso sugere que, ao aumentar o intervalo de irrigação, as mudas tendem a acumular água nesses órgãos, como uma adaptação para a sobrevivência no período limitado de indisponibilidade hídrica. Segundo Yan *et al.* (2023), em condições de estresse hídrico o teor de água em diferentes órgãos componentes varia, assim como suas taxas de alocação de recursos, indicando que as plantas podem ajustar seu equilíbrio por meio da redistribuição interna.

O maior TAR indica que as células radiculares se tornam magneticamente atraentes para a água, mantendo o teor de água interno superior ao do solo circundante (Santos *et al.*, 2022). Isso ocorre porque as raízes acumulam solutos compatíveis, que aliviam o potencial osmótico celular, gerando uma força de sucção que permite que a raiz absorva e mantenha a água em déficit hídrico, conservando a pressão de turgor e sustentando funções celulares essenciais em condições de disponibilidade hídrica limitada (Sandar *et al.*, 2022; Haghpanah *et al.*, 2024).

O maior teor de água na haste evidencia um mecanismo de adaptação da umbu-cajazeira ao déficit hídrico, uma vez que o caule atua como compartimento temporário de armazenamento de água, contribuindo para a manutenção do potencial hídrico da planta, amortecendo variações na demanda transpiratória (Zhang *et al.*, 2025b; Chen *et al.*, 2026). A capacidade de utilizar a água armazenada no caule permite à planta manter a atividade

metabólica sob baixos potenciais hídricos, caracterizando tolerância ao estresse hídrico (Boumenjel; Papadopoulos; Ammari, 2021).

Houve efeito significativo ($p \leq 0,05$) para os teores de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K) e cálcio (Ca) em função dos turnos de rega (Tabela 8). Não houve influência ($p > 0,05$) no teor de magnésio em função dos turnos de rega (Tabela 8).

Tabela 8. Teste F e Tukey para as variáveis: nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) nos tecidos foliares em mudas de umbu-cajazeira submetidas a diferentes frequências de irrigação.

Teste F (p-valor)					
FV	N (g kg ⁻¹)	P (g kg ⁻¹)	K (g kg ⁻¹)	Ca (g kg ⁻¹)	Mg (g kg ⁻¹)
Tratamento	0,0105*	0,0266*	0,02164*	0,0153*	0,0969 ^{ns}
Bloco	0,1602	0,2867	0,7748	0,0724	0,2446
Teste de Tukey (EP, n=6)					
TR1	12,44 ± 0,60 b	7,75 ± 0,54 a	10,19 ± 0,65 b	22,21 ± 1,80 a	3,05 ± 0,17 a
TR2	14,21 ± 1,25 ab	6,83 ± 0,63 ab	11,08 ± 0,68 ab	17,81 ± 1,36 ab	3,20 ± 0,20 a
TR3	17,66 ± 0,74 a	6,72 ± 0,22 ab	13,54 ± 0,38 ab	17,23 ± 1,52 b	3,28 ± 0,33 a
TR4	17,42 ± 1,84 a	5,53 ± 0,38 b	14,16 ± 1,38 a	16,27 ± 0,77 b	3,88 ± 0,22 a

Fonte: A autora (2026). TR1 - irrigação diária; TR2 – irrigação a cada dois dias; TR3 – irrigação a cada quatro dias e TR4 – irrigação a cada seis dias. FV = Fonte de variação. * e ^{ns} = Significativo a 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente, de acordo com o teste F e Tukey. Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey.

O maior teor de nitrogênio (N) foi obtido em TR3 (17,66 g kg⁻¹), correspondendo a um aumento de 41,96% em relação ao TR1 (Tabela 8). Sugerindo que o estresse moderado causado pelo déficit hídrico pode favorecer maior concentração de N, como mecanismo adaptativo, uma vez que esse nutriente participa da síntese de proteínas, enzimas e solutos orgânicos, contribuindo para o ajuste osmótico e para a manutenção do metabolismo vegetal sob condições de restrição hídrica (Sun *et al.*, 2025).

Os maiores valores de fósforo (P) e cálcio (Ca) foram obtidos no turno de rega TR1, com 7,75 g kg⁻¹ e 22,21 g kg⁻¹, respectivamente. Em comparação com o maior turno de rega (TR4), esses valores apresentaram reduções de 28,64% e 26,74%, respectivamente (Tabela 8). O déficit hídrico normalmente reduz a absorção de nutrientes minerais dependentes do fluxo de massa e a translocação desses nutrientes das raízes para a parte aérea, comprometendo diversos processos metabólicos da fisiologia vegetal (Bhattacharya *et al.*, 2021). O fósforo desempenha papel central no metabolismo energético, sendo componente estrutural de ácidos nucleicos e do ATP, a principal molécula de transferência de energia celular; dessa forma, sua redução em condições de

déficit hídrico pode comprometer o crescimento e o metabolismo das plantas (Sharma *et al.*, 2025).

A redução do teor de cálcio (Ca) pode estar relacionada ao seu mecanismo de absorção e transporte, uma vez que, mesmo não havendo diferença significativa nas trocas gasosas, o déficit hídrico tende a diminuir a transpiração, limitando o fluxo de Ca via xilema e, conseqüentemente, sua redistribuição para tecidos mais velhos, como as folhas. Além disso, alterações na distribuição e na dinâmica intracelular de Ca^{2+} afetam a formação dos sinais de cálcio, visto que variações nas concentrações citosólicas desse íon regulam diretamente a geração e a terminação dos sinais envolvidos nas respostas das plantas ao estresse hídrico (Li *et al.*, 2022b).

Os maiores valores de K foram observados no turno de rega TR4 (14,16 g kg⁻¹), o que representa um aumento de 38,95% em relação ao TR1 (Tabela 8). O incremento progressivo no teor de K em função dos maiores intervalos de irrigações indica um mecanismo adaptativo, uma vez que K atua na osmorregulação, na manutenção do potencial osmótico e do turgor celular, além de sua atuação no controle estomático, contribuindo para a adaptação das plantas a condições de déficit hídrico (Sharma *et al.*, 2025).

CONCLUSÕES

Em condições de restrição hídrica, as mudas de umbu-cajazeira apresentaram melhor desempenho quando submetidas a intervalos de irrigação de dois e quatro dias, demonstrando sua viabilidade como opções eficazes para a produção, estabelecimento inicial de plantas e economia de recursos hídricos em ambientes semiáridos. Em contrapartida, os resultados revelam que tanto a irrigação diária quanto um déficit hídrico prolongado de seis dias impactaram negativamente o crescimento das mudas, prejudicando o desenvolvimento desse órgão. Esses resultados enfatizam a importância da implementação de estratégias de manejo da irrigação que otimizem o uso da água e, ao mesmo tempo, garantam a qualidade das mudas, contribuindo para práticas agrícolas mais sustentáveis em áreas com recursos hídricos limitados.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, J. P. N *et al.* Concentrações de AIB e substratos no enraizamento e vigor de estacas lenhosas de cajaraneira. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 60, n. 1, p. 1-8, 2017. <https://doi.org/10.4322/rca.2004>
- ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- AMORIM, P. E. C. *et al.* Allometric models for non-destructive estimation of leaflet area of umbu-cajazeira (*Spondias* sp.). **Ciência e Agrotecnologia**, v. 48, p. e009924, 2024. <https://doi.org/10.1590/1413-7054202448009924>
- AMORIM, P. E. C. *et al.* Silicon Application Technology to Mitigate Saline Stress in Umbu-Cajazeira. **Silicon**, p. 1-13, 2025. <https://doi.org/10.1007/s12633-025-03555-6>
- BHATTACHARYA, A. Effect of Soil Water Deficit on Growth and Development of Plants: A Review. **Soil Water Deficit and Physiological Issues in Plants**, 393–488, 2021. https://doi.org/10.1007/978-981-33-6276-5_5
- BOUMENJEL, A.; PAPADOPOULOS, A.; AMMARI, Y. Growth response of *Moringa oleifera* (Lam) to water stress and to arid bioclimatic conditions. **Agroforestry Systems**, v. 95, n. 5, p. 823-833, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10457-020-00509-2>
- CAO, Y. *et al.* An integrated framework for drought stress in plants. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 25, n. 17, p. 9347, 2024. <https://doi.org/10.3390/ijms25179347>
- CHEN, Shu-Lin *et al.* Hydraulic capacitance as a key trait regulating water potential thresholds and drought adaptation in woody species. **Tree Physiology**, p. 7, 2026. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpag007>
- CLIMATE-DATE. **Clima Mossoró-RN**. 2024. Disponível em: <https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/rio-grande-do-norte/mossoro-4448/>. Acesso em: 15 Novembro, 2024.
- COSTA, F. H. R. *et al.* Frequencies of irrigation in millet crop under salt stress. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 28, p. e272197, 2024. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v28n3e272197>
- DONG, M.; LUO, H.; WANG, Q. Effects of Water Stress on Growth and Leaf Water Physiology of Major Plants in the Qaidam Basin. **Diversity**, v. 17, n. 9, p. 652, 2025. <https://doi.org/10.3390/d17090652>
- DUAN, T. *et al.* Effects of Water Application Frequency and Water Use Efficiency Under Deficit Irrigation on Maize Yield in Xinjiang. **Agronomy**, v. 15, n. 5, p. 1110, 2025. <https://doi.org/10.3390/agronomy15051110>

FERNANDO, A. M.; MARENCO, R. A. Successive cycles of soil drying and wetting improve tolerance to drought in mangabeira. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 58, p. e03360, 2023. <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2023.v58.03360>

FERREIRA, D. F. SISVAR: A computer analysis system to fixed effects split plot type designs. **Brazilian Journal of Biometrics**, v. 37, n. 4, p. 529-535, 2019. <https://doi.org/10.28951/rbb.v37i4.450>

GADELHA, T. M. *et al.* Comprehensive analysis of quality and bioactive compounds in umbu-cajá fruit during different ripening stages. **Scientia Horticulturae**, v. 327, p. 112886, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.112886>

HAGHPANAH, M. *et al.* Drought tolerance in plants: physiological and molecular responses. **Plants**, v. 13, n. 21, p. 2962, 2024. <https://doi.org/10.3390/plants13212962>

JOSEPH, R.; APOLLON, W.; OLIVEIRA, A. C. The stressing point: how plants respond to environmental stimuli. **Biotechnology Advances**, p. 108691, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2025.108691>

KAPOOR, D. *et al.* The impact of drought in plant metabolism: How to exploit tolerance mechanisms to increase crop production. **Applied sciences**, v. 10, n. 16, p. 5692, 2020. <https://doi.org/10.3390/app10165692>

LI, Q. *et al.* Research on crop irrigation schedules under deficit irrigation—A meta-analysis. **Water Resources Management**, v. 36, n. 12, p. 4799-4817, 2022a. <https://doi.org/10.1007/s11269-022-03278-y>

LI, Y. *et al.* Crosstalk between Ca²⁺ and other regulators assists plants in responding to abiotic stress. **Plants**, v. 11, n. 10, p. 1351, 2022b. <https://doi.org/10.3390/plants11101351>

NOVAIS, R. F.; NEVES, J. C. L.; BARROS, N. F. Ensaio em ambiente controlado. In: Oliveira, A. J.; Garrido, W. E.; Araujo, J. D.; Lourenco, S. **Métodos de pesquisa em fertilidade do solo**. Brasília: Embrapa-SEA, 1991. p. 189-254.

OGUZ, M. C. *et al.* Drought stress tolerance in plants: interplay of molecular, biochemical and physiological responses in important development stages. **Physiologia**, v. 2, n. 4, p. 180-197, 2022. <https://doi.org/10.3390/physiologia2040015>

OLIVEIRA, C. E. de *et al.* Effects of water regimes and irrigation frequencies on cowpea growth. **Engenharia Agrícola**, v. 45, n. spe1, p. e20240181, 2025. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v45nespe120240181/2025>

RIBEIRO, J. E. S.; BARBOSA, A. J.S.; ALBUQUERQUE, M. B. Leaf area estimate of *Erythroxylum simonis* Plowman by linear dimensions. **Floresta e Ambiente**, v. 25, n. 2, p. e20170108, 2018. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.010817>

SANDAR, M. M. *et al.* Root characterization of Myanmar upland and lowland rice in relation to agronomic and physiological traits under drought stress condition. **Agronomy**, v. 12, n. 5, p. 1230, 2022. <https://doi.org/10.3390/agronomy12051230>

SANTOS, É. M. D. *et al.* *Spondias* sp: shedding light on its vast pharmaceutical potential. **Molecules**, v. 28, n. 4, p. 1862, 2023. <https://doi.org/10.3390/molecules28041862>

SANTOS, L. J. S. *et al.* Teor foliar e ciclagem bioquímica de nutrientes em acessos de Umbuzeiro e Umbu-cajazeira. **Revista Caatinga**, v. 33, n. 3, p. 690-701, 2020. <https://doi.org/10.1590/1983-21252020v33n312rc>

SANTOS, P. R.; *et al.* Partição de biomassa e eficiência do uso da água em mudas de *Eucalyptus* sob estresse hídrico severo. **Scientia Forestalis**, v. 50, n. 132, 2022.

SELEIMAN, M. F. *et al.* Drought stress impacts on plants and different approaches to alleviate its adverse effects. **Plants**, v. 10, n. 2, p. 259, 2021. <https://doi.org/10.3390/plants10020259>

SHAPIRO, S. S., WILK, M. B. Analysis of variance test for normality. **Biometrika**, v. 52, n. 3-4, p. 591-611, 1965. <https://doi.org/10.2307/2333709>

SHARMA, A. *et al.* Plant-microbiome responses under drought stress and their metabolite-mediated interactions towards enhanced crop resilience. **Current Plant Biology**, p. 100513, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.cpb.2025.100513>

SI, J. *et al.* Irrigation as an effective way to increase potato yields in Northern China: A meta-analysis. **Agronomy**, v. 14, n. 3, p. 448, 2024. <https://doi.org/10.3390/agronomy14030448>

SILVA, F. C. **Manual de Análises Químicas de Solos, Plantas e Fertilizantes**. 2ª ed. Embrapa informação Tecnológica: Brasília, Brasil, 2009.

SILVA, L. A. *et al.* Morphophysiology and water relations of *Spondias* rootstocks under different irrigation frequencies. **Revista Caatinga**, v. 36, p. 865-874, 2023. <http://dx.doi.org/10.1590/1983-21252023v36n414rc>

SLAVIK, B. **Methods of studying plant water relations**. Berlin: Springer-Verlag, 1974.

SONG, K. *et al.* The effect of soil water deficiency on water use strategies and response mechanisms of *Glycyrrhiza uralensis* Fisch. **Plants**, v. 11, n. 11, p. 1464, 2022. <https://doi.org/10.3390/plants11111464>

SOUZA, C. C. *et al.* Avaliação de métodos de determinação de água disponível e manejo da irrigação em terra roxa sob cultivo de algodoeiro herbáceo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 4, n. 3, p. 338-342, 2000. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662000000300006>

SUN, X. *et al.* Research on the physiological mechanisms of nitrogen in alleviating plant drought tolerance. **Plants**, v. 14, n. 18, p. 2928, 2025. <https://doi.org/10.3390/plants14182928>

SUN, Y. *et al.* Response of plants to water stress: a meta-analysis. **Frontiers in plant science**, v. 11, p. 978, 2020. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00978>

WANG, Y. *et al.* Deficit Irrigation Provides a Trade-Off Between Water Use and Alfalfa Quality. **Agronomy**, v. 15, n. 4, p. 932, 2025. <https://doi.org/10.3390/agronomy15040932>

WENZEL, J. L.s *et al.* Enhancing irrigation scheduling by application efficiency estimations and soil moisture simulations. **European Journal of Agronomy**, v. 164, p. 127487, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2024.127487>

YAN, S. *et al.* Effects of drought stress on water content and biomass distribution in summer maize (*Zea mays* L.). **Frontiers in Plant Science**, v. 14, p. 1118131, 2023. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1118131>

YAVUZ, D. *et al.* Effects of water stress applied at various phenological stages on yield, quality, and water use efficiency of melon. **Agricultural Water Management**, v. 246, p. 106673, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106673>

YISAU, J. A. *et al.* Influence of watering regimes on early growth of *Annona muricata* seedlings. **Journal of Research in Forestry, Wildlife and Environment**, v. 15, n. 2, p. 105–112-105–112, 2023.

ZHANG, H. *et al.* Effects of Irrigation Interval and Irrigation Level on Growth, Photosynthesis, Fruit Yield, Quality, and Water-Nitrogen Use Efficiency of Drip-Fertigated Greenhouse Tomatoes (*Solanum lycopersicum* L.). **Agronomy**, v. 15, n. 5, p. 1068, 2025a. <https://doi.org/10.3390/agronomy15051068>

ZHANG, Z. *et al.* Revealing seasonal plasticity of whole-plant hydraulic properties using sap-flow and stem water-potential monitoring. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 29, n. 16, p. 3975-3992, 2025b. <https://doi.org/10.5194/hess-29-3975-2025>