



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA (UFRA)  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO (PROPED)  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOTECNOLOGIA APLICADA À  
AGROPECUÁRIA - PPGBAA

**CONDIÇÕES HÍDRICAS E TÉRMICAS PARA O DESENVOLVIMENTO  
EX VITRO E IN VITRO DE *Acmella oleracea* (L.) R.K. JANSEN  
(JAMBU)**

**ANA LÚCIA SANTIAGO DE OLIVEIRA BASTOS**

BELÉM/PA  
2026

**ANA LÚCIA SANTIAGO DE OLIVEIRA BASTOS**

**CONDIÇÕES HÍDRICAS E TÉRMICAS PARA O DESENVOLVIMENTO  
EX VITRO E IN VITRO DE *Acmella oleracea* (L.) R.K. JANSEN  
(JAMBU)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia Aplicada à Agropecuária, como requisito para obtenção do título de Mestre em Biotecnologia.

Área de Concentração: Biotecnologia

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Castelo Branco Carvalho

BELÉM/PA  
2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Bibliotecas da Universidade Federal Rural da Amazônia  
Gerada automaticamente mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)


---

- B327c Bastos, Ana Lúcia Santiago de Oliveira  
Condições hídricas e térmicas para o desenvolvimento ex vitro e in vitro de *Acmella oleracea* (L.) R.K.  
JANSEN / Ana Lúcia Santiago de Oliveira Bastos. - 2026.  
120 f. : il. color.
- Dissertação (Mestrado) - Programa de PÓS-GRADUAÇÃO em Biotecnologia Aplicada à Agropecuária  
(PPGBAA), Campus Universitário de Belém, Universidade Federal Rural Da Amazônia, Belém, 2026.  
Orientador: Prof. Dr. Leonardo Castelo Branco Carvalho
1. Mudanças climáticas. 2. Plasticidade fenotípica. 3. Agrião-do-Pará. 4. Integração multivariada. I.  
Carvalho, Leonardo Castelo Branco, *orient.* II. Título

---


CDD 660.6

## BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente  
 **LEONARDO CASTELO BRANCO CARVALHO**  
Data: 16/04/2026 08:23:42-0300  
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>


---

Prof. Drº Leonardo Castelo Branco Carvalho (Orientador)

Documento assinado digitalmente  
 **HERICA SANTOS DE OLIVEIRA**  
Data: 17/04/2026 20:15:02-0300  
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>


---

Prof. Drª Herica Santos de Oliveira - UFRA

Documento assinado digitalmente  
 **ORIEL FILGUEIRA DE LEMOS**  
Data: 17/04/2026 09:17:18-0300  
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>


---

Prof. Drª Oriel Filgueira de Lemos - EMBRAPA

Documento assinado digitalmente  
 **JOANNE MORAES DE MELO SOUZA**  
Data: 15/04/2026 16:37:41-0300  
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

---

Prof. Drª Joanne Moraes de Melo Souza - UFRA

Documento assinado digitalmente  
 **HELLEN KEMPFER PHILIPPSEN**  
Data: 17/04/2026 11:39:55-0300  
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

---

Prof. Drª Hellen Kempfer Philippsen - UFRA (suplente)

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer, primeiramente, aos meus orientadores, Prof. Dr. Leonardo Castelo Branco e Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Joanne Moraes, por todo o ensinamento, apoio acadêmico e emocional ao longo dos anos de mestrado. Agradeço pela disponibilidade constante, pela paciência em orientar e esclarecer minhas dúvidas e por todo o suporte oferecido para que este trabalho pudesse ser concluído.

Ao Prof. Dr. Walter Melo, por ter sido fundamental para a sobrevivência das minhas mudas no viveiro, contribuindo com orientações valiosas sobre a dosagem de fertilizantes e defensivos. Sou imensamente grata por toda a ajuda prestada.

À Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Dênmora Araújo, por ter disponibilizado as sementes utilizadas neste estudo, em conjunto com o Laboratório de Análise de Sementes (LABSEM), além de gentilmente ceder espaço em seu laboratório sempre que necessário para a resolução de eventuais demandas experimentais.

Ao meu noivo, Paulo Bemerguy, por todo o apoio nos momentos mais difíceis, especialmente durante minhas crises de ansiedade e angústias acadêmicas e emocionais. Obrigada por estar sempre ao meu lado, me incentivando e me fazendo acreditar que sou capaz de enfrentar desafios e alcançar meus objetivos.

Aos meus colegas de laboratório e de sala de aula — João Pedro, Aline, Samuel, Fernanda, Sylvia de Azevedo, Leidiane Lima e Tamyres Castro — pelo companheirismo, apoio e troca de conhecimentos ao longo dessa jornada. Em especial, a Amiel Johnson, que me acompanhou durante os testes iniciais da pesquisa, contribuindo ativamente em diferentes etapas do trabalho e permanecendo comigo no laboratório até tarde da noite para que os experimentos fossem concluídos. Minha sincera gratidão.

A Embrapa Amazônia Oriental e ao Dr<sup>o</sup> Oriel Figueira Lemos pela parceria com o projeto e todo apoio.

À Isabela Lima, minha dupla de mestrado, que esteve ao meu lado durante a implantação do experimento e em toda a fase final desta pesquisa. Ao longo desse percurso, compartilhamos não apenas as responsabilidades do trabalho, mas também acolhimento, inquietações, conselhos e momentos de apoio mútuo, cultivando uma linda amizade. Muito obrigada!

À família LABBIOTECH, por todo o apoio, aprendizado e pelos momentos especiais compartilhados, que tornaram essa jornada mais leve e significativa. Fazer parte desse grupo me permitiu realizar um sonho que carrego desde a graduação: trabalhar na área de Cultura de

Tecidos. Sou grata por cada experiência, pelas trocas de conhecimento e também pelas muitas risadas durante as escalas de trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos, que possibilitou a realização desta etapa da minha formação acadêmica.

Por fim, registro aqui meu sincero agradecimento a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para o meu crescimento durante a pós-graduação e para a concretização deste trabalho.

*"Você constrói melhores pontes  
entre os cientistas, compartilhando informações  
ao invés de retê-las".*

(Garry Nolan)

## RESUMO

O jambu, *Acmella oleracea* (L.) R.K. Jansen, constitui uma hortaliça nativa da Amazônia de elevado valor socioeconômico para pequenos produtores do Pará e de outras regiões brasileiras. Nesse contexto, a geração de informações estratégicas torna-se fundamental para subsidiar futuros programas de melhoramento genético, visando o desenvolvimento de cultivares adaptadas a ambientes de maior adversidade climática. O presente trabalho teve como objetivo avaliar a resposta ao estresse térmico e hídrico em duas variedades de jambu (variedade “amarela” e variedade “roxa”) em condições *in vitro* e *ex vitro* visando orientar estratégias de manejo e aprimorar o sistema de produção. No experimento de estresse hídrico, aplicaram-se cinco lâminas de irrigação (40, 70, 100, 130 e 160% da capacidade de campo) em viveiro, avaliando-se variáveis morfológicas (comprimento da parte aérea, comprimento da raiz, número de folhas, número de ramos, número de nós, quantidade de raízes, abertura de botões florais e inflorescências) e a biomassa de folhas, raiz, inflorescências e comprimento da parte aérea. No ensaio de estresse térmico, analisou-se a germinação e a morfologia do desenvolvimento inicial das plântulas *in vitro* sob temperaturas de 25, 33 e 41 °C. Para isso, utilizou-se o DIC em ambos os ensaios experimentais. Evidenciou-se que a disponibilidade hídrica e a temperatura modulam a expressão fenotípica das plantas de forma distinta. A variedade roxa demonstrou elevada plasticidade fenotípica sob condições ideais de irrigação (100% e 130% da capacidade de campo). A ACP confirmou essa tendência, associando a variedade a um maior investimento reprodutivo e à expansão da área foliar. A variedade amarela adotou estratégia morfológica conservativa, priorizando a estabilidade fisiológica. O déficit hídrico severo restringiu o crescimento vegetativo de ambas as variedades e predispõe as plantas a ataques de ácaros. No cultivo *in vitro*, a temperatura de 25 °C mostrou-se ideal para a germinação e desenvolvimento das plântulas, enquanto 33 °C induziu estresse significativo, com estiolamento, redução da área foliar e comprometimento da rizogênese. A temperatura de 41 °C inviabilizou completamente a germinação. Conclui-se que o cultivo do jambu é altamente dependente do manejo adequado das condições hídricas e térmicas, sendo recomendadas lâminas de irrigação próximas a 100–130% da capacidade de campo e temperatura de 25 °C em cultivo *in vitro*. Diante de eventos climáticos extremos, a variedade roxa destacou-se como a mais indicada para sistemas de cultivo intensivo, em função de sua maior plasticidade fenotípica e estabilidade produtiva frente a variações ambientais.

**Palavras-chave:** Integração multivariada. Mudanças climáticas. Plasticidade fenotípica. Agrião-do-Pará.

## ABSTRACT

Jambu, *Acmella oleracea* (L.) R.K. Jansen, is a native vegetable from the Amazon with high socioeconomic value for small producers in Pará and other regions of Brazil. In this context, the generation of strategic information is essential to support future genetic breeding programs aimed at developing cultivars adapted to environments with greater climatic adversity. The present study aimed to evaluate the response to thermal and water stress in two jambu varieties (“yellow” and “purple”) under *in vitro* and *ex vitro* conditions to guide management strategies and improve the production system. In the water stress experiment, five irrigation levels (40, 70, 100, 130, and 160% of field capacity) were applied in a nursery, evaluating morphological variables (shoot length, root length, number of leaves, number of branches, number of nodes, number of roots, bud opening, and inflorescences) and biomass of leaves, roots, inflorescences, and shoot length. In the thermal stress assay, germination and initial seedling development morphology *in vitro* were analyzed under temperatures of 25, 33, and 41 °C. A completely randomized design (CRD) was used in both experiments. It was evidenced that water availability and temperature distinctly modulate the phenotypic expression of plants. The purple variety demonstrated high phenotypic plasticity under ideal irrigation conditions (100% and 130% of field capacity). PCA confirmed this trend, associating the variety with greater reproductive investment and leaf area expansion. The yellow variety adopted a conservative morphological strategy, prioritizing physiological stability. Severe water deficit restricted vegetative growth in both varieties and predisposed plants to mite attacks. In *in vitro* cultivation, 25 °C proved ideal for germination and seedling development, while 33 °C induced significant stress, with etiolation, reduced leaf area, and compromised rhizogenesis. The temperature of 41 °C completely prevented germination. It is concluded that jambu cultivation is highly dependent on proper management of water and thermal conditions, with recommended irrigation levels close to 100–130% of field capacity and 25 °C in *in vitro* cultivation. In the face of extreme climatic events, the purple variety stood out as the most suitable for intensive cultivation systems due to its greater phenotypic plasticity and productive stability in the face of environmental variations.

**Keywords:** Multivariate integration. Climate change. Phenotypic plasticity. Agrião-do-Pará.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Inflorescências de Jambu ( <i>Acmella oleracea</i> (L.) R.K. Jansen): variedade amarela (A) e a de pigmento roxo (B)	22
Figura 2 – Estrutura química do espilantol	24
Figura 3 – Efeito da murcha temporária em mudas de jambu ( <i>Acmella oleracea</i> (L.) R.K. Jansen)	25
Figura 4 – Inflorescências de jambu ( <i>Acmella oleracea</i> (L.) R.K. Jansen) utilizadas como material experimental	38
Figura 5 – Área experimental	39
Figura 6 – Material utilizado para testes de germinação e beneficição das sementes	40
Figura 7 – Processo de germinação de sementes de <i>A. oleracea</i> em gerbox, sob temperatura controlada de $25 \pm 2^{\circ}\text{C}$	40
Figura 8 – Processo de semeio de sementes de <i>A. oleracea</i> em bandejas (A, B e C)	41
Figura 9 – Transplântio de mudas de <i>A. oleracea</i> utilizadas em experimento	42
Figura 10 – Procedimento de pesagem das amostras de solo para avaliação da capacidade de campo (A e B)	44
Figura 11 – Nivelamento do volume de água ofertado	45
Figura 12 – Produção de mudas da variedade amarela e a de pigmento roxo de <i>A. oleracea</i>	51
Figura 13 – Comprimento da parte aérea de duas variedades de jambu, amarela (V1) e roxa (V2), cultivadas em viveiro de mudas por 90 dias, em função de cinco gradientes hídricos (40, 70, 100, 130 e 160% da capacidade de campo)	52
Figura 14 – Comprimento radicular de duas variedades de jambu, amarela (V1) e roxa (V2), cultivadas em viveiro de mudas por 90 dias, em função de cinco gradientes hídricos (40, 70, 100, 130 e 160% da capacidade de campo).	54
Figura 15 – Morfologia da raiz de plantas de jambu ( <i>Acmella oleracea</i> (L.) R.K. Jansen), cultivadas em viveiro de mudas por 90 dias, em função de cinco gradientes hídricos (40, 70, 100, 130 e 160% da capacidade de campo)	55
Figura 16 – Comportamento do número de folhas de jambu ( <i>Acmella oleracea</i> (L.) R.K. Jansen), cultivadas em viveiro de mudas por 90 dias, em função de cinco gradientes hídricos (40, 70, 100, 130 e 160% da capacidade de campo).	56
Figura 17 – Comportamento do número de ramos de jambu ( <i>Acmella oleracea</i> (L.) R.K. Jansen), cultivadas em viveiro de mudas por 90 dias, em função de cinco gradientes hídricos (40, 70, 100, 130 e 160% da capacidade de campo)	58

Figura 18 – Comportamento da abertura de botões florais (A) e de inflorescências (B) de jambu ( <i>Acmella oleracea</i> (L.) R.K. Jansen), cultivadas em viveiro de mudas por 90 dias, em função de cinco gradientes hídricos (40, 70, 100, 130 e 160% da capacidade de campo)	59
Figura 19 – Análise de Componentes Principais (ACP) das variáveis morfológicas de jambu em função de cinco gradientes hídricos (40, 70, 100, 130 e 160%)	61
Figura 20 – Contribuição das variáveis morfológicas de jambu em função de cinco gradientes hídricos (40, 70, 100, 130 e 160%) para a variabilidade total da CPA.	63
Figura 21 – Análise de biomassa de haste de jambu em função de cinco gradientes hídricos (40, 70, 100, 130 e 160%)	64
Figura 22 – Análise de biomassa de folhas de jambu em função de cinco gradientes hídricos (40, 70, 100, 130 e 160%)	66
Figura 23 – Análise de biomassa de inflorescências de jambu em função de cinco gradientes hídricos (40, 70, 100, 130 e 160%)	67
Figura 24 – Análise de biomassa de raiz de jambu em função de cinco gradientes hídricos (40, 70, 100, 130 e 160%)	70
Figura 25 – Análise de Componentes Principais (ACP) das variáveis de biomassa de jambu em função de cinco gradientes hídricos (40, 70, 100, 130 e 160%)	73
Figura 26 – Incidência de infestação por ácaros em plantas de jambu em função de cinco gradientes hídricos (40, 70, 100, 130 e 160%)	76
Figura 27 – Efeito de murcha temporária em plantas de jambu em função de cinco gradientes hídricos (40, 70, 100, 130 e 160%)	77
Figura 28 – Plântulas submetidas a diferentes condições de cultivo <i>in vitro</i> , variando a concentração de sacarose (0 e 30 g/L) e temperatura (25°C, 33°C e 41°C), para avaliação da germinação	79
Figura 29 – Desenvolvimento inicial de plântulas em diferentes recipientes de cultivo <i>in vitro</i> (frascos e tubetes), sob tratamento com e sem adição de sacarose (30 g/L e 0 g/L), para avaliação da germinação	81
Figura 30 – Comparação do desenvolvimento de plântulas cultivadas em diferentes recipientes (tubetes e frascos) após o período de crescimento <i>in vitro</i>	81
Figura 31 – Germinação <i>in vitro</i> de jambu em função de dois gradientes de temperatura	83
Figura 32 – Análise do comprimento da parte aérea de jambu em função de dois gradientes de temperatura (25 e 33°C)	84

Figura 33 – Desenvolvimento morfológico de plântulas de jambu cultivadas <i>in vitro</i> sob temperatura de 25 °C	85
Figura 34 – Desenvolvimento morfológico de plântulas de jambu cultivadas <i>in vitro</i> sob temperatura de 33 °C	86
Figura 35 – Análise do número de folhas de jambu em função de dois gradientes de temperatura (25 e 33°C)	89
Figura 36 – Análise do número de raízes de jambu em função de dois gradientes de temperatura (25 e 33°C)	91
Figura 37 – Quantidade de raízes de jambu em função de dois gradientes de temperatura (25 e 33°C)	93
Figura 38 – Análise de Componentes Principais (ACP) das variáveis morfológicas de jambu em função de três gradientes de temperatura (25, 33 e 41°C)	96
Figura 39 – Análise de Correlação Canônica (CCA) considerando os experimentos com de jambu ( <i>Acmella oleracea</i> (L.) R.K. Jansen) conduzidos em viveiro e em <i>in vitro</i> em função de dois gradientes de temperatura (25 = fator controle, 33 = fator estresse) e hídrico (Lâmina 3 = fator controle; Lâmina 1 = fator estresse)	98
Figura 40 — Gráfico integrativo “loading no CC1 × correlação com estresse”: (i) contribuição ao padrão compartilhado (loading em CC1) e (ii) associação com estresse, considerando os experimentos com de jambu ( <i>Acmella oleracea</i> (L.) R.K. Jansen) conduzidos em viveiro e em telado em função de dois gradientes de temperatura (25 = fator controle, 33 = fator estresse) e hídrico (Lâmina 3 = fator controle; Lâmina 1 = fator estresse)	99

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados experimentais de irrigação obtidos com base nos diferentes percentuais de CC% aplicados a duas variedades de <i>A. oleracea</i> : amarela e a de pigmento de roxo	47
Tabela 2 – Dados da análise química do substrato utilizado no experimento	50
Tabela 3 – Resumo da análise de variância (ANOVA) para as variáveis morfológicas de jambu em função de cinco gradientes hídricos (40, 70, 100, 130 e 160%)	70
Tabela 4 – Resumo da análise de variância (ANOVA) para as variáveis morfológicas de jambu em função de três gradientes de temperatura (25, 33 e 41°C)	94

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ACP	Análise de componentes principais
CPA	Comprimento da parte aérea
CPR	Comprimento radicular
N.F	Número de folhas
LABSEM	Laboratório de Sementes e Mudas
V1	Variedade Amarela
V2	Variedade Roxa

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>18</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>20</b>
2.1	Objetivo geral	20
2.2	Objetivos específicos	20
<b>3</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b>	<b>20</b>
3.1	Considerações gerais sobre Jambu	20
3.1.1	Características botânicas da espécie	21
3.1.2	Características morfológicas da espécie	22
3.1.3	Compostos bioativos e propriedades farmacológicas	24
3.1.4	Manejo, cultivo e propagação	25
3.1.5	Potencial econômico da espécie	28
3.2	Efeitos das mudanças climáticas em plantas	30
3.2.1	Efeitos do estresse hídrico em plantas	31
3.2.2	Efeitos do estresse térmico em plantas	33
3.3	Deteção de mecanismos de tolerância e biomarcadores de estresse	34
3.4	Cultivo <i>in vitro</i>	35
3.5	Cultura de tecidos	36
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>37</b>
4.1	Materiais genéticos	37
4.2	Avaliação de estresse hídrico	38
4.2.1	Área experimental	38
4.2.2	Teste de germinação	39
4.2.3	Produção de mudas	41
4.2.4	Análise de solo	44
4.2.5	Teste de capacidade de campo	45
4.2.6	Análises morfológicas	48

4.3	Avaliação de estresse térmico	48
4.3.1	Área experimental	48
4.3.2	Experimento preliminar de germinação <i>in vitro</i>	48
4.3.3	Germinação <i>in vitro</i>	49
4.3.3.1	Desinfecção das sementes	49
4.3.3.2	Delineamento experimental	49
4.3.3.3	Análises morfológicas	50
4.4.	Análises estatísticas	50
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>51</b>
5.1	Avaliação de estresse hídrico	51
5.1.1	Crescimento da parte aérea (CPA)	51
5.1.2	Comprimento radicular (CPR)	53
5.1.3	Número de folhas (N.F)	56
5.1.4	Número de ramos (N.R)	57
5.1.5	Abertura de botões florais e inflorescências	58
5.1.6	Análise de componentes principais (ACP)	61
5.2	Biomassa de jambu sob estresse hídrico	63
5.2.1	Massa seca de haste (MSH;g)	63
5.2.2	Massa seca de folhas (MSF;g)	63
5.2.3	Massa seca de inflorescências (MSI;g)	67
5.2.4	Massa seca de raiz (MSR;g)	69
5.2.5	Efeitos de tratamento, variedade e interação sobre as variáveis de biomassa de jambu sob estresse hídrico	70
5.2.6	ACP para biomassa de jambu sob estresse hídrico	71
5.3	Respostas fisiológicas ao estresse hídrico	74
5.4	Avaliação de estresse térmico	77
5.4.1	Experimento preliminar de germinação <i>in vitro</i>	77
5.4.2	Germinação	82

5.4.3	Comprimento da parte aérea (CPA)	83
5.4.4	Número de folhas (N.F)	89
5.4.5	Número e quantidade de raízes	90
5.4.6	Comprimento radicular (CPR)	92
5.4.7	Efeitos de variedade e interação sobre as variáveis sob estresse térmico	94
5.4.8	ACP para jambu em estresse térmico	96
5.5	Análise integrativa estresse térmico-hídrico	98
5.6	Recomendações de cultivo	99
	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>101</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>102</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Entre as espécies nativas da Amazônia, o jambu (*Acmella oleracea* L.) se destaca como hortaliça de alto valor socioeconômico, fonte significativa de renda para pequenos produtores dos municípios do Pará, especialmente na região de Belém e entorno (PEREIRA et al., 2024; SANTOS et al., 2023). É amplamente reconhecido por seu papel cultural, gastronômico e por sua característica distintiva, que é a sensação de dormência, resultado da ligação do espilantol aos canais dependentes de potássio e outras vias sensoriais (SPINOZZI et al., 2021; SANTOS et al., 2023).

Nos últimos anos, o cultivo de *A. oleracea* tem se expandido, impulsionado pelo interesse crescente de mercados nacionais e internacionais em produtos naturais, funcionais e de baixa toxicidade. Apesar de sua natureza rústica e da falta de tecnologias para aumentar a produtividade, limitando seu cultivo a algumas áreas (SANTOS et al., 2023; FIEPA, 2025), esse movimento é fortalecido pela bioeconomia como vetor de desenvolvimento sustentável, especialmente na Amazônia, onde o uso racional dos recursos biológicos pode conciliar geração de renda, conservação ambiental e valorização cultural. Esse impulso tem contribuído para seu crescimento econômico, assim como a demanda global por produtos naturais, que movimenta cerca de 20 bilhões de dólares anuais, impulsionada pelos benefícios fisiológicos, nutricionais, ambientes sustentáveis e baixa toxicidade desses produtos (BLANCO, 2020; OECD, 2023; PEREIRA et al., 2024).

Com a realização da COP30 (30ª Conferência das Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima), em Belém do Pará, o jambu ganhou destaque como uma cultura nativa com potencial para integrar estratégias de adaptação às mudanças climáticas, segurança alimentar e fortalecimento da agricultura familiar. A COP30 reforçou a relevância estratégica da agricultura familiar amazônica para justiça climática e segurança alimentar (OLIVEIRA et al., 2026). Nesse contexto, sua conservação genética passou a ser vista como uma prioridade para a região. Entretanto, o avanço das mudanças climáticas impõem desafios expressivos à agricultura amazônica: o aumento das temperaturas, a irregularidade das chuvas e a maior frequência de eventos extremos afetam o desempenho das culturas agrícolas, sobretudo em sistemas de base familiar, que são mais vulneráveis devido à limitação de recursos e à menor capacidade de adaptação (IPCC, 2023; SILVA et al., 2023).

Nesse contexto, abordagens científicas avançadas oferecem ferramentas essenciais para identificar caracteres morfoagronômicos associados às respostas aos estresses ambientais, subsidiando programas de melhoramento genético e manejo de germoplasma. Associadas a

estudos morfoagronômicos, análises capazes de integrar várias informações a respeito das variedades possibilitam compreender as respostas diferenciais da planta em múltiplos níveis, desde o fenótipo até a regulação fisiológica (COPPENS et al., 2017; REBETZKE et al., 2019).

Estudos de variedades tradicionais são o ponto de partida para a conservação de germoplasma, que podem servir como reservatórios de alelos para futuros programas de melhoramento genético. Dessa forma, avaliações morfoagronômicas constituem o primeiro passo para elucidar mecanismos de resiliência a estresses abióticos, tendo em vista que a caracterização do fenótipo pode identificar diferentes padrões de resposta dessas espécies em condições de estresse. Essas abordagens, são a base para a prospecção de genes em estudos posteriores e a para a conservação de germoplasma (BHANDARI et al., 2024; SGROI et al., 2025).

No que diz respeito ao *A. oleracea*, poucos estudos são encontrados na literatura no que diz respeito à avaliação de estresse hídrico e o térmico, dentre eles alguns trabalhos destacam o manejo hídrico/eficiência do uso da água e produtividade sob diferentes tensões de água no solo (DE AVIZ et al., 2019) e déficit hídrico na germinação/vigor (SARMENTO et al., 2019), da mesma forma, há estudos focados em temperatura na germinação/vigor (DA SILVA et al., 2020). No entanto, não há relatos de estudos que tratem essas abordagens de forma unificada, bem como integrando essas informações em avaliações comparativas entre duas variedades da espécie. Essa integração permite conectar desempenho morfoagronômico e qualitativo, ampliando a base para recomendações de manejo sob cenários de aquecimento global e variabilidade hídrica (SAMPAIO et al., 2024; CARMO et al., 2024).

Diante do aumento de eventos climáticos (amplas variações de temperatura associadas à fenômenos de seca ou chuvas intensas) projetados para este século, o presente estudo buscou avaliar a resposta ao estresse térmico e hídrico em duas variedades de jambu cultivadas e comercializadas na região norte do Brasil (variedade “amarela” e variedade “roxa”) em condições *in vitro* e de viveiro visando orientar estratégias de manejo e aprimorar o sistema de produção.

A partir dessa abordagem, pretende-se gerar informações estratégicas para o desenvolvimento, em futuros programas de melhoramento genético, de cultivares adaptadas a ambientes de maior adversidade climática (tais como novas regiões de cultivo/nichos de mercado), contribuindo para a manutenção da produção, a valorização da biodiversidade amazônica e a preservação do patrimônio genético da espécie, fortalecendo a bioeconomia regional e alinhando-se às pautas globais de adaptação e mitigação às mudanças climáticas.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo Geral:

Avaliar o comportamento morfoagronômico de duas variedades de jambu (amarela e roxa) submetidas a diferentes gradientes hídricos e térmicos, visando determinar respostas adaptativas e a tolerância frente aos estresses abióticos em condições de viveiro e cultivo in vitro.

### 2.2 Objetivos Específicos:

a) Determinar as condições hídricas de cultivo de mudas de jambu, em viveiro, por meio da avaliação de caracteres morfoagronômicos.

b) Determinar as condições de temperatura para germinação e formação de plantas in vitro de jambu por meio da avaliação de caracteres morfoagronômicos

c) Comparar as respostas morfoagronômicas de duas variedades de jambu sob condições de estresse hídrico e térmico.

## 3 REVISÃO DA LITERATURA

### 3.1 Considerações gerais sobre o Jambu

A família botânica Asteraceae se destaca entre as fanerógamas por sua expressiva diversidade de plantas com flores e ampla dispersão geográfica, estando presente em todas as regiões do planeta, com exceção da Antártida (OLIVEIRA, INNECOO, 2015). Estima-se que essa família reúna em torno de 1.600 gêneros e aproximadamente 23.000 espécies (ANDENBERG et al., 2007).

*Acmella oleracea* (L.) R.K. Jansen, conhecida como jambu, é a espécie mais cultivada do gênero, pertencente à família Asteraceae, e é considerada nativa da América do Sul, especialmente do Brasil, Peru e Bolívia (DUBEY et al., 2013; HIND & BIGGS, 2003). Atualmente, encontra-se disseminada em várias partes do mundo, incluindo América do Norte, África, Ásia e Austrália, devido ao seu fácil cultivo e adaptação a diferentes ambientes (HOSSAN et al., 2010; LALTHANPUII et al., 2011).

A origem do jambu ainda é incerta, havendo relatos que a relacionam ao cultivo de *Acmella alba* (L'Hér.) R.K. Jansen no Peru central (Jansen, 1985). Em contrapartida, outros estudos atribuem sua origem ao Brasil, onde é conhecida como jambu e tradicionalmente cultivada como planta ornamental e medicinal. Apesar das controvérsias quanto à sua origem,

trata-se de uma espécie amplamente difundida, cultivada durante todo o ano e introduzida em diversas regiões tropicais e, posteriormente, subtropicais (LIM, 2014).

O gênero *Acmella* compreende 30 espécies e nove táxons infra específicos adicionais, tendo a *Acmella oleracea* (L.) R.K. Jansen como um dos seus membros mais distintos devido aos grandes capítulos cilíndricos discóides que exibem uma coloração amarelo-dourada única com a ponta vermelha. O nome do gênero geralmente sofre uma distorção na literatura devido algumas monografias usarem falsos sinônimos para representar a espécie, como *Spilanthes acmella* (L.) Murr, quando em outros artigos esta tem vagens de flores amarelas (douradas) e plantas com cerca de 32-60cm de altura. Os dois gêneros possuem características morfológicas, cromossômicas e moleculares distintas (JANSEN, 1985; RASHMAN, 2016). O nome atualmente aceito para a variação *Spilanthes acmella* (L.) Murr é *Blainvillea acmella* (L.) Philipson (UTHPALA, 2020).

Diferentes análises morfológicas, cromossômicas e fitoquímicas demonstram que os gêneros *Acmella* e *Spilanthes* exibem diferenças significativas, sustentadas por oito características morfológicas e por cromossomos específicos. O nome atualmente aceito para o jambu é *Acmella oleracea* (L.) R.K. Jansen, espécie pertencente ao gênero *Acmella*, inserido na família Asteraceae (SPINOZZI et al., 2022).

Segundo Jansen (1985), o gênero *Acmella* foi determinado em 1807 e contém 30 espécies identificadas. No Brasil, o mesmo autor denotou a existência de 10 espécies: *Acmella bellidioides* (Smith in Rees) R.K. Jansen, *A. brachyglossa* Cass., *A. ciliata* (Kunth) Cass., *A. decumbens* var. *decumbens* R.K. Jansen, *A. leptophylla* (DC.) R.K. Jansen, *A. oleracea* (L.) R.K. Jansen, *A. psilocarpa* R.K. Jansen, *A. pusilla* (Hooker & Arnott) R.K. Jansen, *A. serratifolia* R.K. Jansen e *A. uliginosa* (Sw.) Cass. A identificação se dá pela aparência e coloração da inflorescência (CHUNG et al., 2008).

### 3.1.1 Características botânicas e morfológicas da espécie

Possui características típicas das dicotiledôneas, como a presença de dois cotilédones na semente, enervação reticulada nas folhas e estrutura floral pentâmera (JENSEN, 1985). No âmbito taxonômico está situado na ordem Asterales, que agrupa plantas com inflorescências do tipo capítulo, característica marcante da família Asteraceae, à qual pertence (FREIRE et al., 2019).

A família Asteraceae é uma das maiores e mais diversificadas do reino vegetal, com ampla distribuição geográfica e importância econômica e ecológica, incluindo espécies

medicinais, ornamentais e alimentícias (SIMÕES et al., 2018). Dentro dessa família, o gênero *Acmella* integra a tribo Heliantheae e a subtribo Ecliptinae, grupos que compartilham características morfológicas e genéticas específicas, como a presença de inflorescências compostas e a produção de compostos bioativos (JANSEN, 1985).

Sua inflorescência é disposta em capítulos (Figura 1), terminais ou axilares de 10,5 e 23,5 mm de altura e 11-17 mm de diâmetro, que dão origem aos frutos do tipo aquênios, oblongo, marginado e aristado (MO CARDOSO et al., 2015; VILLACHICA et al., 1996). No entanto, podem exibir distintas formas de simetria. Enquanto os tipos disciais e filiformes mantêm a simetria radial, os radiais, ligulados e bilaterais manifestam zigomorfia, revelando a complexidade morfológica característica da família (ZHANG et al., 2024). Essa diversidade estrutural está associada ao seu sucesso adaptativo em variados ecossistemas (RELVAS et al., 2024).

**FIGURA 1.** Inflorescências de Jambu (*Acmella oleracea* (L.) R.K. Jansen): variedade amarela (A) e a de pigmento roxo (B). Belém, 2026.



**FONTE.** Autores

É uma planta herbácea de pequeno porte, de 30-40 cm de altura, com hastes rastejantes e ramificadas e caule cilíndrico, carnoso e de ramos decumbentes, geralmente sem raízes em nós. A raiz principal é pivotante, com abundantes ramificações laterais (GILBERT, 2022). Suas folhas são ovadas, dentadas, com ápice agudo, possuindo pecíolos longos e disposição oposta (CARDOSO et al., 2015). Quanto à germinação, esta ocorre de forma epígea, com a formação de uma plântula fanerocotiledonar, caracterizada pela elevação dos cotilédones

acima do substrato devido ao alongamento do hipocótilo (SOUSA, 2025). Esses cotilédones, de aspecto foliáceo e coloração verde (paracotilédones), emergem completamente do tegumento e permanecem nutrindo a plântula até o aparecimento das primeiras folhas verdadeiras. De acordo com Garwood (1996), essa configuração é classificada como fanerocotiledonar, epígea e com cotilédones foliáceos (PEF).

As folhas são opostas, membranáceas e pecioladas. Os pecíolos, com 30-60 mm de comprimento, são achatados, com sulcos sobre a superfície, ligeiramente alados e pouco pilosos. O limbo é geralmente oval, com 53-106 mm de comprimento e 40-79 mm de largura, com base truncada, tem pêlos esparsos sobre ambas as superfícies e glândulas pilóricas (GILBERT, 2022).

Os pedúnculos do jambu medem entre 3,5 e 12,5 mm de comprimento, são ocos, não possuem bractéolas e podem variar de glabros a levemente pilosos, com tricomas não glandulares. Suas flores são pequenas, hermafroditas e numerosas, podendo chegar a 400 ou até 620 por capítulo. Exibem coloração predominantemente amarelada e, em capítulos ainda imaturos, é possível observar áreas púrpuras localizadas na pálea do cálice, mas podem ocorrer variações fenotípicas relacionadas a condições ambientais ou genéticas.

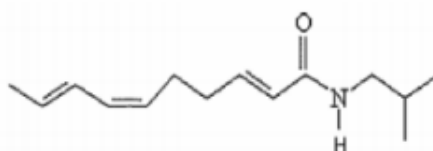
### **3.1.2 Compostos bioativos e propriedades farmacológicas**

O jambu destaca-se por suas aplicações medicinais em diferentes contextos culturais. Devido ao seu efeito anestésico e à sensação pungente característica quando em contato com a mucosa oral, a espécie é frequentemente mencionada na etnofarmacologia como opção terapêutica no tratamento de diversas enfermidades regionais (JERÔNIMO et al., 2024). Nas comunidades tradicionais da Amazônia, é utilizada para aliviar dores de dente, bem como no manejo de hepatite, malária e febre. Adicionalmente, relatos de populações nativas da Indonésia descrevem seu potencial uso como planta anticancerígena (OLIVEIRA et al., 2015; STEIN et al., 2021).

O estudo do perfil fitoquímico do jambu ainda é relativamente limitado. Dentre suas diversas moléculas bioativas, este é o principal responsável pelos efeitos analgésicos e anestésicos exibidos pela planta (STEIN et al., 2021). Esta espécie também produz óleos essenciais com predominância de metabólitos terpênicos em sua composição química, como E-cariofileno (48,64%– 33,61%),  $\gamma$ -pineno (17,3%) e mirceno (17,4%) (SPINOZZI et al., 2021). Do ponto de vista biossintético, o espilantol é derivado do ácido  $\alpha$ -linolênico e do aminoácido valina, combinação que lhe confere tanto caráter hidrofílico quanto lipofílico, em

função da presença de uma amida relativamente polar associada a um ácido graxo menos polar, conforme evidenciado na Figura 2 (NAKATANI; NAGASHIMA, 1992; SILVEIRA et al., 2016).

**FIGURA 2.** Estrutura química do espilantol.



**Fonte:** (RAMSEWAK et al., 1999).

De acordo com Homma et al. (2015), as inflorescências do jambu concentram maiores níveis de espilantol, o que as torna uma matéria-prima mais promissora para aplicações medicinais e cosméticas, em comparação aos ramos e folhas. No entanto, também pode ser encontrado na planta principalmente em suas folhas e com pouca concentração no caule, onde há a condução de seiva e outros compostos. Suas propriedades anestésicas, anti-inflamatórias, antimicrobianas, antioxidantes e afrodisíacas têm sido amplamente investigadas em estudos *in vitro* e *in vivo* (GILBERT et al., 2022).

A ingestão da parte aérea do jambu provoca efeitos característicos na cavidade oral, como leve formigamento, dormência e sensação anestésica temporária causada pelo espilantol (DUBEY et al., 2013). Tais ações sobre terminações nervosas periféricas têm sido aproveitadas no desenvolvimento de produtos fitoterápicos voltados ao alívio da dor de dente, inflamações bucais e dores musculares. Adicionalmente, os extratos de jambu têm demonstrado eficácia contra microrganismos patogênicos, o que reforça seu potencial como agente antimicrobiano natural. Há ainda relatos do uso tradicional da planta como afrodisíaco e estimulante do apetite.

Várias atividades biológicas já foram atribuídas ao espilantol, entre elas, atividade analgésica (CILIA-LÓPEZ et al., 2010), antinocicepitivo (DÉCIGA-CAMPOS et al., 2010) anti-ansiolítico (DÉCIGA-CAMPOS et al., 2010), anti-inflamatório (WU et al., 2008), antimutagênico (ARRIAGA-ALBA; RIOS) antifúngica e bacteriostática, inseticida (SHARMA; KUMAR, 2013) e antiparasitário (SPELMAN et al., 2011).

Outros compostos secundários presentes na planta incluem flavonoides, terpenos e ácidos fenólicos, que também contribuem para seu efeito antioxidante e citoprotetor. Esse crescente interesse também se estende ao setor de cosméticos, especialmente para a

formulação de cremes com ação rejuvenescedora, devido à composição química do jambu. Em consequência, há um foco cada vez maior em pesquisas sobre a atividade biológica da espécie, com diversos estudos voltados a essa temática (TRINDADE et al., 2020).

### 3.1.3 Manejo e cultivo

Com o crescimento da demanda por jambu na região amazônica, e em outros mercados consumidores, torna-se fundamental a busca por práticas adequadas de manejo que garantam produtividade, qualidade e regularidade na oferta da planta. A produção ainda é majoritariamente conduzida por agricultores familiares, o que reforça a necessidade da adoção de técnicas inovadoras que possam alinhar a tradição e sustentabilidade para o aumento da produtividade (LIMA et al., 2019).

De acordo com Spinozzi et al. (2022), o jambu exige irrigação frequente para evitar a desidratação das plantas, uma vez que a cultura possui elevada sensibilidade, manifestada por murcha temporária das folhas, evidenciada na Figura 3. A murcha temporária é um fenômeno conhecido como perda temporária de turgor celular, resultante de um déficit hídrico breve. Esse processo está associado à incapacidade transitória das células vegetais jovens de manter a pressão interna necessária para sustentação, especialmente em tecidos ainda pouco lignificados.

Na literatura fisiológica, Taiz et al. (2014) explicam que a turgidez celular pode ser rapidamente restabelecida após a reidratação, caracterizando assim uma resposta reversível ao estresse hídrico inicial, conhecida como murcha reversível ou transiente.

**FIGURA 3.** Efeito da murcha temporária em mudas de jambu (*Acmella oleracea* (L.) R.K. Jansen). Belém, 2026



**FONTE.** Autores

Além da disponibilidade hídrica, a espécie demanda boa luminosidade, com exposição direta ao sol, já que a radiação solar influencia positivamente no acúmulo de metabólitos secundários, responsáveis por propriedades sensoriais e farmacológicas da planta (SILVA et al., 2023).

Silva e colaboradores (2020) ressaltaram que o cultivo deve ser realizado preferencialmente em solos argilo-arenosos com elevado teor de matéria orgânica. Nas regiões produtoras do Norte do Brasil, observam-se variações quanto à densidade de plantas por cova, ao espaçamento entre indivíduos e entre linhas, bem como ao sistema de cultivo utilizado. Para um manejo mais eficiente da densidade populacional, o espaçamento de 0,2 × 0,2 m tem se mostrado o mais adequado, proporcionando maior produtividade por área (SAMPAIO et al., 2018). A colheita é realizada geralmente entre 60 e 70 dias após a semeadura, quando a planta atinge desenvolvimento vegetativo adequado e possui teor significativo dos compostos bioativos em suas folhas e inflorescências (SOUZA et al., 2022).

A germinação das sementes de jambu ocorre em condições de temperatura entre 25°C e 30°C, sendo recomendado o plantio em ambientes protegidos ou canteiros bem drenados, o que favorece a emergência uniforme e reduz a incidência de patógenos de solo. A plântula, por ser extremamente sensível a déficit hídrico, exige substratos com boa capacidade de retenção de água e nutrientes, além de manejo criterioso de irrigação (TAIZ et al., 2021). Atualmente, como observado em plantios de jambu locais, têm se utilizado substratos ricos em matéria orgânica, formulados a partir de turfa de sphagno, fibra de coco, vermiculita e adubação mineral balanceada, o que garante boa aeração, retenção hídrica e fornecimento inicial de nutrientes para o estabelecimento das mudas. Esse tipo de substrato tem mostrado resultados positivos no desenvolvimento inicial do jambu, favorecendo maior uniformidade na emergência e crescimento vigoroso das plântulas.

Considera-se também o uso de bandejas com células maiores ou que proporcionem melhor aeração. Estudos com hortaliças, como alface e rúcula, demonstraram que bandejas com menor número de células (ou seja, maior volume por célula) resultam em plantas com maior número de folhas, comprimento foliar, massa verde e seca, provavelmente devido à maior disponibilidade de substrato, água e nutrientes e oxigênio nas zonas radiculares.

O cultivo pode ser realizado tanto em sistemas convencionais de campo aberto quanto em estruturas de ambiente protegido, como estufas e telados. Em campo, a adoção de práticas como adubação orgânica, uso de cobertura morta e rotação de culturas contribuem para maior eficiência produtiva e sustentabilidade do cultivo (SILVA et al., 2018). Já em cultivo

protegido, destaca-se a maior uniformidade do crescimento, controle das condições ambientais e produção fora de época, o que possibilita maior valorização comercial.

### **3.1.3.1 Propagação**

A propagação ocorre principalmente por sementes, mas também por estaquia de hastes enraizadas ou ainda por técnicas de micropropagação (DIAS, 2023). A propagação por sementes, embora mais acessível, apresenta variabilidade genética entre as plantas, o que pode afetar a uniformidade do cultivo. Já a propagação vegetativa, por meio de estacas enraizadas, tem sido amplamente adotada por garantir maior homogeneidade, preservando características fenotípicas e químicas desejáveis, como o alto teor de espilantol. O emprego de sementes selecionadas, como alta taxa de germinação e vigor é determinante para o estabelecimento inicial da lavoura.

A escolha de materiais melhorados adaptados às condições locais pode influenciar tanto na produtividade quanto no teor de compostos bioativos de interesse industrial e medicinal (LOPES et al., 2020).

### **3.1.3.2 Nutrição**

A nutrição adequada do jambu tem sido objeto de estudos tanto quanto às fontes orgânicas quanto à adubação química, com agricultores familiares tendo preferência pela agricultura orgânica devido à sustentabilidade.

No campo orgânico, a utilização de gliricídia em associação com composto e húmus de minhoca mostrou-se eficiente para o incremento na produtividade e na massa fresca, altura e massa seca das plantas (OLIVEIRA et al., 2023). Além disso, a aplicação de torta de mamona e farinha de casco e chifre, seja no plantio ou via cobertura, promoveu maior acúmulo de massa seca, principalmente nas vegetativas e inflorescências (ALVES et al., 2023). O objetivo é maximizar a dose de nitrogênio utilizando substratos ricos como cava de aviário para produção orgânica. Doses crescentes de nitrogênio (até 180kg N/ha combinados com calagem) elevaram a eficiência fotossintética, o acúmulo de biomassa aérea e melhoraram a qualidade pós-colheita, embora altas doses também possam reduzir pigmentos fotossintéticos em certas variedades.

Estudos controlados com aplicações equilibradas de N e P indicam que 75 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> maximiza a produção de inflorescências, enquanto o nitrogênio promove aumentos lineares nas variáveis produtivas (RODRIGUES et al., 2014). O potássio destacou-se como o macronutriente mais acumulado pelas plantas de jambu, apresentando um acúmulo quase duas

vezes superior ao do nitrogênio, que ocupou a segunda posição entre os nutrientes mais absorvidos pela cultura (NORDI et al. 2022).

Além disso, o fornecimento equilibrado de nutrientes por meio da solução nutritiva constitui fator essencial para maximizar a produtividade e a qualidade de espécies cultivadas em sistemas hidropônicos (SAMBO et al., 2019). Ajustes na composição dessa solução têm demonstrado eficiência no incremento da biomassa e no acúmulo de compostos bioativos em culturas como manjeriço e perilla (LU et al., 2017).

### **3.1.4 Potencial econômico da espécie**

É uma planta de grande relevância econômica para o estado do Pará (OLIVEIRA et al., 2023; BORGES et al., 2021), além de desempenhar um papel essencial na identidade cultural e gastronômica da região. Além disso, tem despertado interesse tanto no mercado nacional quanto internacional e sua distribuição se estende por regiões tropicais da América Central, como o México, além de países da Ásia, incluindo Índia, China e Taiwan, e algumas áreas da África (DUBEY et al., 2013). Alguns estados brasileiros, como Rio de Janeiro, São Paulo, Minas Gerais e Piauí, e países como Estados Unidos e Japão têm reconhecido sua importância e manifestado um interesse crescente nesse produto (GAIA et al., 2020). Seu potencial econômico significativo está relacionada especialmente às regiões Norte e Nordeste de Brasil, onde sua produção e comercialização têm se consolidado como importante fonte de renda para agricultores familiares e pequenos produtores (SILVA et al., 2019).

A valorização econômica está associada à sua ampla utilização na indústria alimentícia, farmacêutica e cosmética, o que amplia as possibilidades de mercado e agrega valor à cadeia produtiva (OLIVEIRA et al., 2021).

O cultivo do jambu apresenta vantagens competitivas, como o ciclo curto, baixo custo de produção e boa adaptação a diferentes condições climáticas e de solo, o que favorece sua inserção em sistemas agroecológicos e diversificados (MARTINS et al., 2020). Além disso, a demanda crescente por produtos naturais e funcionais tem impulsionado o mercado de plantas medicinais e aromáticas, posicionando o jambu como uma cultura promissora para exportação e para o desenvolvimento de produtos com valor agregado, como extratos padronizados e cosméticos (SANTOS et al., 2018).

Dados regionais, baseados em pesquisas de campo feitas com pequenos produtores e agricultura familiar, indicam crescimento da produção de jambu na Amazônia, com destaque para o Pará como principal produtor, com cadeias familiares informais (Santos et al., 2023),

embora sem estatísticas nacionais consolidadas pelo IBGE. No entanto, a produção tem se expandido para os estados de São Paulo e Rio de Janeiro, que concentram a maior parte da área cultivada e da produção comercializada. Esse aumento reflete a expansão da demanda interna e o interesse crescente em mercados consumidores fora das regiões tradicionais, como o Sudeste e o Sul do país, onde o jambu tem sido incorporado à gastronomia regional e à indústria de alimentos funcionais (IBGE, 2023).

Estudos econômicos indicam que a cadeia produtiva pode gerar emprego e renda em comunidades rurais, contribuindo para a inclusão social e o desenvolvimento regional sustentável (SILVA et al., 2019). A comercialização do jambu ocorre tanto no mercado in natura, para uso culinário e medicinal, quanto na forma processada, o que amplia o alcance do produto e possibilita a diversificação das fontes de receita para os produtores (COSTA; ALMEIDA, 2017).

Entretanto, para maximizar o potencial econômico do jambu, é necessário superar desafios relacionados à padronização da qualidade, armazenamento, transporte e acesso a mercados mais amplos e organizados (FERREIRA et al., 2020). Investimentos em pesquisa, tecnologia e capacitação técnica são fundamentais para aprimorar a produtividade e a qualidade do produto, além de fortalecer a organização dos produtores e a comercialização em cadeias curtas e sustentáveis (MARTINS et al., 2020).

Adicionalmente, políticas públicas que incentivem a agricultura familiar, a certificação orgânica e o comércio justo podem ampliar o valor agregado, promovendo a sustentabilidade econômica e ambiental da cultura (SANTOS et al., 2018). A valorização também está relacionada à preservação do conhecimento tradicional e à promoção da biodiversidade, aspectos que agregam valor cultural e econômico ao produto (OLIVEIRA et al., 2021).

O jambu representa uma cultura com elevado potencial econômico, cuja exploração sustentável pode contribuir significativamente para o desenvolvimento socioeconômico de regiões produtoras, desde que acompanhada de estratégias integradas de manejo, comercialização e políticas públicas adequadas (SILVA et al., 2019; MARTINS et al., 2020).

### **3.2 Efeitos das mudanças climáticas em espécies cultivadas**

As mudanças climáticas globais representam um dos maiores desafios para a agricultura e a segurança alimentar mundial, uma vez que alteram significativamente os padrões ambientais aos quais as plantas estão adaptadas (IPCC, 2021). O aumento da temperatura média global, a alteração na distribuição e intensidade das chuvas, a elevação dos

níveis de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) atmosférico e a maior frequência de eventos climáticos extremos têm impactos profundos sobre os processos fisiológicos, bioquímicos, morfológicos e genéticos das plantas, afetando seu crescimento, desenvolvimento e produtividade (TAIZ et al., 2021; MILLER et al., 2020).

O estresse abiótico decorrente das mudanças climáticas manifesta-se principalmente por meio de condições adversas como déficit hídrico, salinização do solo e variações extremas de temperatura, que atuam isoladamente ou em combinação, exacerbando os efeitos negativos sobre as culturas agrícolas (WANG et al., 2020). Essas condições impõem limitações à fotossíntese, à absorção e transporte de água e nutrientes, além de desencadear desequilíbrios hormonais e produção excessiva de espécies reativas de oxigênio (EROs), que podem causar danos oxidativos e comprometer a integridade celular (FAROOQ et al., 2012).

Além dos impactos diretos, as mudanças climáticas influenciam a fenologia das plantas, alterando ciclos de florescimento, frutificação e maturação, o que pode alterar interações ecológicas essenciais, como a polinização e a dispersão de sementes (ZHAO et al., 2017). A variabilidade climática também afeta a incidência e severidade de pragas e doenças, criando desafios para o manejo integrado das culturas.

A capacidade das plantas de responder e se adaptar a essas condições adversas depende de uma complexa rede de mecanismos fisiológicos, bioquímicos e moleculares, que incluem a regulação da expressão gênica, a modulação hormonal, a síntese de osmólitos e antioxidantes, além de alterações morfológicas que visam minimizar os danos e garantir a sobrevivência (HUANG et al., 2018; SINGH; JHA, 2017). O entendimento desses mecanismos é fundamental para o desenvolvimento de estratégias de melhoramento genético e manejo agrônomico que promovam a resiliência das culturas frente às mudanças climáticas (FERREIRA et al., 2020).

Diante da complexidade e da magnitude dos impactos das mudanças climáticas, torna-se imprescindível a adoção de abordagens integradas que considerem os múltiplos estresses abióticos e suas interações, bem como a implementação de políticas públicas e práticas agrícolas sustentáveis que assegurem a produtividade e a sustentabilidade dos sistemas agrícolas no futuro (IPCC, 2021; TAIZ et al., 2021).

### **3.2.1 Efeitos do estresse hídrico em plantas**

A limitação hídrica constitui um dos principais entraves à produtividade agrícola, pois compromete diretamente o crescimento e o desenvolvimento das plantas (KOCH et al., 2019),

uma vez que a água participa de diversos processos fisiológicos, como as reações fotoquímicas da fotossíntese, o transporte e a absorção de nutrientes, tornando-se, portanto, um recurso indispensável para o crescimento das plantas e presente desde os primórdios da agricultura. Representa entre 90% e 95% da biomassa verde, sendo componente fundamental para a manutenção da integridade celular, tecidual e do organismo vegetal como um todo (TAIZ; ZEIGER, 2009). Em sua ausência, as plantas não conseguem completar seus processos fisiológicos, o que compromete sua sobrevivência no ambiente. Situações como estiagens prolongadas ou a baixa disponibilidade hídrica resultam em condições de estresse que afetam negativamente o crescimento e a produtividade vegetal.

A redução da disponibilidade de água afeta a continuidade de processos fisiológicos essenciais à sobrevivência vegetal, ocasionando perdas expressivas no desempenho das culturas, uma vez que restringe a expressão do potencial máximo de produção (ANSARI et al., 2019; CONTI et al., 2019). Além de limitar o potencial produtivo, o déficit hídrico desencadeia uma série de respostas fisiológicas nas plantas. A redução da disponibilidade de água no solo provoca o fechamento estomático, mecanismo de defesa que visa diminuir a perda de água por transpiração, mas que, conseqüentemente, restringe a entrada de CO<sub>2</sub> e reduz a taxa fotossintética (FLEXAS et al., 2018).

Essa limitação no processo fotoquímico compromete a produção de energia e biomassa, impactando diretamente o crescimento vegetal. Outro efeito relevante é o aumento da produção de espécies reativas de oxigênio (EROs), que em excesso podem causar danos oxidativos a membranas, proteínas e DNA, exigindo a ativação de sistemas antioxidantes para minimizar os prejuízos celulares (FAROOQ et al., 2012).

Entre as principais respostas morfológicas ao déficit hídrico, observa-se a redução da expansão foliar, estratégia que diminui a transpiração vegetal, e contribui para a conservação da água na planta. Em contrapartida, pode ocorrer um estímulo ao crescimento radicular em profundidade, favorecendo a exploração de camadas mais úmidas do solo e garantindo maior capacidade de absorção hídrica (FAROOQ et al., 2009).

Além disso, adaptações estruturais, como o engrossamento da cutícula, maior lignificação das paredes celulares e redução no tamanho e densidade dos estômatos, também são relatadas como mecanismos adaptativos frente ao estresse hídrico (TAIZ et al., 2021).

A resposta das plantas ao estresse hídrico envolve também uma complexa rede de sinais hormonais que regulam adaptações fisiológicas e bioquímicas. O ácido abscísico (ABA) destaca-se como o principal hormônio relacionado à percepção e resposta ao déficit de água, promovendo o fechamento estomático e a expressão de genes associados à tolerância ao

estresse (ZHU, 2016). Além do ABA, outros hormônios como citocininas, auxinas, etileno e giberelinas participam da modulação do crescimento e desenvolvimento sob condições adversas, ajustando o balanço entre crescimento e sobrevivência (HAKANSSON; PERSSON, 2019).

No nível bioquímico, o estresse hídrico induz a acumulação de osmólitos compatíveis, como prolina, açúcares solúveis e aminoácidos, que atuam na osmoproteção, estabilização de proteínas e membranas celulares, além de contribuir para a manutenção do potencial hídrico celular. A ativação de sistemas antioxidantes enzimáticos, incluindo superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT) e peroxidases (POD), é fundamental para a mitigação dos danos causados pelas espécies reativas de oxigênio (EROs), preservando a integridade celular e funcionalidade metabólica (MILLER et al., 2010).

Adicionalmente, a expressão diferencial de genes relacionados à síntese de proteínas de choque térmico (HSPs), aquaporinas e enzimas envolvidas na biossíntese de osmólitos tem sido amplamente documentada em plantas submetidas ao déficit hídrico, evidenciando mecanismos moleculares que conferem maior resiliência ao estresse (LI et al., 2020). A engenharia genética e a biotecnologia têm explorado esses conhecimentos para o desenvolvimento de cultivares mais tolerantes, por meio da introdução ou superexpressão de genes-chave associados à resposta ao estresse hídrico (SINGH; JHA, 2017).

A intensidade, duração e fase fenológica do estresse hídrico influenciam significativamente a magnitude dos efeitos sobre as plantas, sendo que períodos críticos, como a floração e o enchimento de grãos, apresentam maior sensibilidade, resultando em perdas produtivas mais severas (TAIZ et al., 2021; FAROOQ et al., 2009). Dessa forma, o manejo integrado da irrigação, aliado ao melhoramento genético e práticas agronômicas adequadas, constituem estratégia essencial para mitigar os impactos do estresse hídrico e garantir a sustentabilidade da produção agrícola em face das mudanças climáticas e da crescente escassez de recursos hídricos (FERREIRA et al., 2020; SOUZA et al., 2022).

### **3.2.2 Efeitos do estresse térmico em plantas**

O estresse térmico, caracterizado por temperaturas elevadas que excedem os limites ótimos para o desenvolvimento das plantas, constitui um dos principais fatores abióticos que comprometem a produtividade agrícola em diversas regiões do mundo (WANG et al., 2020). As altas temperaturas afetam múltiplos processos fisiológicos, bioquímicos e moleculares,

resultando em prejuízos significativos ao crescimento, desenvolvimento e rendimento das culturas (BOWERS; HANSEN, 2021).

No nível fisiológico, o estresse térmico provoca alterações na fotossíntese, principalmente pela inibição da atividade da ribulose-1,5-bisfosfato carboxilase/oxigenase (RuBisCO) e pela desestabilização dos complexos fotossintéticos, o que reduz a eficiência da captura de luz e a fixação de carbono (SALVUCCI; STRAND, 2019). Além disso, o calor excessivo pode causar a desorganização das membranas celulares, aumentando a permeabilidade e levando à perda de eletrólitos, comprometendo a integridade celular (LIU et al., 2018). O fechamento estomático, resposta comum aos estresses abióticos, limita a troca gasosa e a transpiração, afetando o balanço hídrico e a capacidade de resfriamento da planta (KIM et al., 2017).

No âmbito bioquímico, o estresse térmico induz a produção excessiva de espécies reativas de oxigênio (EROs), que, em níveis elevados, promovem danos oxidativos a lipídios, proteínas e ácidos nucleicos (HUANG et al., 2019). Para mitigar esses efeitos, as plantas ativam sistemas antioxidantes enzimáticos, como superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT) e peroxidases (POD), além de compostos não enzimáticos, como carotenoides e flavonoides, que atuam na neutralização das EROs (GILL; TUTEJA, 2010). A síntese de proteínas de choque térmico (heat shock proteins - HSPs) é outro mecanismo crucial, pois essas proteínas atuam como chaperonas moleculares, auxiliando no correto dobramento e estabilização de outras proteínas durante o estresse.

Morfologicamente, o estresse térmico pode resultar em redução do tamanho foliar, desfolha precoce e alterações na arquitetura radicular, que impactam negativamente a capacidade de absorção de água e nutrientes. Em estágios reprodutivos, o calor excessivo é particularmente prejudicial, podendo causar aborto floral, redução da viabilidade do pólen e comprometimento do enchimento de grãos, culminando em perdas expressivas na produtividade (ZHAO et al., 2017).

A resposta das plantas é modulada por uma complexa rede de sinais hormonais, incluindo o ácido abscísico (ABA), etileno, citocininas e auxinas, que regulam adaptações morfológicas e fisiológicas para aumentar a tolerância ao calor (LI et al., 2018). Além disso, avanços em biotecnologia têm permitido a identificação e manipulação de genes associados à tolerância térmica, como aqueles codificadores de HSPs, antioxidantes e fatores de transcrição específicos, abrindo caminhos para o desenvolvimento de cultivares mais resilientes (ZHANG et al., 2021).

A magnitude dos efeitos depende da intensidade, duração e fase fenológica em que ocorre, sendo que períodos críticos, como a floração e o enchimento de grãos, apresentam maior sensibilidade (TAIZ et al., 2021). Estratégias integradas que envolvam manejo agrônomo, seleção genética e monitoramento climático são essenciais para mitigar os impactos do estresse térmico e garantir a sustentabilidade da produção agrícola diante das mudanças climáticas globais (FERREIRA et al., 2020).

### **3.3 Detecção de mecanismos de tolerância e biomarcadores de estresse**

A detecção de mecanismos de tolerância e biomarcadores de estresse representa uma área estratégica para a agricultura moderna, possibilitando o desenvolvimento de cultivares resilientes e o manejo eficiente das culturas em ambientes adversos, contribuindo para a segurança alimentar e a sustentabilidade ambiental (ZHU, 2016; MILLER et al., 2020).

É fundamental para o desenvolvimento de cultivares mais resistentes e para a sustentabilidade da agricultura frente às adversidades ambientais. Esses mecanismos envolvem uma complexa rede de respostas fisiológicas, bioquímicas e moleculares que permitem às plantas sobreviverem e manter suas funções metabólicas sob condições adversas, como seca, salinidade, calor e frio (ZHU, 2016). A detecção precisa desses mecanismos é viabilizada pelo uso de biomarcadores, que são indicadores mensuráveis e específicos da resposta ao estresse, capazes de refletir o estado fisiológico e a capacidade adaptativa das plantas (FERREIRA et al., 2019).

Do ponto de vista fisiológico, parâmetros como a taxa fotossintética, condutância estomática, potencial hídrico e acúmulo de osmólitos são amplamente utilizados para avaliar a tolerância ao estresse, pois indicam a eficiência da planta em manter a homeostase hídrica e energética. No nível bioquímico, a quantificação de espécies reativas de oxigênio (EROs), atividade de enzimas antioxidantes (como superóxido dismutase, catalase e peroxidase) e a concentração de compostos osmoprotetores (como prolina e açúcares solúveis) são biomarcadores essenciais para compreender a capacidade antioxidante e osmótica das plantas sob estresse (SINGH et al., 2017).

Avanços nas técnicas moleculares têm permitido a identificação de genes e proteínas associados à tolerância ao estresse, ampliando o leque de biomarcadores disponíveis. A expressão diferencial de genes relacionados à síntese de osmólitos, transporte iônico, sinalização hormonal e reparo celular tem sido utilizada para detectar respostas específicas e mecanismos adaptativos em diferentes espécies e genótipos (HUANG et al., 2018). Além

disso, a análise de microRNAs e modificações epigenéticas tem revelado camadas adicionais de regulação da resposta ao estresse, oferecendo novas perspectivas para o melhoramento genético (LIU et al., 2020).

A integração de abordagens “ômicas” — transcriptômica, proteômica e metabolômica — tem se mostrado eficaz na identificação de biomarcadores robustos e na compreensão sistêmica dos mecanismos de tolerância (FERREIRA et al., 2019). Essas tecnologias possibilitam a análise simultânea de milhares de moléculas, permitindo a construção de redes de interação e a identificação de alvos moleculares para a engenharia genética e seleção assistida por marcadores (MILLER et al., 2020).

Entretanto, a aplicação prática desses biomarcadores enfrenta desafios relacionados à variabilidade ambiental, à complexidade das respostas ao estresse e à necessidade de validação em condições de campo (TAIZ et al., 2021). Portanto, a combinação de múltiplos biomarcadores e a utilização de plataformas integradas de análise são estratégias recomendadas para aumentar a precisão e a confiabilidade na detecção de mecanismos de tolerância (SINGH et al., 2017).

### **3.4 Cultivo *in vitro* e cultura de tecidos**

O cultivo *in vitro* representa uma técnica fundamental da biotecnologia vegetal, permitindo a propagação rápida e controlada de plantas sob condições assépticas, utilizando meios de cultura artificiais para promover o crescimento de tecidos, órgãos ou células isoladas. Os meios de cultura, pioneiramente desenvolvido por Murashige e Skoog (1962), baseiam-se em formulações nutricionais balanceadas que simulam as necessidades fisiológicas das plantas, incluindo sais minerais, vitaminas, carboidratos e reguladores de crescimento, facilitando a micropropagação e a conservação de germoplasma. Fisiologicamente, o cultivo *in vitro* minimiza interferências ambientais, como patógenos e variações climáticas, permitindo estudos detalhados sobre respostas a estresses, além de aplicações práticas em melhoramento genético e produção de metabólitos secundários (GEORGE, 1993).

No caso específico de jambu, o cultivo *in vitro* tem sido empregado para micropropagação e a produção de compostos bioativos, como o espilantol, com estudos demonstrando sucesso na regeneração de plantas a partir de explantes nodais e foliares. Por exemplo, Kumar et al. (2010) descreveram um protocolo eficiente para a propagação *in vitro* de *S. acmella*, utilizando meio MS suplementado com BAP (6-benzilaminopurina) e ANA

(ácido naftalenoacético), alcançando taxas de multiplicação de até 8 brotos por explante em 4 semanas, o que facilita a produção massiva de mudas livres de patógenos. Adicionalmente, Singh et al. (2012) exploraram a indução de calos e raízes adventícias em culturas *in vitro* de jambu, destacando a influência de reguladores de crescimento na síntese de metabólitos, com aplicações em fitoterapia. Esses trabalhos evidenciam o potencial do cultivo *in vitro* para superar limitações de propagação convencional, como baixa germinação de sementes e vulnerabilidade a pragas, embora ainda haja necessidade de otimização para escalabilidade comercial. ADICIONAR TRABALHOS DO LABORATÓRIO (SANTOS ET AL 2025 E ALMEIDA ET AL 2020).

Apesar da relevância agrônômica e medicinal do jambu, há uma escassez notável de estudos científicos focados nas respostas fisiológicas da espécie a estresses abióticos, como o hídrico, em comparação com outras plantas medicinais tropicais. Revisões sobre estresse em plantas, como a de Chaves et al. (2003), enfatizam a abundância de pesquisas em culturas como milho e soja, mas destacam lacunas em espécies menores, incluindo jambu, onde investigações sobre tolerância à seca e interações com pragas são limitadas. Essa carência é corroborada por meta-análises em fitopatologia, como a de Huberty e Denno (2004), que apontam para a necessidade de mais estudos em plantas não-modelo, especialmente em regiões tropicais, para entender mecanismos de defesa e adaptação. A ausência de dados específicos sobre estresse hídrico em jambu impede o desenvolvimento de estratégias de manejo integrado, reforçando a urgência de pesquisas que integrem fisiologia, genética e agronomia para mitigar impactos produtivos em sistemas de cultivo vulneráveis.

A cultura de tecidos é uma técnica biotecnológica fundamental para o estudo das respostas de plantas a variados estresses ambientais, permitindo análises controladas e reproduzíveis em condições *in vitro* (BISWAS et al., 2020). Essa metodologia facilita a investigação dos mecanismos fisiológicos e bioquímicos envolvidos na adaptação e resistência das plantas a condições adversas como salinidade, seca, temperaturas extremas e poluentes, os quais são fatores limitantes para a produtividade agrícola (GUO et al., 2018).

De acordo com Da Silva et al. (2019), a utilização do cultivo *in vitro* possibilita o controle preciso do ambiente, permitindo a manipulação de variáveis como concentração de sais, níveis de nutrientes e a presença de agentes estressantes, como a presença de bactérias ou fungos. Isso é essencial para a avaliação do impacto desses fatores no crescimento celular, na organogênese e na expressão gênica relacionada à tolerância ao estresse. Por exemplo, estudos conduzidos por Chen et al. (2021) demonstraram que a exposição a diferentes concentrações de sal *in vitro* induz modificações na via de sinalização hormonal, resultando

em um aumento da síntese de osmólitos e antioxidantes, elementos cruciais para a mitigação do dano oxidativo.

Além disso, a cultura de tecidos permite a obtenção de material homogêneo, eliminando a variabilidade genética inerente encontrada em plantas cultivadas em campo (KUMAR et al., 2020). Isso torna os experimentos mais confiáveis e os resultados mais interpretáveis, visando o desenvolvimento de cultivares mais resistentes. O uso combinado de métodos histológicos, bioquímicos e moleculares em explantes submetidos a estresses ambientais *in vitro* tem possibilitado novo entendimento sobre a ação de genes específicos, bem como a identificação de biomarcadores de resistência (SINGH et al., 2019). E tornou-se uma ferramenta indispensável para o avanço das pesquisas em fisiologia vegetal, especialmente nas investigações sobre estresses ambientais, pois proporciona uma abordagem robusta não apenas para compreensão dos mecanismos adaptativos, mas também para o melhoramento genético e a produção sustentável de plantas sob condições subótimas (HASSANZADEH et al., 2022).

## **4 MATERIAL E MÉTODOS**

### **4.1 Materiais genéticos**

Para realização da pesquisa, foram utilizadas duas variedades tradicionais de Jambu (*A. oleracea*): Variedade de pigmento amarelo e a Variedade de pigmento Roxo. As inflorescências das variedades foram coletadas de plantas dos municípios de Belém, PA (01° 27' 21" S, 48° 30' 16" W e 10 m de altitude) e Santarém, PA (02° 26' 34" S, 54° 42' 28" W e 50 m de altitude), ilustradas na Figura 4. O material foi disponibilizado pelo Laboratório Didático de Análise de Sementes – LABSEM/UFRA.

**FIGURA 4.** Inflorescências de jambu (*Acmella oleracea* (L.) R.K. Jansen), variedade amarela, utilizadas como material experimental. Belém, 2026.



**FONTE.** Autores

## 4.2 Avaliação de estresse hídrico

### 4.2.1 Área experimental

O experimento foi conduzido durante os meses de Março a Novembro de 2025 em viveiro de mudas coberto com filme de polietileno de 100 $\mu$  aditivado contra radiação UV, localizado no Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, Pará, Brasil (1°27'18.5"S; 48°26'20.7"W), conforme mostra a Figura 5.

**FIGURA 5.** Área experimental. Belém, 2026.



**FONTE.** Autores

A microrregião de Belém apresenta clima do tipo Af, segundo a classificação de Köppen (PEEL et al., 2007), caracterizado por elevada umidade relativa (85%) e temperaturas médias entre 23°C e 33°C, com precipitação anual média de aproximadamente 2.870 mm, distribuída ao longo do ano, sendo mais intensa entre dezembro e maio (ALVARES et al., 2013). Essas condições climáticas são adequadas para o desenvolvimento das espécies estudadas, conforme descrito por Silva et al. (2019).

#### 4.2.2 Teste de germinação

A beneficiação e o teste de germinação das sementes foram conduzidos no LABSEM/UFRA com o objetivo de avaliar a sanidade e a germinação de sementes de ambas as variedades seguindo protocolos recomendados por Brasil (2009) e Vieira et al. (2018), que ressaltam a importância da análise fitossanitária para garantir a viabilidade e uniformidade do material experimental. Foram realizados dois testes independentes em gerbox, um para cada variedade de Jambu, com 50 sementes cada.

Inicialmente, as sementes foram submetidas a um processo de beneficiação para garantir a uniformidade do material experimental. Os aquênios foram manualmente retirados das inflorescências, com remoção da pálea utilizando pinça, acondicionados em sacos plásticos e armazenados em ambiente controlado (18°C e 50% UR) até a instalação do experimento, conforme procedimento descrito por Oliveira et al. (2020).

O substrato utilizado consistiu em duas folhas de papel mata-borrão Germitest, cujo peso foi previamente determinado (Figura 06). A quantidade de água adicionada foi calculada utilizando a fórmula ( $V=2,6 \times \text{peso do substrato}$ ), conforme metodologia padronizada por Brasil (2009), resultando na aplicação de 18 mL de água destilada deionizada por gerbox. As sementes foram incubadas em câmara de germinação a  $25 \pm 2^\circ\text{C}$ , com avaliações diárias durante 14 dias, adotando como critério de germinação a emissão radicular  $\geq 2$  mm, conforme Rehman et al. (1996).

Este protocolo é amplamente utilizado para avaliação de sementes de espécies da família Asteraceae, garantindo comparabilidade e reprodutibilidade dos resultados (FERREIRA & BORGHETTI, 2004).

**FIGURA 6.** Material utilizado para testes de germinação e beneficiação das sementes utilizadas como material experimental (A e B). Belém, 2026.

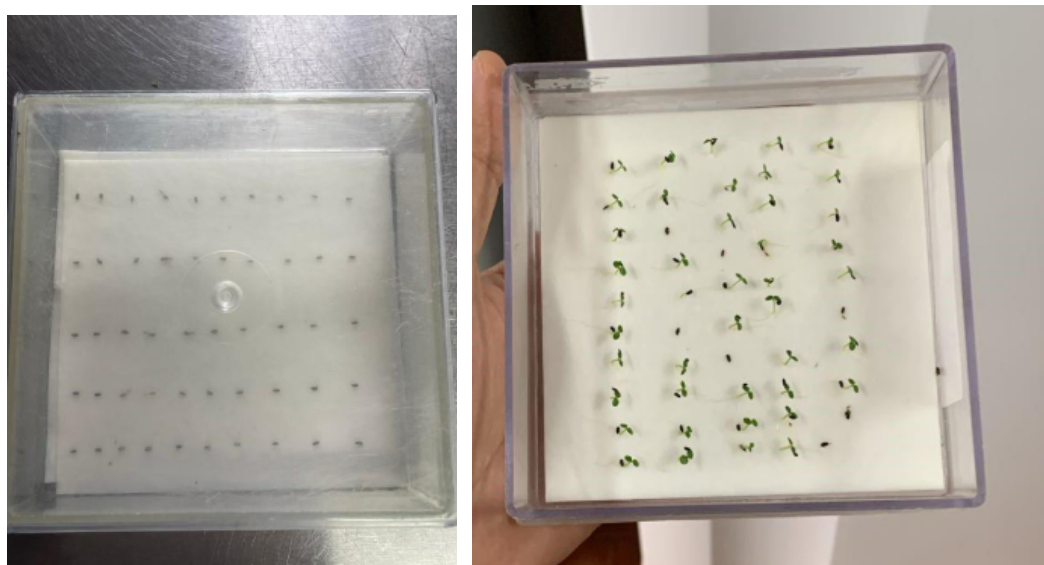


**FONTE.** Autores

A avaliação do processo de germinação foi conduzida ao longo de um período de quatro dias, com observações diárias, e o procedimento seguiu as diretrizes estabelecidas pelas Regras para Análise de Sementes (RAS) para a cultivar de alface, considerando que o Jambu, pertencente à mesma família botânica, a Asteraceae, não está especificado nas RAS.

Considerou-se como germinadas, as sementes que exibiram extensão radicular igual ou superior a dois milímetros (REHMAN et al., 1996).

**FIGURA 7.** Processo de germinação de sementes de *A. oleracea* em gerbox, sob temperatura controlada de  $25 \pm 2^\circ\text{C}$  (A = semeio e B= germinação). Belém, 2026



**FONTE.** Autores

### 4.2.3 Produção de mudas

A semeadura foi realizada em bandejas de plástico, preenchidas e cobertas com o substrato Carolina Soil® e quatro sementes por célula, conforme ilustrado na Figura 8.

**FIGURA 8.** Processo de semeio de sementes de *A. oleracea* em bandejas (A= substrato utilizado, B e C = semeio). Belém, 2026



FONTE. Autores

Esse substrato é composto por turfa de Sphagnum, vermiculita expandida, calcário dolomítico, gesso agrícola e fertilizantes minerais. Apresenta pH de  $5,5 \pm 0,5$ , condutividade elétrica de  $0,7 \pm 0,3$  mS/cm, capacidade de retenção de água de aproximadamente 55%, densidade de  $145 \text{ kg/m}^3$  e umidade máxima de 50%. A escolha por esse substrato deve-se às suas propriedades físico-químicas favoráveis ao desenvolvimento inicial das plântulas, proporcionando boa aeração, retenção de umidade e estabilidade nutricional, além de ser um substrato isento de contaminantes, o que contribui para a sanidade do material vegetal e a padronização das condições experimentais.

As plântulas foram irrigadas conforme a necessidade, até atingir a capacidade de campo do substrato, com aplicações realizadas nos períodos da manhã e da tarde durante todo o período de germinação.

Aos 15 dias após a semeadura, quando as plantas atingiram a altura média de 4 cm, foi realizado o desbaste, selecionando-se as plântulas mais vigorosas e eliminando as demais para evitar a competição por água, luz e nutrientes. Aos 30 dias após a semeadura, o desbaste

e repicagem seguiram práticas recomendadas para evitar competição e garantir o vigor das mudas (Silva et al., 2018).

Foi efetuada a repicagem para vasos com capacidade de 3L quando as plântulas exibiram de quatro a seis folhas definitivas, proporcionando condições adequadas para o seu desenvolvimento contínuo (Figura 9).

**FIGURA 9.** Transplântio de mudas de *A.oleracea* utilizadas em experimento para vasos com capacidade de 3L. Belém, 2026



**FONTE.** Autores

O substrato utilizado nos vasos foi composto por solo de textura média peneirado revolvido com camada orgânica e esterco bovino nas proporções 2:1:1, respectivamente, sem a adição de fertilizantes químicos para nutrição inicial.

Para o manejo fitossanitário das mudas, foi utilizado o defensivo agrícola DECIS® (princípio ativo: deltametrina), aplicado por pulverização foliar semanalmente, com o objetivo de controle preventivo e curativo de lagartas, conforme recomendações do fabricante e protocolos de manejo integrado de pragas (MIP) descritos por Silva et al. (2017).

Aplicou-se o fungicida MANZATE® (princípio ativo: mancozebe) para prevenção e controle de ácaros e doenças fúngicas, seguindo as doses e intervalos indicados na bula do produto e as boas práticas agrícolas recomendadas pela Embrapa (2013).

As aplicações foram realizadas quinzenalmente com pulverizador manual, sempre no final da tarde para minimizar perdas por evaporação e evitar fitotoxicidade causada pela radiação solar intensa (TAIZ et al., 2017). Foi respeitado um intervalo mínimo de 48 horas

entre as aplicações de defensivos agrícolas para prevenir possíveis interações químicas adversas e garantir a eficácia dos tratamentos, conforme orientações de manejo integrado de nutrientes e defensivos (EMBRAPA, 2013).

#### **4.2.4 Análise de solo**

Para caracterizar quimicamente o substrato, uma amostra representativa foi coletada e encaminhada para análise no Laboratório de Análise de Solos (PROSOLUM) da Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), em Belém-PA.

As análises foram realizadas seguindo metodologias padrão para determinação de pH em água, relação carbono/nitrogênio (C/N), teores de carbono orgânico (C), matéria orgânica (MO), nitrogênio total (N), fósforo (P), alumínio (Al), acidez potencial (H+Al), sódio (Na), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), enxofre (S), capacidade de troca catiônica (CTC), saturação por bases (V%), e micronutrientes como zinco (Zn), ferro (Fe), manganês (Mn) e cobre (Cu), seguindo metodologias padrão descritas pela Embrapa (2020).

#### **4.2.5 Teste de Capacidade de Campo**

A capacidade de campo do substrato foi determinada previamente à instalação do experimento, com o objetivo de estabelecer as lâminas de irrigação a serem aplicadas em estresse.

O procedimento seguiu as diretrizes do método gravimétrico, conforme protocolo descrito por Klar et al. (1966), que consiste na saturação do substrato, drenagem e posterior pesagem para determinação do teor de umidade correspondente à capacidade de retenção hídrica. Este método é amplamente utilizado em estudos de manejo hídrico e estresse em plantas (HILLEL, 2004).

Inicialmente, fez-se a pesagem de 21kg de solo peneirado resultante de seis amostras até atingir massa constante. Para obtenção da massa seca foi utilizada uma estufa com circulação forçada de ar, mantendo-se a temperatura em  $65 \pm 2$  °C por tempo indeterminado, até atingir a massa seca constante. Após esse procedimento, os vasos secos foram pesados e, em seguida, o substrato foi colocado em seus respectivos vasos, considerando seis amostras conforme ilustrado na Figura 11.

**FIGURA 10.** Procedimento de pesagem das amostras de solo para avaliação da capacidade de campo (A = tara do vaso e B = pesagem de amostras). Belém, 2026



**FONTE.** Autores

Em seguida, os vasos foram dispostos em uma bancada para permitir a drenagem do excesso de água por gravidade. Após a cessação visível da drenagem, realizou-se a pesagem de cada vaso para a obtenção da massa úmida constante. Determinou-se a diferença entre a massa do conjunto vaso + substrato saturado ( $M_{sat}$ ) e a massa do vaso contendo o substrato seco ( $M_{sec}$ ), conforme a Equação 1:

$$CC(\%) = \frac{M_{sat} - M_{sec}}{M_{sec}} \times 100$$

A massa seca do substrato, obtida após secagem em estufa a  $65 \pm 2$  °C, serviu como referência para os cálculos subsequentes. Após saturação e drenagem do excesso de água, as massas úmidas constantes dos vasos foram medidas, permitindo calcular a quantidade de água retida no substrato, representando 100% da capacidade de campo.

Os diferentes tratamentos de irrigação foram ajustados conforme a capacidade de campo, permitindo controlar com precisão a disponibilidade hídrica, fator crucial para estudos de estresse (LIMA et al., 2019).

As irrigações foram realizadas diariamente pelo sistema de gotejamento autocompensado (PCJ, Netafím, São Paulo, Brasil), com vazão de 3L. O gotejador foi nivelado a fim de manter o solo ajustado de capacidade de campo contida nos diversos tratamentos, representado pela Figura 12, sendo o volume da oferta de água nivelado com base na metodologia de Klar (1966), referência clássica para nivelamento de lâminas de

irrigação em experimentos de estresse hídrico. Por razões operacionais, cada dose de irrigação foi aplicada em uma linha distinta de irrigação por gotejamento, com mangueiras independentes por tratamento.

**FIGURA 11.** Procedimento do nivelamento do volume de água ofertado (A e B). Belém, 2026



**FONTE.** Autores

O delineamento experimental utilizado foi em DIC (Delineamento inteiramente casualizado), com cinco tratamentos correspondentes a diferentes lâminas de irrigação, aplicadas com base na porcentagem da capacidade de campo do solo: L1 (40%), L2 (70%), L3 (100%), L4 (130%) e L5 (160%). Cada tratamento foi composto por 10 repetições, totalizando 100 unidades experimentais (vasos). A lâmina correspondente a 100% da CC foi utilizada como controle para análise estatística.

Os tratamentos estabelecidos, correspondendo a percentuais variados da capacidade de campo (40%, 70%, 100%, 130% e 160%), bem como as respectivas vazões, doses diárias e tempos de gotejamento utilizados no experimento estão evidenciados na Tabela 1.

**TABELA 1.** Dados experimentais de irrigação obtidos com base nos diferentes percentuais de CC% aplicados a duas variedades de *A. oleracea*: amarela e a de pigmento de roxo. Belém, 2026

<b>TRATAMENTO</b>	<b>CC%</b>	<b>VAZÃO (mL/min)</b>	<b>DOSE/DIA</b>	<b>TEMPO DE GOTEJAMENTO</b>
<b>T1</b>	40%	432 mL/min	221 mL	0 min e 40s
<b>T2</b>	70%	440 mL/min	387 mL	0 min e 53s
<b>T3</b>	100%	432 mL/min	554 mL	1 min e 17s
<b>T4</b>	130%	460 mL/min	720 mL	1 min e 40s
<b>T5</b>	160%	420 mL/min	886 mL	2 min e 10s

**FONTE.** Autores

Observou-se que os tempos de gotejamento foram ajustados conforme o percentual da capacidade de campo, variando de 40 segundos para a lâmina de 40% (T1) até 2 minutos e 10 segundos para a lâmina de 160% (T5), enquanto as vazões apresentaram pequenas variações entre 420 mL/min a 460 mL/min, controlando de forma precisa a quantidade de água aplicada.

#### **4.2.6 Análises Morfológicas de plantas cultivadas sob estresse hídrico**

Após o desenvolvimento de inflorescências (45 a 60 dias), foi realizada a avaliação do desenvolvimento de ambas as variedades, sendo mensurados os seguintes caracteres: Comprimento da parte aérea (CPA; cm), Comprimento radicular (CPR; cm), Número de nós (N.Nós), Número de folhas (N.F), Número de ramos (N.R), Abertura de botões florais e inflorescências e diâmetro da haste (DH;mm). Após a maturação das sementes (120 dias) foi realizada a pesagem de matéria seca das seguintes variáveis para análise de biomassa: massa seca de haste (MSH;g), massa seca de raiz (MSR; g), massa seca de folhas (MSF; g), massa seca de inflorescências (MSI; g), de acordo com o preconizado por Taiz e colaboradores (2017).

O comprimento da planta adulta (CPA) foi obtido por meio de régua graduada e o diâmetro da haste medido com auxílio de paquímetro manual. Para a determinação de massa seca, as amostras foram submetidas à estufa com circulação forçada de ar, mantidas à temperatura de  $65 \pm 5^\circ\text{C}$  por 72 horas. A massa seca das plantas foi quantificada em balança semianalítica com precisão de 0,001 g.

#### **4.3 Avaliação de estresse térmico *in vitro***

O experimento foi conduzido no Laboratório de Biotecnologia da Universidade Federal Rural da Amazônia (Campus Belém), localizado a ( $1^\circ 27' 18.15''\text{S}$ ,  $48^\circ 26' 20.04''\text{O}$ ), e no Laboratório de Melhoramento de Plantas da Embrapa Amazônia Oriental, avaliando-se também as duas variedades de *A. oleracea*, a roxa e a amarela. Todas as sementes foram fornecidas pelo LABSEM/UFRA.

##### **4.3.1 Germinação *in vitro* em diferentes temperaturas**

###### **4.3.1.1 Desinfecção das sementes**

As sementes de jambu foram lavadas em água corrente e em câmara de fluxo laminar imersas em solução de álcool 70% (v/v) por 1 minuto, depois em solução de hipoclorito de sódio (NaClO) (v/v) contendo 2,0-2,5% de cloro ativo, por 20 minutos. Depois, as sementes foram lavadas em água destilada estéril (ALMEIDA et al, 2020). Procedimento padrão para minimizar contaminação em culturas *in vitro* (MOREIRA et al., 2015).

#### **4.3.1.2 Experimento preliminar de germinação *in vitro***

A priori, antes da condução do experimento principal de germinação, realizou-se um experimento preliminar com o objetivo de determinar a concentração ideal de sacarose e identificar o tipo de recipiente mais adequado para o cultivo dos explantes de jambu. Essa etapa inicial permitiu otimizar as condições de cultivo específicas para essas duas variedades roxa e amarela, que não existem nos protocolos já existentes, garantindo um ambiente propício ao desenvolvimento das plantas no experimento principal.

Após a desinfecção, as sementes foram inoculadas em frascos contendo 30 mL do meio de cultura MS (Murashige & Skoog, 1962) suplementado com diferentes concentrações de sacarose (10, 20 e 30 g L<sup>-1</sup>), utilizando tanto frascos quanto tubos. Todos os meios foram solidificados com 2 g L<sup>-1</sup> de Phytigel®, seguindo o protocolo definido na metodologia final. Nesta etapa, o experimento foi conduzido a 25°C em sala de crescimento, 33 e 41°C em câmara de germinação tipo BOD (*Biochemical Oxygen Demand*), permitindo avaliar as condições iniciais para a otimização do protocolo. Com os resultados obtidos a partir do experimento inicial, pode-se definir a metodologia principal da pesquisa.

#### **4.3.1.3 Germinação *in vitro* sob estresse térmico**

Após a desinfecção, as sementes das duas variedades de jambu (V1 – Amarela e V2 – Roxa) foram inoculadas em frascos contendo 30 ml de meio de cultura básico MS suplementado com 30g L<sup>-1</sup> de sacarose e 2 g L<sup>-1</sup> de Phytigel®, totalizando 60 frascos. O pH do meio foi ajustado para 5,8 e autoclavado por 15-20 minutos, a 121°C (pressão de 1,0 atm). Em seguida, foram incubadas em três temperaturas diferentes com diferença de 8°C entre elas para a germinação *in vitro*: 25 ± 2°C em sala de crescimento; 33 ± 2°C em BOD e 41 ± 2°C em câmara de germinação tipo BOD (*Biochemical Oxygen Demand*).

As temperaturas foram escolhidas devido ao maior valor já registrado em Belém foi de 38,5°C, com previsão de tendência de aumento de 1,9°C devido às mudanças climáticas (INMET, 2015). As temperaturas foram novamente avaliadas para garantir a confiabilidade e validar os resultados do estresse térmico obtidos, aumentando a confiança na veracidade das

conclusões, já que tivemos problemas anteriores com a B.O.D. Todos os tratamentos foram incubados em fotoperíodo de 16h e intensidade luminosa de  $25 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  por 45 dias (ALMEIDA et al, 2020).

O ensaio foi conduzido com delineamento inteiramente casualizado (DIC) em esquema fatorial 2 x 3 (duas variedades x três temperaturas). A identificação dos tratamentos seguiu o padrão TxV, onde “T” indica a temperatura e “V” a variedade, numerados de acordo com o tratamento: T1V1 (25°C - T1), T1V2 (25°C - V2), T2V1 (33°C - V1), T2V2 (33°C - V2), T3V1 (41°C - V1) e T3V2 (41°C - V2). Em cada tratamento foram utilizados 10 frascos como repetição e cada repetição foi representada por um frasco contendo 3 sementes.

#### **4.3.1.4 Análises morfológicas das plântulas germinadas *in vitro* em estresse térmico**

Após 45 dias em desenvolvimento *in vitro* foi realizada a avaliação morfológica, analisando as seguintes variáveis além das alterações refletidas sob estresse: Porcentagem de germinação, Porcentagem de contaminação, Comprimento da parte aérea (CPA; cm), Comprimento e quantidade de raízes (CPR; cm) e Número de folhas (N.F)

Para a determinação da porcentagem de plântulas foi adotado como critério de identificação as recomendações das Regras para Análise de Sementes (RAS) para espécie alface (BRASIL, 2009), uma vez que o jambu não possui referências na RAS.

#### **4.4 Análises estatísticas**

Os dados das variáveis morfoagronômicas obtidas (experimento em viveiro e de germinação) foram avaliados quanto aos pressupostos de normalidade e homocedasticidade e em seguida submetidos à análise de variância. Para as variáveis com valores de teste F significativo foi realizado o teste de Scott-Knott (SCOTT-KNOTT, 1974) para agrupamento das médias. Em seguida, foi realizado uma Análise de Componentes principais (PCA) para cada experimento, visando identificar quais variáveis foram determinantes para as diferenças observadas no desempenho das variedades.

A relação entre as variáveis morfoagronômicas mensuradas no experimento de estresse hídrico e estresse térmico foi avaliada por meio da Análise de Correlação Canônica (CCA) com objetivo de extrair pares de combinações lineares entre tais variáveis com correlação máxima, bem como para identificar relações específicas entre variáveis de relacionadas ao estresse hídrico e térmico.

Para realizar a análise integrativa entre os experimentos de estresse hídrico e térmico, foi empregada Análise de Correlação Canônica (CCA), visando identificar pares de combinações lineares entre os conjuntos de variáveis com máxima correlação (JOHNSON; WICHERN, 2007). Inicialmente, foram construídas duas matrizes pareadas (X: estresse hídrico; Y: estresse térmico) representando as mesmas unidades amostrais considerando como fatores: variedade (roxa, amarela) e condição (controle vs estresse).

Após os resultados preliminares, no ensaio térmico, definiu-se A = 25 °C (controle) e B = 33 °C (estresse); enquanto que no ensaio hídrico, adotou-se lâmina 3 como controle e lâmina 1 como estresse. As variáveis quantitativas de cada matriz foram padronizados (z-score) para minimizar efeitos de escala entre variáveis. A CCA foi conduzida estimando-se as correlações canônicas e os *loadings* (correlação entre variáveis originais e os eixos canônicos), os quais foram usados para interpretar quais variáveis contribuíram para o padrão compartilhado entre os estresses. Adicionalmente, a relação entre os escores canônicos e a condição experimental (controle/estresse) foi examinada graficamente para avaliar a separação entre tratamentos.

Todas as análises estatísticas foram processadas por meio da plataforma R (R CORE TEAM, 2025) utilizando os pacotes: CCA (GONZÁLEZ et al., 2008), readxl (WICKHAM; BRYAN, 2025), dplyr (WICKHAM et al., 2026), tidyr (WICKHAM; VAUGHAN; GIRLICH, 2026), ggplot2 (WICKHAM et al., 2026), knitr (XIE, 2025), factoextra (KASSAMBARA; MUNDT, 2020), ggnewscale (CAMPITELLI, 2025), ggrepel (SLOWIKOWSKI, 2026) e lifecycle (HENRY; WICKHAM, 2026).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Avaliação de estresse hídrico

#### 5.1.1 Testes germinativos

O índice de germinação de 100% das variedades amarela e a de pigmento roxo indicou alta qualidade fisiológica e sanidade das sementes utilizadas (Figura 7), corroborando com estudos anteriores que destacam a viabilidade elevada das sementes frescas de jambu sob condições controladas (SANTOS et al., 2021; OLIVEIRA & SILVA, 2020).

A rápida emergência da radícula entre o 3º e 4º dia após a semeadura reforçou a eficiência do protocolo de germinação adotado, alinhando-se com os parâmetros ideais de temperatura ( $25 \pm 2^\circ\text{C}$ ) para germinação de espécies tropicais (FERREIRA et al., 2019). Esses

resultados são promissores para a produção de mudas vigorosas, essenciais para os experimentos subsequentes e para a propagação comercial da espécie.

### 5.1.2 Análise de solo

A caracterização (Tabela 2) revelou um solo ácido (pH 4,2), com baixo teor de fósforo e presença significativa de alumínio trocável, o que pode limitar o crescimento radicular e a disponibilidade de nutrientes essenciais (MORAES et al., 2022).

A acidez elevada e o alumínio em formas trocáveis são fatores críticos em solos amazônicos, podendo causar toxicidade e estresse às plantas (SILVA et al., 2023). Contudo, a boa quantidade de matéria orgânica e a capacidade de troca catiônica relativamente alta (CTC = 9,64 cmol/kg) indicam potencial para retenção e fornecimento de nutrientes, o que pode mitigar parcialmente os efeitos adversos da acidez (COSTA & ALMEIDA, 2021).

**TABELA 2.** Dados da análise química do substrato utilizado no experimento. Belém, 2026.

pH	M.O	P <sup>(1)</sup>	K <sup>(1)</sup>	N <sup>(1)</sup>	Ca <sup>(2)</sup>	Mg <sup>(2)</sup>	Al <sup>(3)</sup>	(H+Al) <sup>(3)</sup>	SB	T	V	m
H <sub>2</sub> O	g/kg	...mg/dm <sup>3</sup> ...				..... cmol/dm <sup>3</sup> .....					.....%.....	
4,02	41,38	1,56	0,37	0,98	5,02	2,08	0,44	2,17	7,47	8,15	84,1	4,56

<sup>1</sup>pH = potencial hidrogeniônico; M.O = matéria orgânica; P = fósforo; K = potássio; Na = sódio; Ca = cálcio; Mg = magnésio; Al = alumínio; (H+Al) = acidez potencial; SB = soma de bases; T = capacidade de troca catiônica (CTC); V = saturação por bases; m = saturação por alumínio.

### 5.1.3 Semeio

O processo teve início logo após a semeadura, com a emergência da radícula observada predominantemente entre o 3º e o 4º dia, conforme protocolo de produção de mudas para *Acmella oleracea* (Embrapa Amazônia Oriental, 2020).

O uso do substrato Carolina Soil® e o manejo adequado da irrigação e aplicação foliar de defensivos e fertilizantes resultaram em mudas vigorosas e o sucesso na repicagem aos 30, tempo considerado para o desenvolvimento inicial das mudas de jambu (EMBRAPA, 2020), resultou em mudas vigorosas, conforme ilustradas na Figura 12.

**FIGURA 12.** Produção de mudas da variedade amarela e a de pigmento roxo de *A. oleracea* (A e B). Belém, 2026

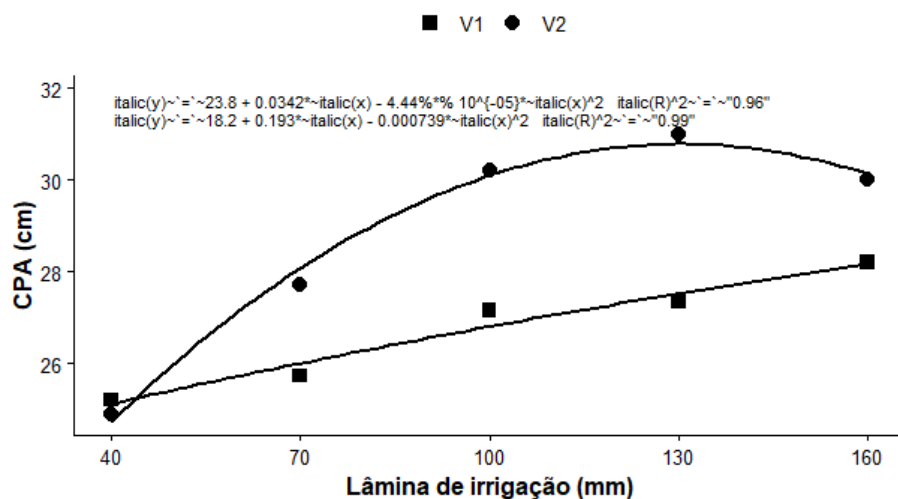


**FONTE.** Autores

#### **5.1.4 Crescimento da parte aérea (CPA)**

Para o crescimento da parte aérea (CPA), observou-se resposta diferenciada das variedades em função das lâminas de irrigação (Figura 13). A variedade roxa (V2) obteve comportamento tipicamente quadrático, caracterizado por incremento do crescimento até níveis intermediários de disponibilidade hídrica (entre 100% e 130%), seguido de redução sob a maior lâmina aplicada (160%). Este padrão implica a existência de um ponto ótimo de suprimento hídrico para o desenvolvimento vegetativo, a partir do qual o excesso de água passa a exercer efeito limitante.

**FIGURA 13.** Comprimento da parte aérea de duas variedades de jambu (*Acmella oleracea* (L.) R.K. Jansen), amarela (V1) e roxa (V2), cultivadas em viveiro de mudas por 90 dias, em função de cinco gradientes hídricos (40, 70, 100, 130 e 160% da capacidade de campo). Belém, 2026.



FONTE. Autores

Em contraste, a variedade amarela (V1) exibiu tendência de crescimento gradual e aproximadamente linear ao longo do gradiente hídrico avaliado, sem evidência clara de declínio do CPA nas maiores lâminas. Assim, pressupõe-se que houve menor sensibilidade ao excesso hídrico dentro do intervalo experimental, porém menor capacidade de maximizar o crescimento vegetativo sob condições intermediárias (100%) de disponibilidade de água.

Padrão semelhante ao observado em V2 foi descrito por Gaia et al. (2020), que relataram aumento do CPA para *A. oleracea* até a lâmina correspondente a 100% da capacidade de campo, seguido de decréscimo em lâminas superiores. De acordo com esses autores, a redução do crescimento da parte aérea sob excesso hídrico está relacionada a alterações fisiológicas, como diminuição da aeração do solo, redução da disponibilidade de oxigênio para o sistema radicular e comprometimento da absorção de água e nutrientes, refletindo negativamente na expansão celular e no alongamento dos entrenós.

Contudo, apesar de ambas as variedades responderem positivamente ao aumento da disponibilidade hídrica até níveis intermediários, a variedade roxa (V2) obteve maior vigor vegetativo e maior amplitude de resposta ao gradiente hídrico, atingindo valores superiores de CPA quando comparada à variedade amarela (V1). Consequentemente, houve maior capacidade de ajuste morfofisiológico de V2 frente às variações ambientais impostas.

Pressupõe-se que o excesso hídrico impôs restrições fisiológicas suficientes para limitar o alongamento celular de V2 a partir de lâminas superiores (130%), possivelmente em

função da redução do potencial hídrico e da turgidez dos tecidos. Em V1, por sua vez, o crescimento manteve-se relativamente estável, sugerindo uma estratégia conservativa, com menor plasticidade fenotípica de resposta ao ambiente.

Até o ponto ótimo de suprimento hídrico, níveis moderados de estresse hídrico podem atuar como estímulo fisiológico, promovendo ajustes morfoanatômicos compensatórios, como o alongamento celular e o incremento da relação caule/folha. Estes mecanismos de resposta ao estresse hídrico podem ser entendidos se recorrer ao conceito de plasticidade fenotípica, que se define como a habilidade do indivíduo em responder com mudanças em seu fenótipo a diferentes condições ambientais (TAIZ; ZEIGER, 2013). As mudanças produzidas podem facilitar a exploração de novos nichos, resultando no aumento da tolerância ambiental (VIA, 1993; VIA et al., 1995).

Assim, no que se refere aos componentes morfológicos associados à arquitetura da parte aérea, o número de nós exibiu baixa variação entre os tratamentos avaliados, com valores médios variando de 5,9 (T1) a 6,4 (T5) em V1 e de 6,4 (T1) a 6,7 (T5) em V2. Essa estabilidade implica que a formação de nós, enquanto componente estrutural fundamental da arquitetura do caule, foi pouco influenciada pela restrição hídrica aplicada. Esse comportamento pode ser atribuído ao fato de que processos relacionados à diferenciação, manutenção e organização dos nós são predominantemente regulados por fatores endógenos e pela atividade meristemática, apresentando menor sensibilidade a variações moderadas no potencial hídrico do substrato (REINHARDT et al., 2003; MCSTEEN, 2009).

A análise do diâmetro de haste (DH) revelou valores superiores em V1, enquanto V2 apresentou caules mais delgados. Estes resultados contrastam com as pesquisas de Gaia et. al, 2020.

Do ponto de vista morfofisiológico, V1 preservou a robustez estrutural da haste e a V2 exibiu alongamento da parte aérea, possivelmente como mecanismo para otimizar a interceptação luminosa e a fotossíntese em condições de limitação hídrica. Tal estratégia está associada à redistribuição de assimilados e à priorização do crescimento em altura em detrimento do espessamento, caracterizando uma resposta adaptativa de ajuste morfofisiológico sob estresse hídrico moderado (TAIZ; ZEIGER, 2013; LARCHER, 2006).

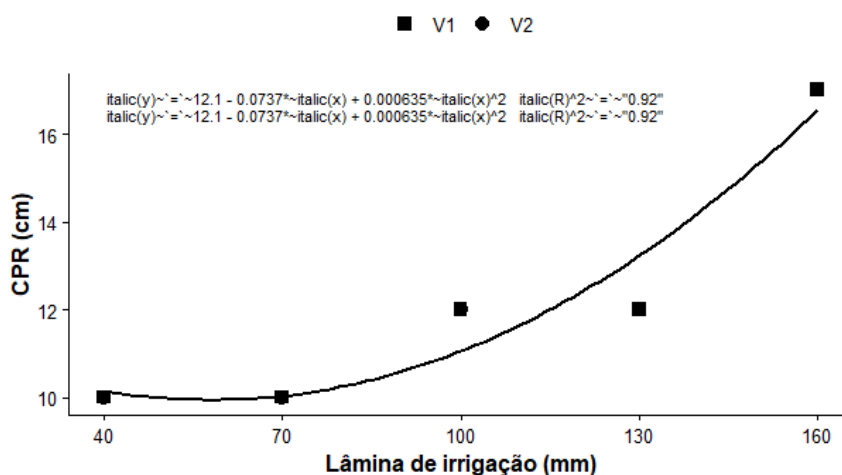
Dessa forma, a tolerância de V2 em comparação à V1 pode ser atribuída à sua habilidade de manter o crescimento da parte aérea sob condições moderadas de estresse hídrico, possivelmente devido à maior plasticidade fenotípica, ajustes fisiológicos e regulação mais eficiente do balanço hídrico interno (SCHMIDT et al., 2015).

Tais mecanismos viabilizam a continuidade do crescimento vegetativo até um limiar de tolerância, a partir do qual o estresse hídrico mais intenso resulta em estabilização ou declínio do comprimento da parte aérea (JOHNSON; LEE, 2018; MARTINEZ et al., 2020).

### 5.1.5 Comprimento radicular (CPR)

Como resultado, evidenciou-se resposta positiva ao gradiente hídrico imposto, caracterizada por incremento progressivo ao longo das lâminas de irrigação, com ajuste significativo a um modelo quadrático crescente (Figura 14), implicando ausência de efeito varietal sobre ambas as variedades, o que implica que o estresse hídrico atuou de forma consistente sobre as plantas, promovendo resposta adaptativa comum. Tal resposta envolve o redirecionamento de fotoassimilados para o sistema radicular, configurando um ajuste morfo anatômico compensatório que contribui para a manutenção do balanço hídrico e para o aumento da eficiência de absorção de água (NOGUEIRA et al., 2018).

**FIGURA 14.** Comprimento radicular de duas variedades de jambu (*Acmella oleracea* (L.) R.K. Jansen), amarela (V1) e roxa (V2), cultivadas em viveiro de mudas por 90 dias, em função de cinco gradientes hídricos (40, 70, 100, 130 e 160% da capacidade de campo). Belém, 2026.



FONTE. Autores

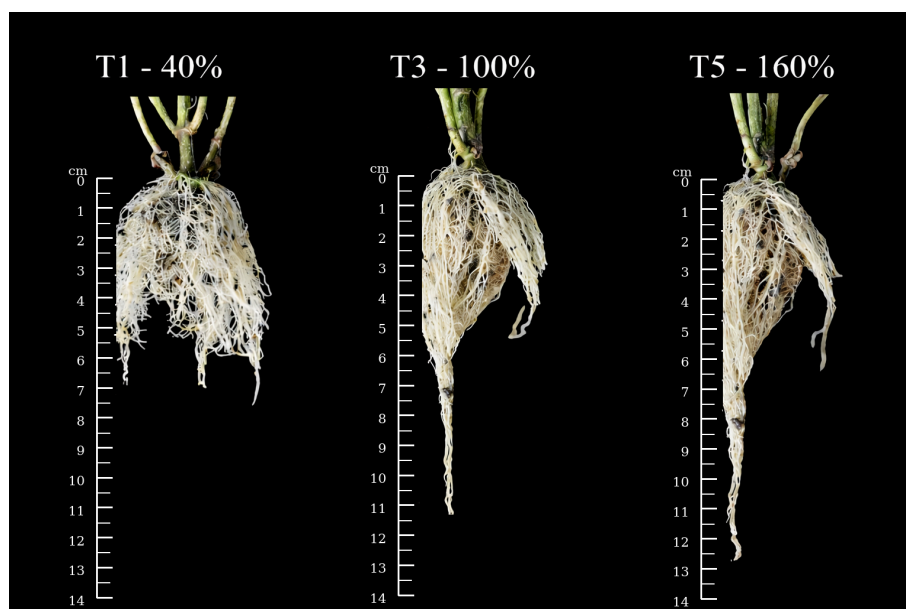
Assim, por consequência, o aumento da disponibilidade hídrica ocasiona o desenvolvimento do sistema radicular, refletindo em uma estratégia adaptativa de exploração do substrato em condições de maior suprimento de água.

O aumento do CPR sob condições de estresse hídrico constitui um dos principais mecanismos morfofisiológicos de adaptação das plantas, permitindo a ampliação da área de exploração do solo e o acesso a camadas mais profundas (KOU et al., 2022; BENTO, 2022).

Conforme ilustrado na Figura 15, em situações de estresse hídrico, especialmente sob excesso, é comum que as plantas priorizem o desenvolvimento do sistema radicular como estratégia adaptativa para ampliar a área de exploração e maximizar a captação de água, mecanismo amplamente descrito na literatura de ecofisiologia vegetal (KOU et al., 2022).

O estudo corrobora a ideia de adaptação fisiológica, uma vez que os valores médios variaram de aproximadamente 10 cm nos tratamentos iniciais (T1–T2) para cerca de 17 cm no tratamento em excesso (T5), não sendo observadas diferenças expressivas entre as variedades de *Acmella oleracea* avaliadas.

**FIGURA 15.** Morfologia da raiz de plantas de jambu (*Acmella oleracea* (L.) R.K. Jansen), cultivadas em viveiro de mudas por 90 dias, em função de cinco gradientes hídricos (40, 70, 100, 130 e 160% da capacidade de campo). Belém, 2026.



**FONTE.** Autores

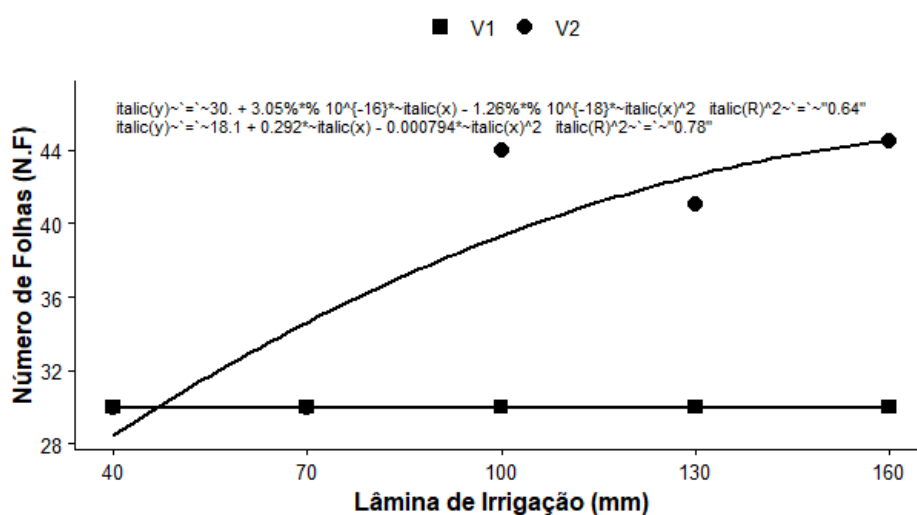
Sob condições de estresse hídrico moderado (130%), ocorre a síntese e o acúmulo de reguladores de crescimento, como o ácido abscísico (ABA) e as auxinas, os quais estimulam o alongamento das raízes e favorecem a exploração de zonas mais úmidas do solo, retardando os efeitos deletérios do déficit hídrico (TAIZ; ZEIGER, 2013). Esse mecanismo explica o comportamento observado em ambas as variedades, que, embora não tenham diferenças significativas entre si, exibiram ajuste morfológico típico de espécies tolerantes ao estresse hídrico moderado, com incremento do comprimento radicular como estratégia adaptativa de sobrevivência (BHATTACHARYA, 2015).

Enquanto a expansão celular da parte aérea depende diretamente da manutenção da pressão de turgor, as raízes tendem a manter seu crescimento até que a demanda por fotoassimilados seja limitada pelo suprimento proveniente da parte aérea, conforme descrito por TAIZ et al. (2017).

### 5.1.6 Número de folhas (N.F)

A relação entre as lâminas de irrigação e o número de folhas nas diferentes variedades de *Acmella oleracea* está ilustrada na Figura 16, evidenciando o padrão de resposta morfológica das plantas frente às variações na disponibilidade hídrica.

**FIGURA 16.** Comportamento do número de folhas de jambu (*Acmella oleracea* (L.) R.K. Jansen), cultivadas em viveiro de mudas por 90 dias, em função de cinco gradientes hídricos (40, 70, 100, 130 e 160% da capacidade de campo). Belém, 2026.



FONTE. Autores

Em V1, os valores mantiveram-se constantes, com média aproximada de 30 folhas, evidenciando ausência de resposta morfológica significativa. Contudo, V2 exibiu incremento progressivo no N.F a partir das lâminas intermediárias, atingindo valores mais elevados nos tratamentos com maior suprimento hídrico.

O aumento na emissão foliar implica maior plasticidade fenotípica de V2, refletindo sua capacidade de ajustar a arquitetura da parte aérea em resposta às condições ambientais. Entretanto, o incremento no N.F não resultou em aumento proporcional do comprimento da parte aérea, refletindo uma estratégia de defesa onde o crescimento ocorreu por meio da formação de folhas menores ou maior ramificação, em consonância com a redução do CPA

observada em lâminas mais elevadas. A ausência de variação observada em V1, evidenciado na figura 16, por sua vez implica uma estratégia morfológica conservativa, caracterizada pela manutenção da área foliar como mecanismo de redução da transpiração e preservação do balanço hídrico.

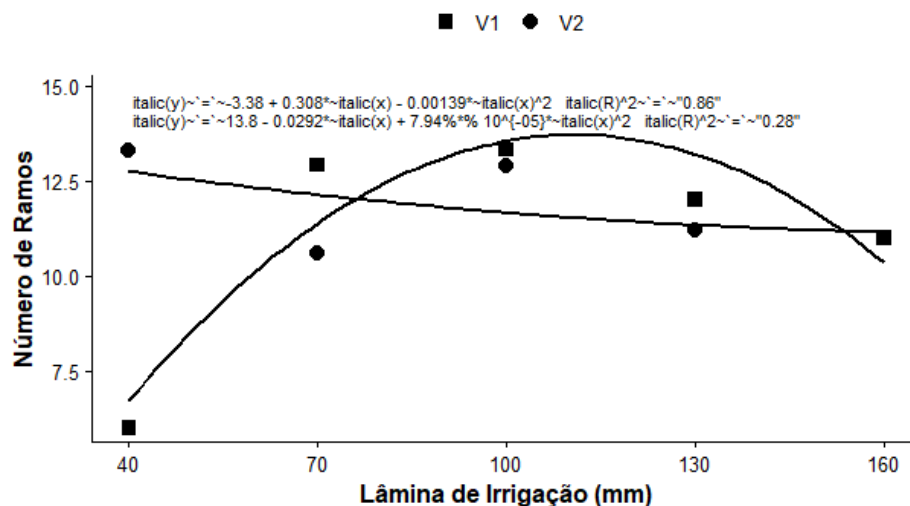
Variedades com menor plasticidade tendem a limitar a expansão vegetativa sob variações ambientais, priorizando a estabilidade fisiológica em detrimento do crescimento morfológico (BLUM, 2017; LARCHER, 2006). Assim, embora ambas as variedades pertençam à mesma espécie (*Acmella oleracea* L.), as diferenças observadas refletem distintos graus de plasticidade fenotípica intraespecífica, ou mesmo, variabilidade genética, resultando em estratégias adaptativas contrastantes frente às condições hídricas impostas (SULTAN, 2000; NICOTRA et al., 2010).

De acordo com TAIZ e ZEIGER (2013), a emissão de novas folhas está diretamente associada à atividade do meristema apical, a qual é favorecida por condições adequadas de suprimento hídrico e pelo aumento do transporte de citocininas da raiz para a parte aérea. Em consonância, o incremento no número de folhas observado em V2 sob maiores lâminas de irrigação pode ser explicado pela manutenção da atividade meristemática e pela regulação hormonal induzida pelo maior fluxo de água.

#### **5.1.7 Número de ramos (N.R)**

Em relação ao N.R, em V1, observou-se aumento expressivo do número de ramos nos tratamentos iniciais e intermediários, com valores médios variando de 6 ramos em T1 (40%) para 13,3 ramos em T3 (100%), seguido de leve redução nos tratamentos subsequentes. O padrão de resposta morfológica das plantas está ilustrado na Figura 17.

**FIGURA 17.** Comportamento do número de ramos de jambu (*Acmella oleracea* (L.) R.K. Jansen), cultivadas em viveiro de mudas por 90 dias, em função de cinco gradientes hídricos (40, 70, 100, 130 e 160% da capacidade de campo). Belém, 2026.



FONTE. Autores

Esse comportamento implica que condições intermediárias de suprimento hídrico favoreceram a emissão de ramos laterais, caracterizando uma resposta morfológica adaptativa associada à maximização da área fotossintética e ao melhor aproveitamento dos recursos disponíveis.

O estímulo à ramificação lateral em condições próximas ao excesso hídrico pode ser explicado por alterações no balanço hormonal, especialmente pela redução da dominância apical e pelo aumento relativo da ação de citocininas nas gemas laterais.

Segundo TAIZ e ZEIGER (2013), a disponibilidade adequada de água favorece o transporte de citocininas sintetizadas nas raízes para a parte aérea, promovendo a ativação de gemas axilares e o incremento da ramificação. Esse mecanismo é amplamente descrito como um importante regulador da arquitetura vegetal, permitindo maior plasticidade estrutural sob condições ambientais favoráveis. Contudo, em V2 o componente morfológico manteve-se constante ao longo dos tratamentos, evidenciando menor amplitude de resposta e possível ajuste fisiológico precoce à restrição hídrica.

Em paralelo ao comportamento estável da parte aérea, o crescimento radicular pode refletir uma estratégia fisiológica precoce à restrição hídrica, com aumento da exploração de camadas mais profundas do solo e maior eficiência no uso da água (LARCHER, 2006; FRANCHINI, 2008; KARLOVA et al., 2021; TENG et al., 2023). Por consequência, obteve-se maior investimento em raízes finas e exploração de camadas superficiais do solo,

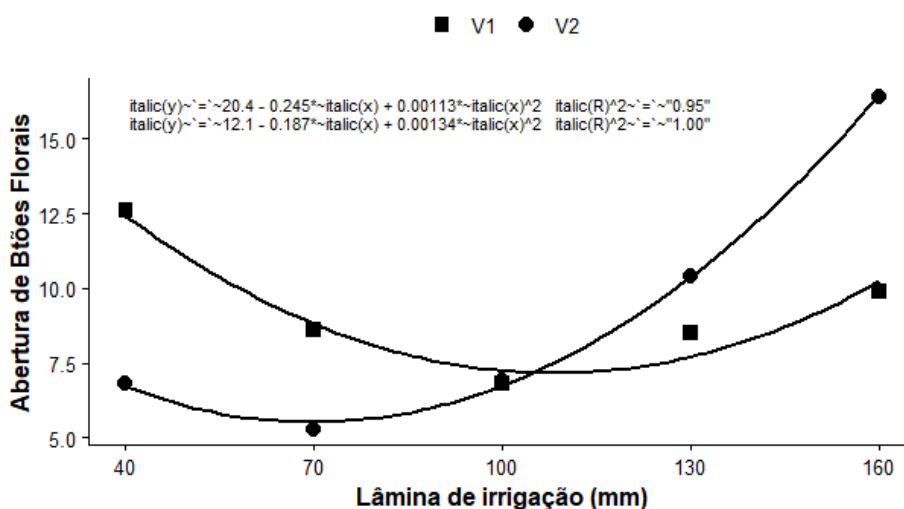
estratégia típica de espécies com sistema radicular pouco profundo como o jambu (RABELO, 2021; SOUSA, 2019; SOUSA et al., 2018).

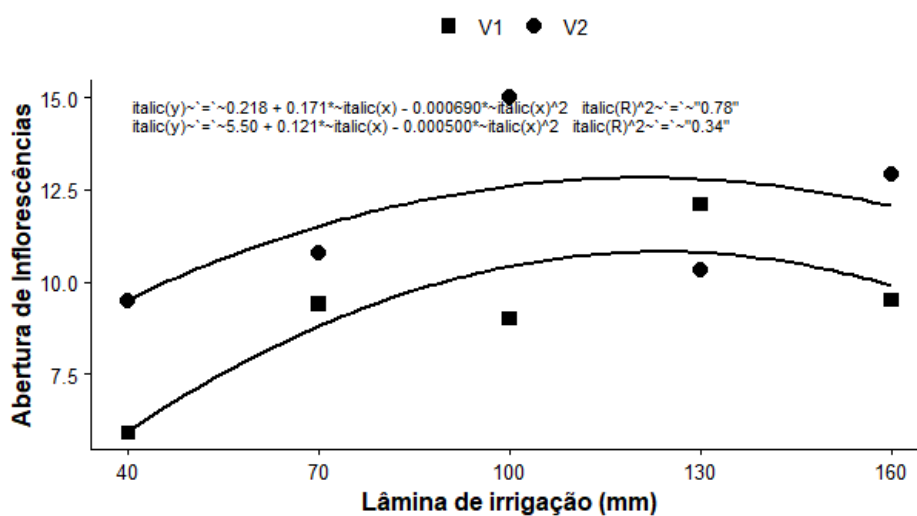
De acordo com ZHANG (2022), estudos com espécies tolerantes à seca mostram que variedades estáveis estruturalmente mantêm crescimento constante sob restrição hídrica, associado à melhor regulação hormonal (por exemplo, ABA e auxinas) e maior eficiência no uso da água, em vez de responder com grandes oscilações no número de ramos. O estudo corrobora com a ideia de ajuste morfológico.

### 5.1.8 Abertura de botões florais e inflorescências

Observou-se que a iniciação floral, representada pela abertura de botões, foi mais sensível às variações hídricas do que a formação efetiva de inflorescências, indicando dissociação entre o início do processo reprodutivo e sua consolidação estrutural. O padrão de resposta morfológica das plantas foi ilustrado na Figura 18.

**FIGURA 18.** Comportamento da abertura de botões florais (A) e de inflorescências (B) de jambu (*Acmella oleracea* (L.) R.K. Jansen), cultivadas em viveiro de mudas por 90 dias, em função de cinco gradientes hídricos (40, 70, 100, 130 e 160% da capacidade de campo). Belém, 2026.





FONTE. Autores

Ambas as variedades obtiveram redução na abertura de botões florais com o aumento da disponibilidade hídrica até a lâmina controle (100%), seguida de discreto incremento progressivo sob condições de excesso hídrico, evidenciando uma faixa relativamente restrita de conforto hídrico para a iniciação floral, sendo negativamente afetadas tanto pelo déficit quanto pelo excesso de água. Contudo, o aumento na abertura de botões florais não se refletiu em incremento proporcional no número de inflorescências formadas, o que implica limitação na conversão dos botões em estruturas reprodutivas plenamente desenvolvidas, o que é mais importante para a perpetuação da espécie.

Tal dissociação entre iniciação floral e sucesso reprodutivo evidencia que, embora o estímulo hídrico excessivo possa induzir respostas iniciais de diferenciação floral, a manutenção e o desenvolvimento das inflorescências são comprometidos por restrições fisiológicas. Esse comportamento pode estar associado a alterações no balanço hormonal sob excesso de água, particularmente à redução da atividade de citocininas e giberelinas (reguladores diretamente envolvidos na indução, expansão e sustentação das estruturas florais), além do possível aumento relativo de sinais inibitórios, como o ácido abscísico, que priorizam mecanismos de sobrevivência em detrimento do investimento reprodutivo (TAIZ; ZEIGER, 2013; BHATTACHARYA, 2015).

Resultados recentes com jambu cultivado sob diferentes tensões de água no solo indicam que a produção e o crescimento são maximizados em condições hídricas intermediárias, com redução em déficit e excesso, corroborando a hipótese de faixa restrita de conforto hídrico para o desenvolvimento reprodutivo (SILVA et al., 2020; AVIZ et al., 2022).

Esse fenômeno pode ser explicado pelo aumento da concentração de ácido abscísico (ABA) sob condições de estresse hídrico, o qual, embora estimule a transição para o estágio reprodutivo, inibe a expansão e a manutenção de estruturas florais de maior custo energético, o que corrobora o descompasso entre elevado número de botões florais e menor formação de inflorescências observado em jambu sob condições extremas de suprimento hídrico (TAIZ; ZEIGER, 2013; LARCHER, 2006; BITTENCOURT, 2020; SILVA et al., 2020).

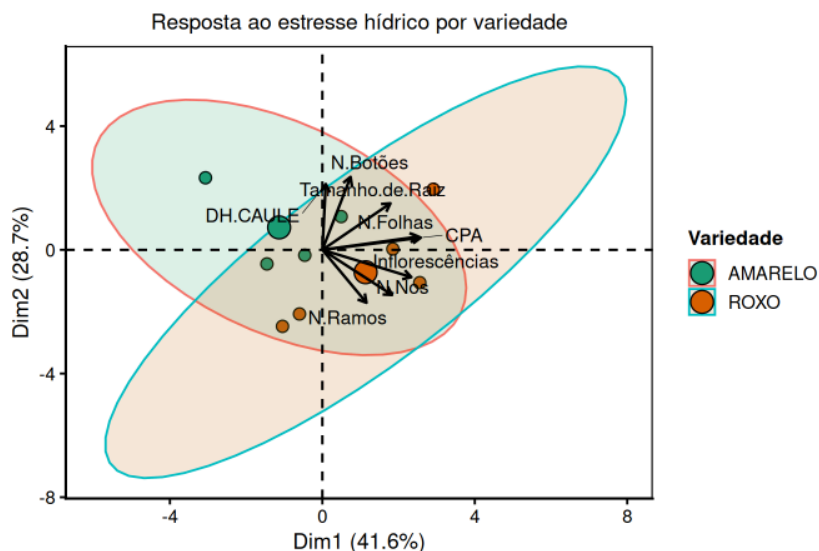
A análise da abertura de inflorescências reforça essa interpretação, uma vez que ambas as variedades obtiveram maior produção sob condições intermediárias de suprimento hídrico, com redução nos extremos de déficit e excesso. Embora o estresse hídrico possa atuar como estímulo inicial à reprodução, a manutenção e o desenvolvimento completo das inflorescências dependem de condições hídricas equilibradas e de adequado suprimento de fotoassimilados.

Diante disso, o descompasso entre o elevado número de botões florais e a menor formação de inflorescências sob estresse resultou em perda de produtividade reprodutiva, refletindo a incapacidade da planta de sustentar energeticamente o processo reprodutivo completo (NOGUEIRA et al., 2018).

### **5.1.9 Análise de componentes principais (ACP)**

A análise de componentes principais (Figura 19) permite avaliar o padrão de organização morfológica das variedades de jambu sob diferentes condições hídricas. Os dois primeiros componentes principais explicaram conjuntamente 70,3% da variabilidade total dos dados, sendo 41,6% atribuídos ao primeiro componente (CP1) e 28,7% ao segundo (CP2), indicando adequada representatividade gráfica para a interpretação das relações entre as variáveis e as variedades avaliadas.

**FIGURA 19.** Análise de Componentes Principais (ACP) das variáveis morfológicas de jambu (*Acmella oleracea* (L.) R.K. Jansen) em função de cinco gradientes hídricos (40, 70, 100, 130 e 160% da capacidade de campo). Belém, 2026.



**FONTE:** Autores

No biplot, os vetores indicam a contribuição e a correlação entre as variáveis morfológicas. Observou-se que o comprimento da parte aérea (CPA), número de folhas (N.F), número de inflorescências e número de nós (N.Nós) exibiram orientação semelhante ao longo do eixo positivo de CP1, evidenciando forte correlação positiva entre essas variáveis. Esse agrupamento implica que V2 obteve maior crescimento longitudinal e, simultaneamente, obteve maior emissão foliar e maior investimento reprodutivo, refletindo um padrão integrado de desenvolvimento vegetativo-reprodutivo.

Em contraste, o diâmetro da haste (DH) orienta-se no sentido oposto ao longo do PC1, caracterizando correlação negativa com as variáveis de crescimento aéreo e produção floral. Por consequência, o primeiro componente principal estabelece um gradiente estrutural que contrapõe robustez caular à intensificação do crescimento vegetativo e reprodutivo, separando estratégias de maior investimento estrutural daquelas orientadas à expansão aérea e produção de estruturas reprodutivas.

A distribuição das variedades ao longo desse eixo evidenciou comportamento diferencial frente ao gradiente hídrico.

A variedade amarela posiciona-se predominantemente no lado negativo de CP1, associando-se ao vetor DH, refletindo maior contribuição dessa variável para sua caracterização morfológica e tendência à maior investimento em estrutura de sustentação. Por outro lado, a variedade roxa localiza-se no lado positivo do CP1, fortemente associada às

variáveis CPA, N.Folhas, Inflorescências e N.Nós, caracterizando maior investimento em crescimento aéreo e potencial reprodutivo.

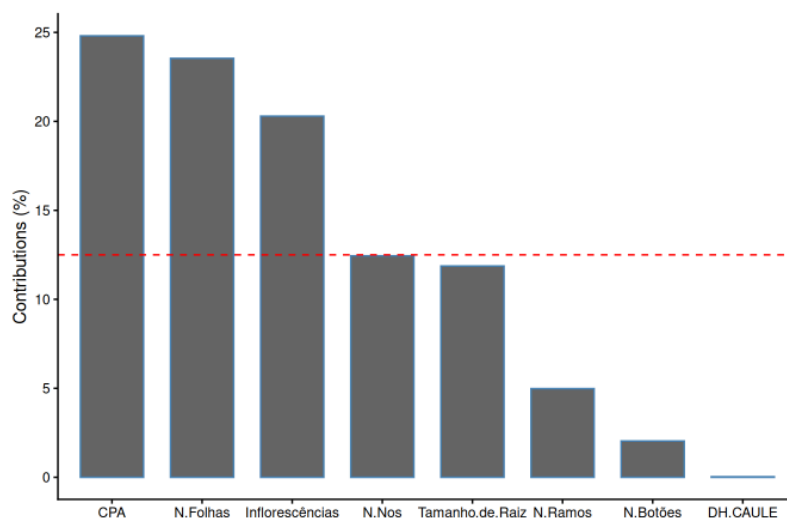
O segundo componente principal (CP2) revelou outro eixo de contraste morfofuncional. As variáveis número de botões (N.Botões) e comprimento de raiz (CPR) exibiram orientação positiva ao longo desse eixo, enquanto número de ramos (N.Ramos) e número de nós situam-se em direção oposta. Esse padrão reflete um possível *trade-off* entre investimento em sistema radicular e emissão inicial de estruturas reprodutivas versus expansão da arquitetura vegetativa lateral. Sob perspectiva fisiológica, maior desenvolvimento radicular representou estratégia adaptativa de exploração hídrica, enquanto maior formação de botões reflete antecipação reprodutiva diante de condições ambientais potencialmente limitantes.

Dessa forma, a ACP evidenciou que as variedades não diferiram apenas em magnitude de crescimento, mas principalmente na forma como alocaram recursos morfológicos. V1 demonstrou padrão mais conservativo, associado à robustez estrutural da haste, refletindo estratégia conservativa, possivelmente associada a limitações na eficiência radicular e no balanço hídrico interno. Em contraste, V2 obteve estratégia mais expansiva, com maior integração entre crescimento vegetativo e potencial reprodutivo, refletindo maior plasticidade morfofuncional frente às variações ambientais, em consonância com observações de Schmidt et al. (2015) sobre mecanismos adaptativos varietais.

Além disso, resultados evidenciaram que *A. oleracea* obteve tolerância relativa às variações na disponibilidade hídrica, com desempenho fisiológico e morfológico mais equilibrado em condições próximas à capacidade de campo do substrato (T3).

A análise da contribuição das variáveis morfológicas para a variabilidade total (Figura 20) revelou que o comprimento da parte aérea (CPA), o N.F e o número de inflorescências foram os atributos que mais influenciaram a discriminação dos tratamentos, refletindo que o crescimento vegetativo e a atividade reprodutiva constituíram os principais eixos de resposta às condições hídricas impostas.

**FIGURA 20.** Contribuição das variáveis morfológicas de jambu (*Acmella oleracea* (L.) R.K. Jansen) em função de cinco gradientes hídricos (40, 70, 100, 130 e 160% da capacidade de campo) para a variabilidade total da CPA. Belém, 2026.



FONTE. Autores

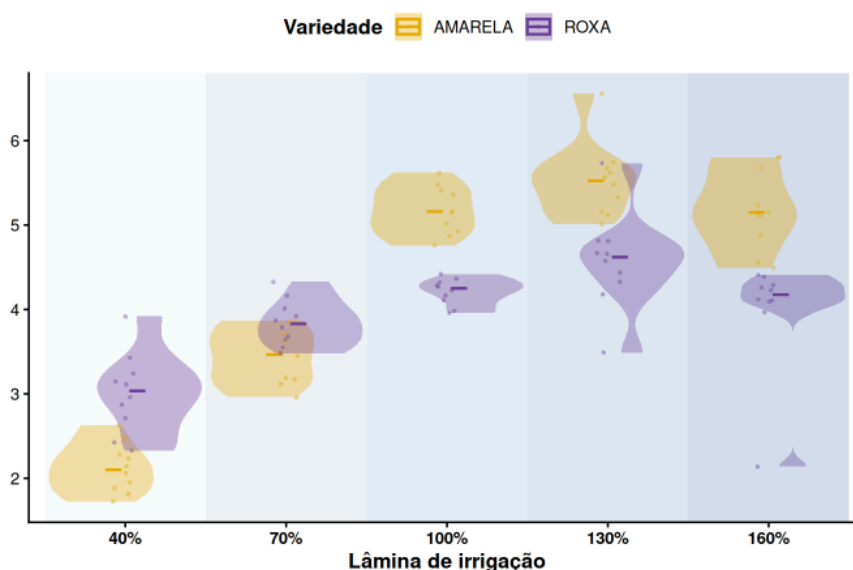
Essa associação confirmou que o vigor da parte aérea está diretamente relacionado à produção de estruturas florais, uma vez que maior área foliar favorece a assimilação fotossintética e a disponibilidade de fotoassimilados para o florescimento (TAIZ; ZEIGER, 2013; LARCHER, 2006). Em contrapartida, variáveis associadas à estrutura de sustentação, como diâmetro do caule e número de ramos, obtiveram menor contribuição relativa, indicando menor sensibilidade às variações na lâmina de irrigação.

## 5.2 Biomassa de jambu sob estresse hídrico

### 5.2.1 Massa seca de haste (MSH:g)

Na Figura 21, há diferenças no comportamento morfológico das variedades frente ao gradiente hídrico, tanto em termos de tendência central quanto de dispersão dos dados. Observou-se que, sob a lâmina de déficit hídrico (40%), ambas as variedades exibiram menores valores de CPA; entretanto, V2 exibiu mediana superior à da amarela, refletindo maior capacidade de manutenção do crescimento mesmo sob déficit severo.

**FIGURA 21.** Análise de biomassa de haste de jambu (*Acmella oleracea* (L.) R.K. Jansen) em função de cinco gradientes hídricos (40, 70, 100, 130 e 160% da capacidade de campo. Belém, 2026.



**FONTE:** Autores

À medida que a disponibilidade hídrica aumentou para 70% e 100%, verificou-se incremento progressivo do CPA em ambas as variedades. Contudo, V1 apresentou maior amplitude interquartil e maior dispersão dos valores, sugerindo maior variabilidade individual na resposta ao aumento da água disponível. Por outro lado, V2 exibiu distribuição mais concentrada em torno da mediana, refletindo crescimento mais homogêneo entre as plantas.

Sob as lâminas de 130% e 160%, observou-se comportamento distinto entre as variedades. Enquanto V1 manteve valores elevados de CPA, ainda que com maior amplitude de variação, V2 apresentou tendência de estabilização ou discreta redução da mediana na lâmina de 160%, indicando possível maior sensibilidade ao excesso hídrico.

A maior dispersão observada nos tratamentos extremos reflete que tanto o déficit quanto o excesso de água impuseram diferentes graus de restrição fisiológica às plantas, evidenciando respostas menos uniformes, em consonância com os resultados discutidos nas análises morfológicas e os estudos realizados por Gaia et al. (2020), que relatam maior variabilidade de resposta entre variedades sob condições de estresse hídrico. Resultados semelhantes foram observados em outras culturas, nas quais o excesso e o déficit hídrico reduzem a uniformidade de crescimento e aumentam a dispersão dos atributos morfofisiológicos, indicando diferentes graus de tolerância entre variedades (TASCA et al., 2024; RIBEIRO et al., 2023).

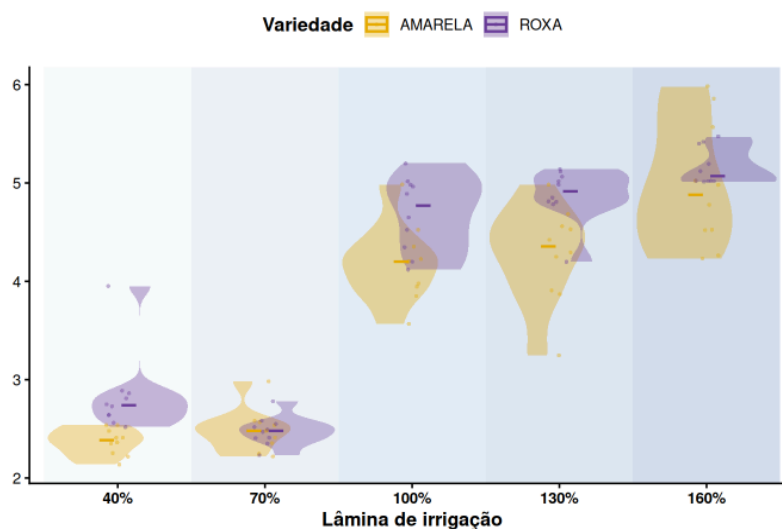
Do ponto de vista fisiológico, o crescimento da parte aérea está diretamente associado ao balanço hídrico celular e à manutenção da taxa fotossintética. Em condições de déficit hídrico, o fechamento estomático reduz a assimilação de CO<sub>2</sub>, limitando a produção de fotoassimilados necessários à expansão celular (TAIZ; ZEIGER, 2013; MARENCO et al., 2014; RIBEIRO et al., 2023). Já sob excesso hídrico, a redução da aeração do substrato compromete a respiração radicular e a absorção de nutrientes, afetando negativamente o crescimento vegetativo (LARCHER, 2006; TASCA et al., 2024). Assim, os extremos hídricos tendem a ampliar a variabilidade entre indivíduos e reduzir a eficiência do crescimento vegetativo (BINOTTO et al., 2016; RIBEIRO et al., 2023).

De forma comparativa, os resultados indicam que V2 exibiu crescimento mais estável e menos heterogêneo ao longo do gradiente hídrico, sugerindo maior consistência de resposta às variações de disponibilidade de água. Em contraste, V1 demonstrou maior plasticidade individual, expressa por maior amplitude nos boxplots, especialmente sob condições intermediárias e elevadas de irrigação. Ambas as variedades adotaram estratégias adaptativas distintas, com V2 priorizando a estabilidade do crescimento e a V1 explorando maior amplitude de resposta ao suprimento hídrico.

### **5.2.2 Massa seca de folhas (MSF:g)**

A biomassa foliar exibiu variação em função tanto da lâmina de irrigação quanto da variedade analisada (Figura 22), evidenciando respostas morfofisiológicas distintas frente ao gradiente hídrico.

**FIGURA 22.** Análise de biomassa de folhas de jambu (*Acmella oleracea* (L.) R.K. Jansen) em função de cinco gradientes hídricos (40, 70, 100, 130 e 160% da capacidade de campo. Belém, 2026.



FONTE: Autores

Sob déficit severo (40%), a variedade roxa exibiu valores medianos superiores aos da variedade amarela, refletindo maior capacidade de manutenção da área foliar em condições restritivas. Esse comportamento indica maior eficiência na conservação do potencial hídrico e na manutenção da turgescência celular, fatores essenciais para a expansão foliar (TAIZ; ZEIGER, 2013).

À medida que a disponibilidade hídrica aumentou (70% a 130%), ambas as variedades demonstraram incremento na biomassa foliar; entretanto, V2 manteve distribuição mais concentrada dos dados, com menor amplitude interquartílica, indicando crescimento mais uniforme. Em contraste, V1 exibiu maior amplitude nos boxplots, especialmente nas lâminas de 130% e 160%, refletindo maior heterogeneidade na resposta ao excesso hídrico. Essa maior amplitude pode refletir plasticidade fenotípica mais acentuada, porém associada a menor estabilidade morfofisiológica sob condições de elevada disponibilidade de água.

Sob a maior lâmina (160%), observou-se que V1 apresentou valores extremos superiores aos de V2, evidenciando maior responsividade ao aporte hídrico elevado. Contudo, o aumento da amplitude nessa condição indica que tal resposta não foi homogênea entre as plantas, podendo estar associada a diferenças individuais na tolerância ao encharcamento. Conforme discutido por Colmer e Voesenek (2009), o excesso de água pode comprometer a aeração do solo, reduzir a atividade radicular e desencadear estresse oxidativo, afetando a expansão e manutenção foliar.

Do ponto de vista fisiológico, tanto o déficit quanto o excesso hídrico interferem na dinâmica estomática, na assimilação de carbono e na alocação de fotoassimilados, influenciando diretamente a formação e o crescimento das folhas (LARCHER, 2006). Assim, os resultados indicam que V2 exibiu maior consistência produtiva ao longo do gradiente hídrico, enquanto a variedade amarela demonstrou maior plasticidade sob condições de elevada disponibilidade de água, porém com maior variabilidade intra-varietal.

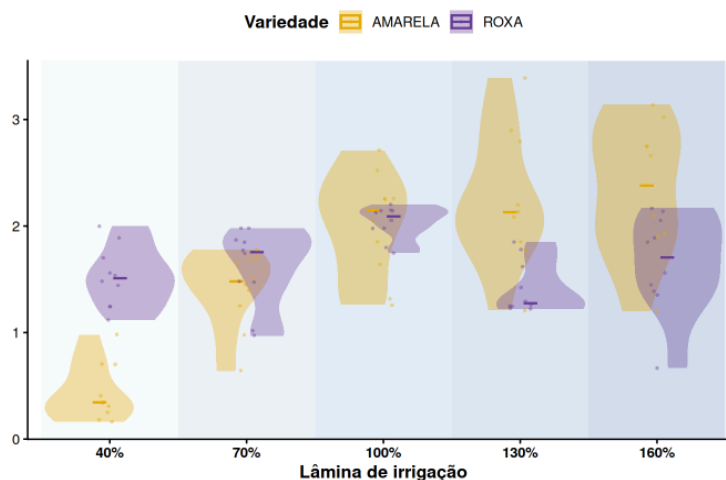
Condições hídricas intermediárias promoveram equilíbrio entre disponibilidade de água e atividade metabólica, favorecendo a manutenção da área foliar funcional, essencial para interceptação luminosa e maximização da assimilação de carbono, justificando a maior biomassa foliar observada serem sob lâminas intermediárias.

De acordo com Flecha (2004), o efeito do excesso de água na cultura pode ser identificado pela redução da altura da planta, do diâmetro e do peso da parte aérea, além da redução do diâmetro do caule. Lima (2019) e Rezende et al. (2017) demonstraram que, em uma pesquisa com alface (*Lactuca sativa*), o maior índice de biomassa foliar sob estresse hídrico é encontrado em lâminas intermediárias, seguida de redução sob excesso hídrico.

### 5.2.3 Massa seca de inflorescências (MSI:g)

A biomassa de inflorescências obteve variação em função das lâminas de irrigação e das variedades avaliadas, com tendência de maiores valores sob condições intermediárias de disponibilidade hídrica e maior dispersão dos dados nos extremos de déficit (40%) e excesso (160%), evidenciado na Figura 23.

**FIGURA 23.** Análise de biomassa de inflorescências de jambu (*Acmella oleracea* (L.) R.K. Jansen) em função de cinco gradientes hídricos (40, 70, 100, 130 e 160% da capacidade de campo). Belém, 2026.



FONTE: Autores

Esse comportamento evidenciou que o acúmulo de biomassa reprodutiva em jambu depende de um balanço hídrico adequado, uma vez que tanto a restrição quanto o excesso de água podem comprometer o particionamento de fotoassimilados para estruturas florais.

De acordo com SILVA (2025), resultados semelhantes são descritos para a cultura, na qual a produção de massa fresca e seca de órgãos vegetativos e reprodutivos varia conforme as condições de manejo, sendo observadas respostas superiores em níveis intermediários de disponibilidade de recursos e redução quando o manejo se torna limitante ou excessivo. Sob déficit hídrico, a diminuição da turgescência e da atividade fotossintética tende a restringir o suprimento de assimilados para o florescimento, enquanto o excesso de água pode provocar hipóxia radicular e redução da absorção de nutrientes, afetando diretamente o enchimento e o desenvolvimento das inflorescências, assim existe maior desenvolvimento de botões florais que não evoluem para inflorescências, conforme resultados exibidos nas análises morfológicas.

As diferenças observadas entre as variedades (V1 e V2) podem ser atribuídas a particularidades fisiológicas e bioquímicas inerentes ao material genético. A variedade de pigmento roxo exibiu maior capacidade de ajuste morfofisiológico frente ao estresse, possivelmente associado à maior concentração de compostos fenólicos e pigmentos, como antocianinas, que desempenham função antioxidante e contribuem para a proteção dos tecidos contra estresses abióticos, incluindo déficit ou excesso de água. Esses compostos atuam na dissipação de espécies reativas de oxigênio e na manutenção da integridade celular, favorecendo a continuidade do crescimento e da reprodução mesmo sob condições ambientais adversas (TAIZ et al., 2017; LARCHER, 2006).

Tal resposta é agronomicamente relevante, considerando que as inflorescências constituem a principal parte comercial do jambu, empregada tanto na gastronomia regional como matéria-prima para as indústrias farmacêutica e cosmética devido à presença de compostos bioativos como o espilantol. A maior produção de biomassa reprodutiva implica, portanto, potencial incremento de produtividade e valor econômico, uma vez que a espécie possui reconhecida importância nutricional, medicinal e comercial em diferentes cadeias produtivas.

Plantas com maior eficiência fisiológica tendem a manter a assimilação de carbono por períodos mais prolongados, direcionando recursos para a formação e o enchimento das inflorescências, enquanto genótipos mais sensíveis priorizam a manutenção de processos

básicos de sobrevivência em detrimento da reprodução (CHAVES; FLEXAS; PINHEIRO, 2009).

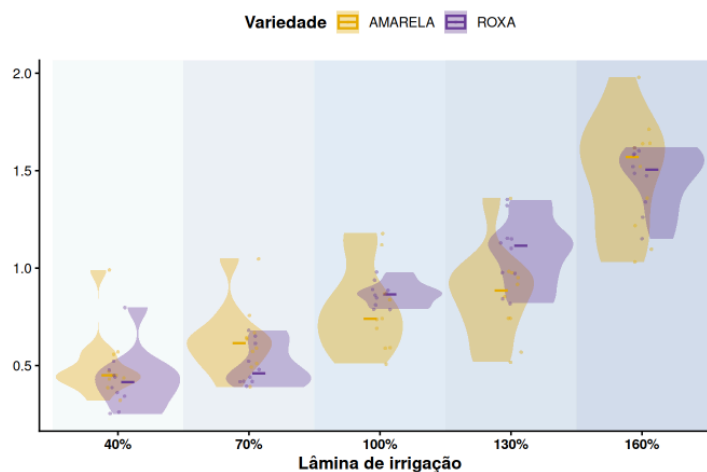
Nesse contexto, V1, ao obter menor resposta produtiva sob condições de estresse, pode estar expressando uma estratégia conservativa, com redução do crescimento reprodutivo para preservar o balanço hídrico e metabólico.

#### 5.2.4 Massa seca de raiz (MSR:g)

A biomassa radicular exibiu incremento progressivo com o aumento das lâminas de irrigação, evidenciando relação direta entre disponibilidade hídrica e desenvolvimento do sistema radicular (Figura 24).

Observou-se que, em ambas as variedades, os menores valores concentram-se sob déficit hídrico severo (40%), com aumento gradual até a maior lâmina aplicada (160%). Entretanto, o comportamento entre as variedades difere quanto à magnitude e à distribuição dos valores.

**FIGURA 24.** Análise de biomassa de raiz de jambu (*Acmella oleracea* (L.) R.K. Jansen) em função de cinco gradientes hídricos (40, 70, 100, 130 e 160% da capacidade de campo. Belém, 2026.



**FONTE:** Autores

V1 exibiu maiores valores absolutos nas lâminas mais elevadas (130% e 160%), refletindo maior incremento radicular sob excesso hídrico. Contudo, essa resposta foi acompanhada por maior amplitude nos boxplots, indicando maior variabilidade entre as repetições. Por outro lado, V2 exibiu crescimento radicular mais moderado, porém com distribuição mais concentrada e menor dispersão dos dados, sugerindo maior estabilidade de resposta ao longo do gradiente hídrico.

Embora ambas tenham tido respostas semelhantes em termos de crescimento, houve diferença de ajuste morfofisiológico no peso de matéria seca. Enquanto a variedade amarela intensificou o crescimento radicular sob maior disponibilidade de água, possivelmente como forma de maximizar absorção em condições favoráveis, a variedade roxa demonstrou padrão mais conservativo e estável, mantendo incremento gradual sem oscilações acentuadas. Tal comportamento pode estar relacionado a diferenças genéticas na regulação do crescimento radicular e na eficiência de uso da água, conforme discutido por Chaves, Flexas e Pinheiro (2009), que destacam que a resposta do sistema radicular ao estresse hídrico depende da capacidade de ajuste metabólico e hormonal da planta.

Do ponto de vista fisiológico, o crescimento radicular está intimamente associado ao balanço entre absorção de água, disponibilidade de oxigênio no solo e fornecimento de fotoassimilados oriundos da parte aérea (TAIZ; ZEIGER, 2013). Em condições de excesso hídrico, embora a maior disponibilidade de água possa favorecer inicialmente o crescimento, a redução da aeração do solo pode limitar a atividade respiratória das raízes. Assim, o aumento observado até 160% sugere que, nas condições experimentais, o excesso não foi suficientemente severo para comprometer a função radicular, mas promoveu diferenças na intensidade da resposta entre as variedades.

Agronomicamente, um sistema radicular mais desenvolvido pode representar maior capacidade de exploração do solo e potencial resiliência a oscilações ambientais. Diante disso, a maior variabilidade observada na variedade amarela evidenciou resposta menos uniforme, enquanto a roxa exibiu comportamento mais consistente, o que pode refletir maior estabilidade produtiva em condições variáveis de manejo hídrico.

### **5.2.5 Efeitos de tratamento, variedade e interação sobre as variáveis de biomassa de jambu sob estresse hídrico**

A análise de variância evidenciou efeito significativo do fator tratamento para todas as variáveis avaliadas ( $p < 0,05$ ), demonstrando que as lâminas de irrigação influenciaram de forma expressiva o crescimento e a produção de biomassa do jambu (Tabela 3).

**TABELA 3.** Análise de variância (ANOVA) para as variáveis morfológicas de jambu (*Acmella oleracea* (L.) R.K. Jansen) em função de cinco gradientes hídricos (40, 70, 100, 130 e 160% da capacidade de campo). Belém, 2026.

VARIÁVEL	FONTE DE VARIAÇÃO	GL	F	P-VALOR
Haste	Lâmina	4	114,66	<0,001
	Variedade	1	18,53	<0,001
	Lâmina X Variedade	4	25,15	<0,001

Folhas	Lâmina	4	221,21	<0,001
	Variedade	1	23,80	<0,001
	Lâmina X Variedade	4	2,41	0,0547
Inflorescências	Lâmina	4	21,74	<0,001
	Variedade	1	0,21	0,6444
	Lâmina X Variedade	4	16,97	<0,001
Raiz	Lâmina	4	86,92	<0,001
	Variedade	1	0,15	0,6978
	Lâmina X Variedade	4	2,65	0,0382

FONTES: Autores

Para as variáveis haste, inflorescências e raiz, a interação Lâmina  $\times$  Variedade foi significativa ( $p < 0,05$ ), indicando que a resposta ao gradiente hídrico depende da variedade. Isso significa que as variedades amarela e roxa não responderam de forma semelhante às variações na disponibilidade de água, exibindo padrões diferenciados de crescimento vegetativo e reprodutivo sob diferentes lâminas de irrigação.

Em relação a variável haste (CPA), a interação significativa ( $p < 0,001$ ) demonstrou que o efeito das lâminas sobre o alongamento da parte aérea variou entre as variedades, corroborando os resultados que evidenciam diferenças na magnitude de crescimento sob condições de maior disponibilidade hídrica.

Para inflorescências, a interação também foi significativa ( $p < 0,001$ ), indicando que o investimento reprodutivo foi condicionado simultaneamente pela lâmina aplicada e pela variedade, reforçando que o desempenho floral não depende apenas da disponibilidade hídrica isoladamente, mas da combinação entre fator ambiental e material genético.

De forma semelhante, para raiz, a interação significativa ( $p = 0,0382$ ) revelou que o desenvolvimento radicular apresentou comportamento diferencial entre as variedades ao longo do gradiente hídrico, evidenciando estratégias distintas de exploração do solo.

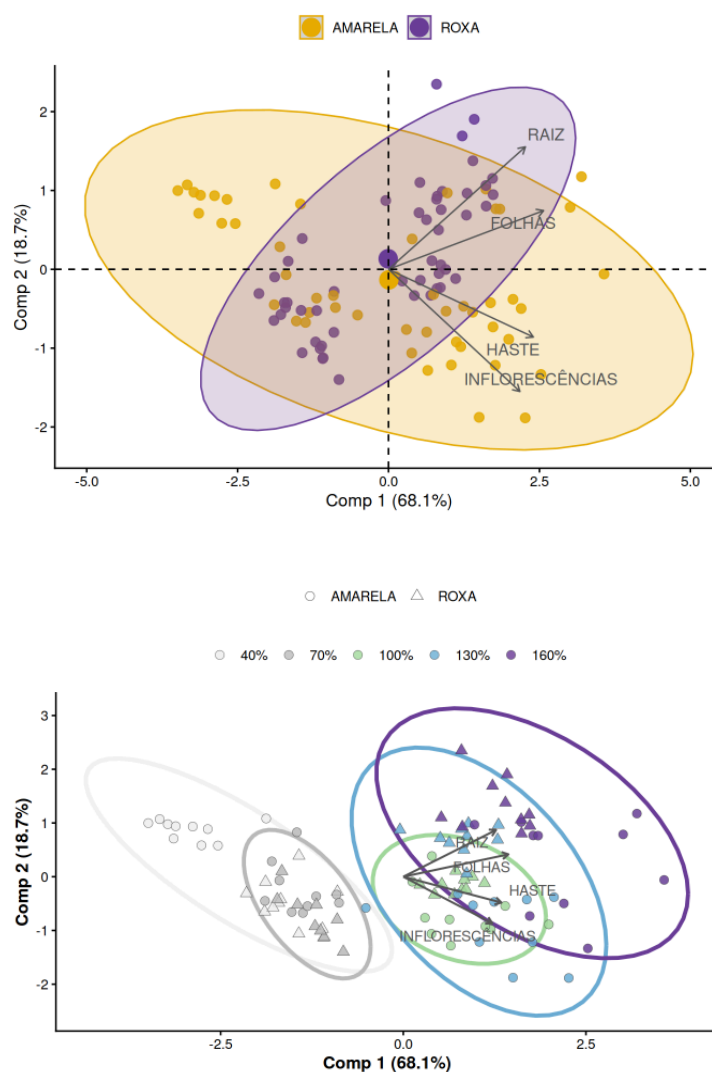
Em contrapartida, para a variável folhas, a interação lâmina  $\times$  variedade não foi significativa ( $p = 0,0547$ ). Embora as lâminas tenham afetado a biomassa foliar e existirem diferenças entre as variedades, o efeito do gradiente hídrico foi semelhante em ambas, ou seja, a diferença entre elas se manteve aproximadamente constante ao longo das lâminas, sem mudança no padrão de resposta.

### 5.2.6 Análise de componentes principais (ACP) para biomassa de jambu sob estresse hídrico

A análise de componentes principais aplicada às variáveis de biomassa (Figura 25) revelou clara estruturação multivariada dos dados, com o primeiro componente (*Comp 1*) explicando 68,1% da variabilidade total e o segundo componente (*Comp 2*) aproximadamente

18%, indicando que o plano bidimensional é representativo para interpretação dos padrões observados.

**FIGURA 25.** Análise de Componentes Principais (ACP) das variáveis de biomassa de jambu (*Acmella oleracea* (L.) R.K. Jansen) em função de cinco gradientes hídricos (40, 70, 100, 130 e 160% da capacidade de campo): (A) ordenação por variedade; (B) ordenação por tratamento. Belém, 2026.



**FONTE:** Autores

No gráfico superior, observou-se separação consistente entre as variedades ao longo do *Comp 1*. A variedade amarela distribuiu-se predominantemente no quadrante associado a valores positivos desse eixo, enquanto a variedade roxa apresentou maior concentração no sentido oposto ou mais próximo ao centro do plano. Essa organização indica que o *Comp 1* expressou um contraste entre maior acúmulo de biomassa da parte aérea, especialmente haste

e inflorescências, e padrões associados a maior contribuição relativa do sistema radicular e da biomassa foliar.

Os vetores do biplot indicaram que as variáveis haste e inflorescências apresentaram maior alinhamento com o eixo positivo de *Comp 1*, sugerindo que esse componente representou predominantemente investimento em biomassa aérea reprodutiva e estrutural. Por outro lado, raiz e folhas apresentaram maior projeção no sentido associado ao *Comp 2*, indicando que esse eixo expressou variação relacionada ao investimento radicular e foliar.

No gráfico, quando os tratamentos são considerados, observou-se que as lâminas mais elevadas (130% e 160%) tendem a se posicionar no quadrante positivo de *Comp 1*, associando-se a maior biomassa de haste e inflorescências. Já os tratamentos com menor disponibilidade hídrica (40% e 70%) concentram-se no sentido oposto, indicando redução geral no acúmulo de biomassa.

A diferenciação varietal torna-se mais evidente sob maior disponibilidade hídrica, sugerindo que, em condições menos limitantes, o componente genético passou a modular de forma mais pronunciada a alocação de biomassa. Enquanto a variedade amarela mostrou maior dispersão no espaço multivariado, indicando maior variabilidade de resposta, a variedade roxa exibiu agrupamento mais coeso, sugerindo padrão de resposta mais estável ao gradiente hídrico.

Sob déficit hídrico severo, a separação entre as variedades foi menos pronunciada, indicando que o estresse atuou como fator limitante dominante, reduzindo a expressão das diferenças genotípicas. Nesse contexto, ambas as variedades convergiram para padrões semelhantes de alocação de biomassa, priorizando manutenção estrutural básica em detrimento de maior investimento reprodutivo.

De forma integrada, o ACP demonstrou que a disponibilidade hídrica modula não apenas o volume total de biomassa produzida, mas também o padrão de alocação entre compartimentos vegetativos e reprodutivos, e que essa resposta é diferencial entre as variedades, sobretudo em condições de maior disponibilidade de água.

### **5.3 Respostas fisiológicas ao estresse hídrico**

Durante a condução do experimento, foram identificados sintomas associados ao estresse hídrico e à infestação por pragas, com ênfase na incidência inicial de ácaros nos tratamentos submetidos a lâmina de água equivalente a 40% da capacidade de campo (T1), seguida de disseminação para parcelas adjacentes, conforme ilustrada na Figura 26-B.

O ataque de ácaros em plantas pode causar descoloração foliar, manchas cloróticas, enrolamento e deformação de folhas novas, (ZERIMAR LABORATÓRIO, 2025; FORTHJARDIM, 2019), além de redução do vigor e queda prematura de folhas (ZERIMAR LABORATÓRIO, 2025; MANEJEBEM, 2013). Em jambu, o ácaro branco (*Polyphagotarsonemus latus*) provoca enrijecimento e encarquilhamento das folhas novas, tornando-as retorcidas e impróprias para consumo, com aspecto queimado nas bordas (PEREIRA et al., 2020).

**FIGURA 26.** Incidência de infestação por ácaros (A, B e C) em plantas de jambu (*Acmella oleracea* (L.) R.K. Jansen) em função de cinco gradientes hídricos (40, 70, 100, 130 e 160% da capacidade de campo). Belém, 2026.



**FONTE:** Autores

Plantas expostas ao estresse hídrico frequentemente exibem alterações fisiológicas, tais como diminuição da turgescência celular, desequilíbrios nutricionais e redução na síntese de compostos defensivos, fatores que podem aumentar a atratividade e facilitar a colonização por artrópodes fitófagos, possivelmente devido à redução do vigor vegetativo e ao comprometimento de mecanismos de defesa fisiológica.

Do ponto de vista agrônomo, essa interação entre estresse abiótico (déficit hídrico) e pressão biótica (infestação por ácaros) é de relevância crítica, pois pode intensificar perdas produtivas e comprometer a qualidade comercial do jambu, particularmente em sistemas de manejo hídrico inadequado.

A relação entre estresse hídrico e aumento da suscetibilidade a pragas, como observado no experimento, é corroborada por estudos fitopatológicos que destacam como o déficit de água altera a fisiologia vegetal, tornando as plantas mais vulneráveis a artrópodes

fitófagos. Por exemplo, Mattson e Haack (1987) argumentam que o estresse abiótico, incluindo a seca, reduz a produção de compostos secundários defensivos (como alcaloides e taninos) e aumenta a concentração de açúcares solúveis, o que atrai herbívoros como ácaros, facilitando sua colonização e reprodução. Esse mecanismo é particularmente relevante para ácaros, que se alimentam de seiva e tecidos foliares, explorando plantas com defesas comprometidas.

Adicionalmente, English-Loeb et al. (1997) demonstraram em experimentos com videiras (*Vitis vinifera*) que o estresse hídrico induz alterações morfológicas e bioquímicas, como redução da espessura da cutícula e diminuição da síntese de compostos fenólicos, o que aumenta a atratividade a ácaros fitófagos (como *Tetranychus* spp.). Esses achados se alinham ao padrão observado no experimento, onde a incidência inicial em T1 (40% da capacidade de campo) sugeriu um limiar de estresse que predispõe as plantas à infestação, com disseminação subsequente devido à proximidade e à mobilidade dos ácaros.

Do ponto de vista fitopatológico, Huberty e Denno (2004) enfatizam que o estresse hídrico pode interagir sinergicamente com pragas, levando a um ciclo vicioso: o déficit de água enfraquece as plantas, reduzindo sua capacidade de recuperação após danos por herbívoros, o que, por sua vez, acelera a expansão populacional dos artrópodes. Em culturas tropicais como o jambu, essa interação é exacerbada em condições de manejo inadequado, potencializando perdas econômicas, conforme evidenciado por estudos em fitopatologia que associam estresse hídrico a epidemias de ácaros em hortaliças (Schaffer et al., 1997).

Esses trabalhos reforçam a necessidade de estratégias integradas de manejo, combinando irrigação otimizada com controle biológico, para mitigar os impactos produtivos decorrentes dessa interação abiótico-biótica.

Em situações de estresse hídrico, também foi observado o efeito de murcha temporária nas plantas de jambu (Figura 27), caracterizada por uma perda reversível de turgescência foliar, que se manifestou predominantemente durante os períodos de maior déficit de água, como nos tratamentos com lâmina reduzida a 40% da capacidade de campo (T1) e em excesso hídrico (160%).

**FIGURA 27.** Efeito de murcha temporária em plantas de jambu (*Acmella oleracea* (L.) R.K. Jansen) em função de cinco gradientes hídricos (40, 70, 100, 130 e 160% da capacidade de campo). Belém, 2026.



**FONTE:** Autores

Fisiologicamente, essa murcha resulta da diminuição da pressão de turgor celular devido à redução do potencial hídrico foliar, levando ao fechamento de estômatos e à inibição da fotossíntese, conforme descrito por Taiz et al. (2017), que explicam como o estresse osmótico induzido pela seca compromete o equilíbrio hídrico interno das plantas, causando flacidez temporária como mecanismo de adaptação para minimizar a perda de água. Esse fenômeno é corroborado por Larcher (2006), que destaca que em plantas tropicais a murcha temporária é uma resposta comum ao déficit hídrico, associada à redução da condutância estomática e ao acúmulo de solutos osmóticos para manter a homeostase celular, embora possa comprometer o crescimento e a produtividade se prolongada.

A murcha temporária interage com a suscetibilidade a pragas, pois plantas murchas exibem alterações bioquímicas, como aumento da concentração de aminoácidos e açúcares solúveis, que atraem artrópodes fitófagos (Kramer e Boyer, 1995). Em estudos com hortaliças tropicais, essa interação foi documentada por Schaffer et al. (1997), que observaram que a murcha induzida por estresse hídrico em culturas como alface e tomate facilitam a colonização por ácaros, devido à redução da síntese de compostos defensivos e ao enfraquecimento estrutural das folhas.

#### **5.4 Avaliação sob estresse térmico**

O tratamento submetido à temperatura de 41 °C apresentou ausência total de germinação. Em razão da inexistência de plântulas, esse tratamento não foi incluído nas análises estatísticas subsequentes, sendo mantido apenas como evidência biológica do limite térmico superior para a germinação da espécie.

#### 5.4.1 Experimento preliminar de germinação *in vitro*

A concentração de 30 gL<sup>-1</sup> mostrou-se mais eficiente, promovendo um desenvolvimento mais vigoroso das plantas em comparação com as demais concentrações testadas, conforme evidenciado na Figura 28. Esse resultado está em concordância com Santos e Martins (2022) e George et al. (2020), que também identificaram 30 gL<sup>-1</sup> como a concentração ideal de sacarose para o cultivo *in vitro* de jambu, destacando que essa condição fornece a fonte de carbono necessária para o metabolismo e crescimento dos explantes, favorecendo a multiplicação celular e o desenvolvimento radicular.

**FIGURA 28.** Plântulas submetidas a diferentes condições de cultivo *in vitro*, variando a concentração de sacarose (0 e 30 g/L) e temperatura (25°C, 33°C e 41°C), para avaliação da germinação. Belém, 2026.



FONTE: Autores

No tratamento realizado em T2 (Figura 28-B), observou-se uma coloração branca nos explantes, diferente do esperado. Essa alteração visual foi atribuída a problemas na lâmpada da BOD durante o experimento, que comprometeram a qualidade da iluminação. A

deficiência luminosa resultou em um estresse nas plantas, levando à perda da pigmentação verde característica, o que justifica a coloração observada nas amostras desse tratamento.

A sacarose atua não apenas como fonte de carbono, mas também como agente osmótico, influenciando a absorção de água e o metabolismo celular (MURASHIGE & SKOOG, 1962). Concentrações inadequadas podem causar estresse osmótico, prejudicando o crescimento e a multiplicação celular.

Na Figura 28, estão apresentados os diferentes tratamentos avaliados quanto à germinação e desenvolvimento inicial das plântulas em meio de cultura com distintas concentrações de sacarose e temperaturas (25°C, 33 e 41°C, respectivamente). Observou-se que no tratamento T2R9 (25°C + 30 gL<sup>-1</sup> de SAC) houve maior crescimento das plântulas em comparação ao T2R8 (25°C, sem SAC), evidenciando a importância do suprimento energético da sacarose para o desenvolvimento vegetal *in vitro*.

Os tratamentos T5R9 e T5R3 (33°C, Figura 28-B) exibiram aspecto esbranquiçado em razão do problema previamente relatado; contudo, é possível verificar que, mesmo nessa temperatura, ocorreu germinação, embora com menor vigor em relação a 25°C. Além disso, os resultados evidenciaram que em 41°C (Figura 28-C) não houve germinação, refletindo que temperaturas mais elevadas comprometem o estabelecimento inicial das plântulas.

A observação de coloração branca nos explantes submetidos a 33°C, atribuída a falhas na iluminação, destaca a sensibilidade das plantas *in vitro* a condições ambientais, especialmente luz e temperatura, que podem induzir estresse e afetar a pigmentação e o desenvolvimento (KUMAR et al., 2021). Além de poder ser atribuída à deficiência luminosa, também pode refletir efeitos do estresse térmico sobre a biossíntese de clorofila e integridade das membranas celulares (WAHID et al., 2007; HASANUZZAMAN et al., 2013). Temperaturas elevadas comprometem a fotossíntese e podem induzir a produção de espécies reativas de oxigênio, afetando o desenvolvimento das plântulas.

A ausência de germinação a 41°C evidenciou que temperaturas elevadas comprometem o estabelecimento inicial das plântulas, refletindo o limite térmico para o cultivo *in vitro* da espécie, em concordância com estudos sobre tolerância térmica em plantas tropicais (RODRIGUES et al., 2019).

Nesse ensaio preliminar, também foi avaliado a influência do tipo de frasco utilizado para o cultivo *in vitro*. O tipo de recipiente influencia significativamente o crescimento, reduzindo o acúmulo de etileno e CO<sub>2</sub>, que são conhecidos por inibir o crescimento *in vitro* (KOZAI et al., 1995). A influência do tipo de recipiente no desenvolvimento das plântulas, com melhor crescimento em frascos devido ao maior espaço e melhor aeração, reforça a

importância das condições físicas do ambiente de cultura para o sucesso da micropropagação (SMITH & JONES, 2018). Tubos de ensaio, por sua limitação espacial, podem restringir o desenvolvimento radicular e foliar, impactando negativamente a qualidade das mudas. Essa informação é relevante para otimizar protocolos de cultivo *in vitro* visando maior eficiência e qualidade do material propagado.

Esses resultados são evidenciados na Figura 29, em que se apresentam os seguintes tratamentos: A (sem SAC + tubo de ensaio), B (30 gL<sup>-1</sup> SAC + tubo de ensaio), C (sem SAC + frasco) e D (30 gL<sup>-1</sup> SAC + frasco).

**FIGURA 29.** Desenvolvimento inicial de plântulas em diferentes recipientes de cultivo *in vitro* (frascos e tubos de ensaio), sob tratamento com e sem adição de sacarose (30 gL<sup>-1</sup> e sem SAC), para avaliação da germinação. Belém, 2026.



**FONTE:** Autores

Ao comparar o crescimento das plântulas entre os tipos de recipientes (Figura 30), observou-se que em frascos exibiram maior alongamento caulinar e melhor expansão foliar em relação às cultivadas em tubos. Em contraste, nos tubos de ensaio, o crescimento foi restrito, com plântulas menores e folhas menos desenvolvidas, indicando que o tipo de recipiente exerce influência direta sobre a taxa de desenvolvimento e qualidade morfológica das mudas.

**FIGURA 30.** Comparação do desenvolvimento de plântulas de *Acmea oleracea* germinadas *in vitro* por 45 dias em meio MS com 30 gL<sup>-1</sup> de sacarose em diferentes recipientes (tubetes e frascos). Belém, 2026.



FONTE: Autores

Este ensaio teve caráter preliminar, servindo como teste metodológico, e permitiu identificar as condições mais adequadas para o cultivo *in vitro* de jambu. Assim, a metodologia final do estudo foi definida a partir dessas observações, assegurando maior confiabilidade e padronização nos experimentos subsequentes.

#### 5.4.2 Germinação *in vitro* sob condições de estresse térmico

A germinação do jambu exibiu comportamento semelhante entre as temperaturas avaliadas (25 e 33 °C), bem como entre as variedades estudadas, conforme evidenciado pela análise gráfica e pela análise de variância.

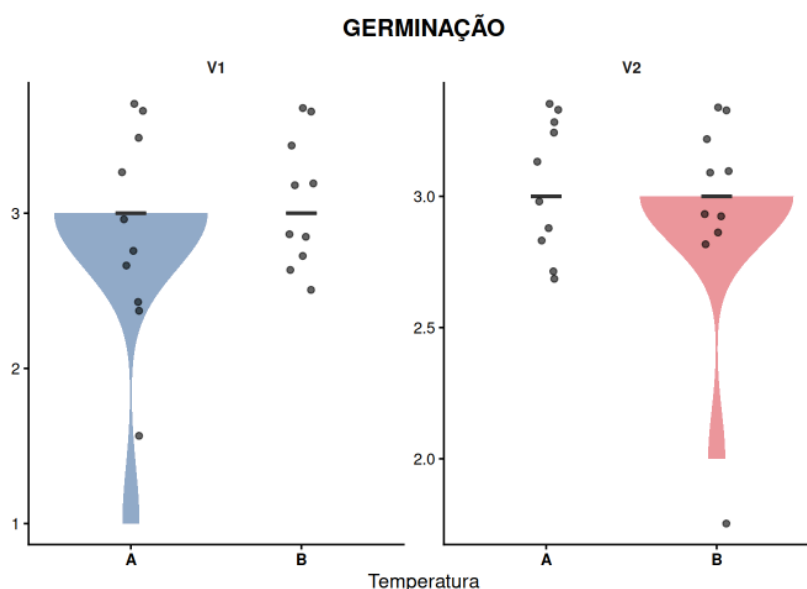
O teste F indicou ausência de efeito significativo da temperatura ( $p = 0,6574$ ), da variedade ( $p = 0,6574$ ) e da interação temperatura  $\times$  variedade ( $p = 0,1881$ ), demonstrando

que a resposta germinativa foi estatisticamente equivalente entre os dois primeiros tratamentos, com exceção de T3 (41°C) que não houve resultados de germinação. Esses resultados refletem que, dentro da faixa térmica avaliada entre T1 e T2, a germinação apresentou elevada estabilidade fisiológica, não sendo sensível a variações moderadas de temperatura nem a diferenças genotípicas entre as variedades analisadas.

Almeida et al. (2020) demonstraram que sementes de jambu germinam rapidamente *in vitro* em torno de 25 °C ou 30°C, com alta porcentagem de germinação em meio de cultura MS, reforçando que essa faixa térmica favorece a ativação metabólica e o início da germinação em condições controladas, promovendo altas porcentagens de germinação e vigor de plântulas, com resposta relativamente estável, o que corrobora com a ideia de uma faixa térmica ótima estreita e estável para essa espécie, evidenciada no estudo.

A análise gráfica por meio de diagramas de violino (Figura 31) reforça essa interpretação, ao evidenciar distribuições semelhantes, medianas próximas e amplitudes comparáveis da germinação em ambas as temperaturas, indicando homogeneidade no comportamento das sementes.

**FIGURA 31.** Germinação *in vitro* de jambu (*Acmella oleracea* (L.) R.K. Jansen), amarela (V1) e roxa (V2), em função de dois gradientes de temperatura (25 e 33°C). Belém, 2026.



**FONTE:** Autores

A maior concentração dos dados em valores elevados de germinação sugere que tanto 25°C quanto 30°C situam-se dentro da faixa ótima para a ativação metabólica das sementes,

favorecendo os processos de embebição, respiração e mobilização de reservas, fundamentais para o início da germinação (TAIZ; ZEIGER, 2013; BEWLEY et al., 2013).

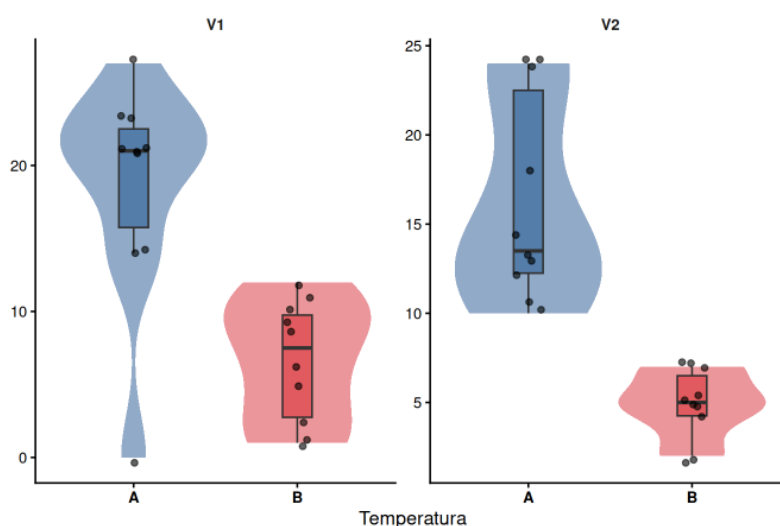
Em T3 (41°C) não houve germinação de sementes de jambu. Pressupõe-se que temperaturas elevadas induzem termoinibição em diversas espécies, mediada principalmente pelo aumento da sensibilidade ao ácido abscísico (ABA) e por danos metabólicos durante a embebição (Xue et al., 2021).

Em *A. oleracea*, a redução drástica do vigor e do comprimento radicular em temperaturas próximas a 35 °C (Alves et al., 2020) indica que 41 °C situa-se claramente fora da faixa térmica tolerável para a germinação, refletindo a ausência total de plântulas nesse tratamento.

### 5.4.3 Comprimento da parte aérea (CPA)

Na Figura 32 evidenciou-se um efeito significativo da temperatura sobre o comprimento da parte aérea em ambas as variedades estudadas ( $p < 0,05$ ), e as avaliações morfológicas qualitativas demonstraram que o aumento térmico não resultou em crescimento funcional ou fisiologicamente equilibrado em nenhuma das variedades estudadas.

**FIGURA 32.** Análise do comprimento da parte aérea de jambu (*Acmella oleracea* (L.) R.K. Jansen), variedades amarela e roxa, de plântulas germinadas in vitro em meio MS em função de dois gradientes de temperatura (25 e 33°C). (A= temperatura 25°C e B= temperatura de 31°C) Belém, 2026.



FONTE: Autores

Sob a temperatura de 25°C, as plantas exibiram crescimento considerado normal (Figura 33), com arquitetura aérea regular, folhas bem expandidas e entrenós

proporcionalmente alongados, refletindo um desenvolvimento harmonioso e eficiente em termos de alocação de recursos. Em consonância, Almeida et al. (2020) avaliaram que, no cultivo *in vitro* de jambu, a temperatura de cultivo em 25 °C favorece desenvolvimento mais equilibrado de brotos e raízes em meio MS, com boa expansão foliar e arquitetura aérea regular.

Outros estudos de germinação e vigor de *A. oleracea* evidenciaram que 25°C é temperatura considerada ótima para germinação e desenvolvimento inicial de plântulas, com boa expansão de folhas e crescimento radicular, refletindo que esta temperatura está dentro da faixa fisiologicamente favorável para espécies tropicais (SARMENTO et al., 2019).

**FIGURA 33.** Desenvolvimento morfológico de plântulas de jambu (*Acmella oleracea* (L.) R.K. Jansen) germinadas *in vitro*, por 45 dias, sob temperatura de 25 °C (A e B). Belém, 2026.



**FONTE:** Autores

Em contraste, em T2 (33 °C), observou-se um padrão de crescimento anormal das plântulas de jambu, caracterizados por: redução da área foliar, aumento da espessura das lâminas foliares, enrolamento marginal das folhas e alterações na expansão foliar, além de encurtamento dos entrenós e desenvolvimento anômalo da haste (Figura 34).

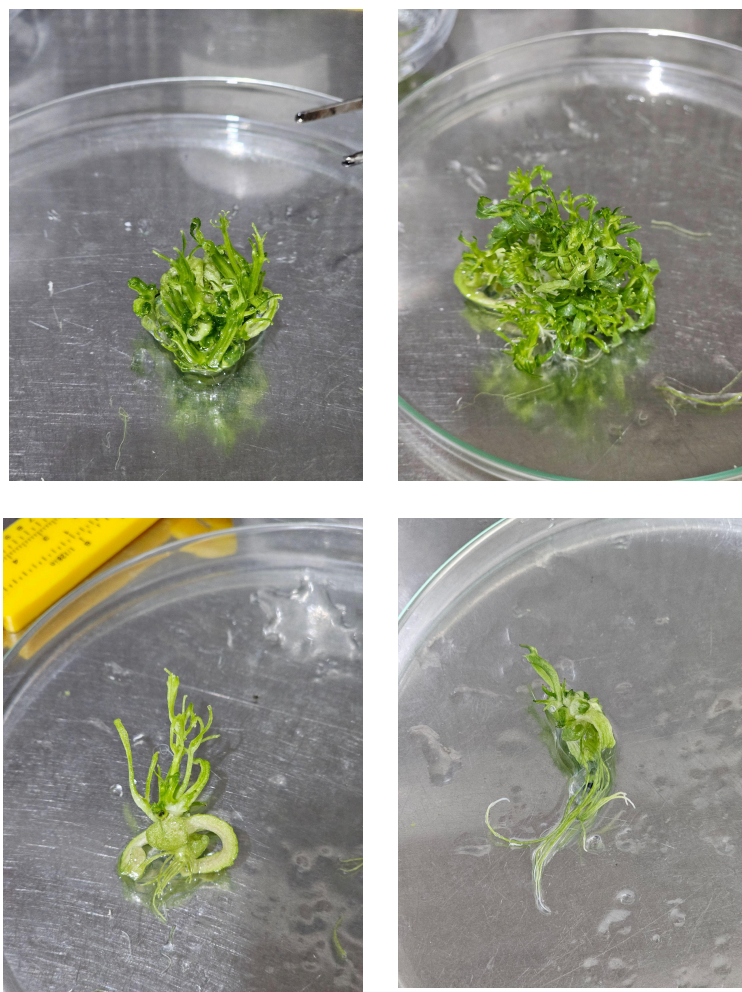
Observou-se ainda redução no número e no comprimento das folhas, bem como comprometimento do sistema radicular, expresso pela diminuição do número de raízes e do comprimento radicular, sintomas típicos de estresse térmico que, por consequência, ocasiona o crescimento de forma desordenada e à custa de alterações morfoanatômicas e fisiológicas adversas (ALMEIDA et al., 2020; SILVA et al., 2020).

Os resultados deste estudo corroboram com ALMEIDA et al. (2020) que, ao elevarem a temperatura de cultivo para 33 °C, evidenciaram que embora ainda seja possível o desenvolvimento *in vitro* de jambu, há alterações na morfologia de brotos e raízes, indicando que o aumento térmico compromete a qualidade do crescimento, mesmo sem impedir totalmente a sobrevivência.

Embora sementes de jambu germinem até 35 °C, o crescimento de plântulas é prejudicado em temperaturas elevadas, com redução de vigor e alterações no desenvolvimento inicial, o que sustenta que 33 °C pode induzir estresse térmico sutil, mas morfológicamente visível (SARMENTO et al., 2019).

**FIGURA 34.** Desenvolvimento morfológico de plântulas de jambu (*Acmella oleracea* (L.) R.K. Jansen) germinadas *in vitro* em meio MS sob temperatura de 33 °C (A-H). Belém, 2026.





**FONTE:** Autores

Do ponto de vista fisiológico, temperaturas acima do ótimo térmico podem desregular o balanço hormonal, especialmente a relação entre auxinas, giberelinas e citocininas, comprometendo a expansão celular coordenada, o alongamento dos entrenós e a diferenciação foliar (TAIZ; ZEIGER, 2013; LARCHER, 2006).

Kumar et al. (2025) demonstrou que temperaturas acima de 30°C desregulam ABA, auxinas, giberelinas e citocininas, levando a alongamento desordenado de caule, redução da expansão foliar e menor crescimento radicular, o que explica o padrão de estiolamento e desorganização estrutural observado em T2 (33 °C). Em outras espécies, temperaturas próximas de 30–35 °C desregulam o balanço hormonal e reduzem a eficiência fotossintética, levando a crescimento desordenado e menor expansão foliar conforme resultados em consonância de García-Morrugares et al. (2023).

A redução da eficiência fotossintética se dá pelo estresse intensificar a taxa respiratória, elevando o consumo de ATP e NADH, danificando o complexo de captura de luz

nas cloroplastas, e limitando a disponibilidade de fotoassimilados para o crescimento equilibrado da parte aérea e do sistema radicular (BAKER; ROSENQVIST, 2004). Além disso, estudos recentes corroboram que, em condições de calor excessivo, há um aumento na produção de espécies reativas de oxigênio (ROS), levando a estresse oxidativo e danos celulares, como observado em culturas de milho e soja (HASAN et al., 2021; WANG et al., 2022).

A redução simultânea do desenvolvimento radicular observada em T2 agrava esse cenário, uma vez que sistemas radiculares pouco desenvolvidos restringem a absorção de água e nutrientes, retroalimentando o estresse e acentuando alterações morfológicas na parte aérea. Esse efeito cascata pode ser explicado pela alocação prioritária de recursos para a parte aérea em resposta ao estresse, resultando em uma distribuição desigual de biomassa e redução na razão raiz/parte aérea (R/S), conforme evidenciado em experimentos com *Arabidopsis thaliana* sob calor (KOVÁCS et al., 2019).

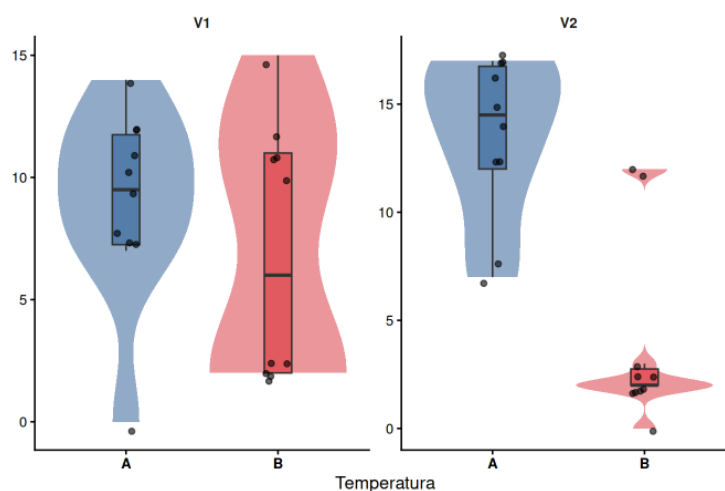
Consequentemente, os resultados evidenciaram que, para ambas as variedades, o aumento da temperatura térmica resultou em estiolamento e desorganização estrutural. Em contextos ecológicos, tais alterações podem comprometer a resiliência das plantas a fatores ambientais adicionais, como seca ou competição, impactando a produtividade agrícola e a biodiversidade em ecossistemas tropicais (IPCC, 2023).

#### **5.4.4 Número de folhas (N.F)**

Em T1 (25 °C), ambas as variedades exibiram maior número de folhas e maior amplitude de variação, indicando desenvolvimento foliar ativo e arquitetura vegetativa preservada. Esse padrão reflete um crescimento equilibrado, com folhas normais em termos morfológicos, caracterizadas por lâminas expandidas, bordas planas e ausência de deformações, favorecendo uma superfície fotossintética ampla e eficiente, conforme evidenciado na Figura 33.

Em contraste, o gráfico (Figura 35) exhibe que sob estresse térmico (33 °C), observou-se redução acentuada no número de folhas, especialmente na variedade roxa (V2), cuja distribuição tornou-se mais concentrada em valores baixos, refletindo elevada sensibilidade da emissão foliar ao aumento da temperatura. Na variedade amarela (V1), embora também tenha ocorrido redução no número de folhas, a maior dispersão dos dados sugere resposta mais heterogênea ao estresse térmico.

**FIGURA 35.** Análise do número de folhas de plântulas de jambu (*Acmella oleracea* (L.) R.K. Jansen) germinadas in vitro em meio MS em função de dois gradientes de temperatura (A=25 e B=33°C). Belém, 2026.



**FONTE:** Autores.

Do ponto de vista morfológico, as folhas em T2 (33 °C) exibiram características anômalas, como retorcimento, espessamento da lâmina foliar, redução do tamanho e enrolamento das bordas, contrastando com o desenvolvimento normal observado em 25 °C, onde as folhas mantiveram forma e proporções típicas de plantas saudáveis. Todas as unidades experimentais estão ilustradas na Figura 34.

Resultados semelhantes foram observados em estudos recentes com hortaliças, em que o estresse térmico reduziu altura da planta, área foliar e número de folhas, indicando inibição generalizada do crescimento vegetativo sob alta temperatura (MISHRA et al., 2023). Fisiologicamente, essas alterações estão associadas à desregulação do balanço hormonal, particularmente a redução na síntese de citocininas e giberelinas, que promovem a expansão celular e a diferenciação foliar (TAIZ; ZEIGER, 2013).

Além disso, o estresse térmico induz um aumento na produção de etileno e abscísico ácido (ABA), hormônios que inibem o crescimento foliar e aceleram o envelhecimento precoce, limitando a emissão de novas folhas e contribuindo para a redução observada no número total (LARCHER, 2006). A redução no número e na área das folhas sob T2 está de acordo com estudos que demonstram inibição da divisão celular e diminuição do número de células foliares sob alta temperatura, resultando em folhas menores e menor superfície fotossintética (CHEN et al., 2022).

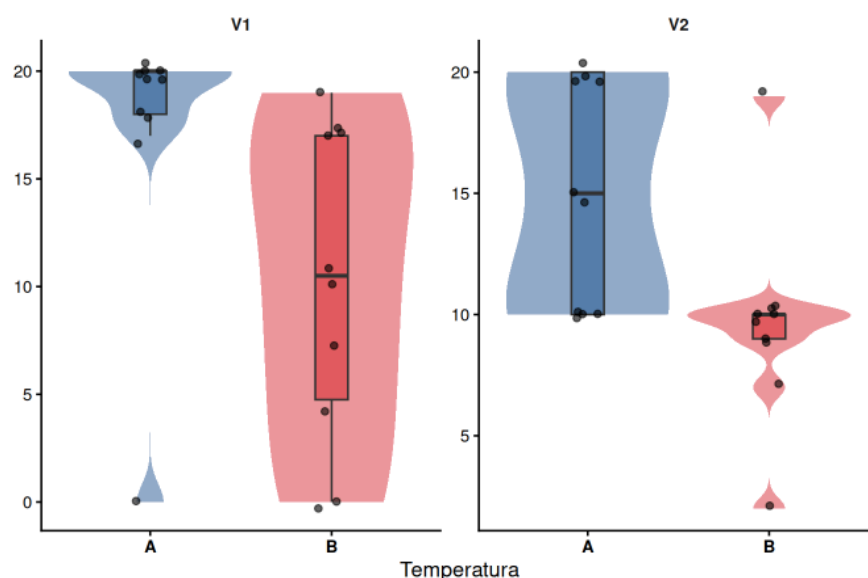
A maior vulnerabilidade da variedade roxa (V2) ao calor, evidenciada pela redução mais acentuada no número de folhas, pode estar sendo influenciada por diferenças genéticas na tolerância térmica, com implicações diretas para produtividade em ambientes tropicais.

Além disso, o espessamento e o enrolamento das bordas constituem mecanismos adaptativos para minimizar a perda de água transpiracional, reduzindo a área foliar exposta e a dissipação térmica, embora comprometam a eficiência fotossintética ao limitar a captura de luz (HASAN et al., 2021). Em termos biológicos, a plasticidade fenotípica varia entre variedades, com V2 mostrando maior vulnerabilidade, possivelmente devido a diferenças genéticas na expressão de genes relacionados à tolerância térmica, como aqueles envolvidos na biossíntese de antioxidantes (KOVÁCS et al., 2019; KUMAR et al., 2022; MISHRA et al., 2023).

#### 5.4.5 Número e quantidade de raízes

Em T1 (Figura 36), ambas as variedades apresentaram maior número de raízes e maior amplitude de variação, refletindo um sistema radicular funcionalmente ativo, com elevada capacidade de ramificação e exploração do meio. Esse padrão é consistente com um desenvolvimento radicular equilibrado, caracterizado morfologicamente por raízes alongadas, bem ramificadas e com distribuição uniforme, favorecendo a absorção eficiente de água e nutrientes em um ambiente não estressante.

**FIGURA 36.** Análise do número de raízes de plântulas de jambu (*Acmella oleracea* (L.) R.K. Jansen) germinadas in vitro em meio MS em função de dois gradientes de temperatura (A=25 e B=33°C). Belém, 2026.



**FONTE:** Autores

Esse padrão de maior número e ramificação de raízes sob esta temperatura é consistente com o desenvolvimento ótimo de raízes primárias e secundárias observado em

*Acmella oleracea* e em outras espécies de Asteraceae sob temperaturas próximas a 25 °C (SARMENTO et al., 2019; SILVA et al., 2020; LIU et al., 2020).

Em contraste, sob temperatura elevada (33 °C), observou-se redução expressiva no número de raízes, acompanhada por distribuições mais estreitas, evidenciando uma resposta fisiológica homogênea ao estresse térmico. Essa resposta reflete que a temperatura atuou como fator limitante primário, suprimindo a expressão de diferenças genotípicas e impondo uma estratégia conservativa comum às plantas. Do ponto de vista morfológico, as raízes exibiram alterações como redução no comprimento e na ramificação lateral, contrastando com o crescimento normal observado em T1, onde a arquitetura radicular se desenvolveu de maneira proporcional e vigorosa.

A redução do número e da ramificação de raízes sob T2 é compatível com padrões descritos em outras espécies, em que temperaturas supraótimas inibem a formação de raízes laterais e reprogramam a arquitetura radicular (LIU et al., 2020; MISHRA et al., 2023; ZHANG et al., 2022). Fisiologicamente, temperaturas supraótimas comprometem a atividade meristemática radicular, reduzem a formação de raízes laterais e alteram o balanço hormonal, especialmente a sinalização por auxinas e citocininas, essenciais para a ramificação do sistema radicular. Os resultados da pesquisa corroboram com estudos que mostram que o calor atua como fator limitante primário, suprimindo diferenças genotípicas e impondo uma estratégia conservativa comum às plantas (LIU et al., 2020; MISHRA et al., 2023; ZHANG et al., 2022).

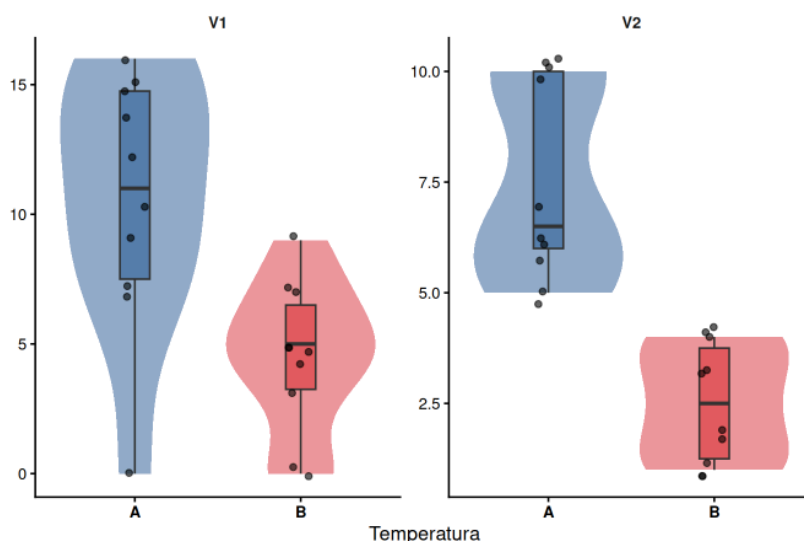
Além disso, o estresse térmico intensifica o metabolismo respiratório e a produção de espécies reativas de oxigênio (ROS), levando a danos oxidativos nas células meristemáticas e à reprogramação do investimento energético, priorizando a manutenção metabólica em detrimento da expansão do sistema radicular. Biologicamente, essa resposta reflete uma plasticidade fenotípica adaptativa, onde a planta reduz a exploração radicular para conservar recursos em condições adversas, minimizando o risco de desidratação e otimizando a sobrevivência a curto prazo, embora comprometa o crescimento vegetativo a longo prazo (WANG et al., 2022).

O comprometimento da atividade meristemática, da formação de raízes laterais e do balanço hormonal sob calor é amplamente descrito em revisões recentes, que destacam o papel de auxinas, citocininas e ABA, bem como de ROS, na reprogramação do crescimento radicular sob estresse térmico (ZHANG et al., 2022; HASAN et al., 2021).

#### 5.4.6 Comprimento das raízes (CPR)

Conforme evidenciado na Figura 37, em T1 (25 °C), observou-se maior comprimento radicular, associado a maior amplitude de variação, refletindo um sistema radicular mais desenvolvido e funcionalmente ativo. Morfologicamente, as raízes exibiram características normais, com alongamento longitudinal e ramificação lateral abundante, favorecendo uma exploração eficiente do substrato e uma arquitetura radicular equilibrada. Em contraste, sob T2 (33 °C), ocorreu redução expressiva no comprimento das raízes em ambas as variedades, acompanhada por distribuições mais concentradas, evidenciando um efeito restritivo do estresse térmico sobre o crescimento longitudinal do sistema radicular.

**FIGURA 37.** Comprimento de raízes de plântulas de jambu (*Acmella oleracea* (L.) R.K. Jansen) germinadas in vitro em meio MS em função de dois gradientes de temperatura (A=25 e B=33°C). Belém, 2026.



**FONTE:** Autores

A redução do comprimento radicular em T2 é consistente com estudos que demonstram que temperaturas acima de 29 °C comprometem o alongamento de raízes em plântulas de jambu, com valores máximos de comprimento obtidos em temperaturas próximas ao ótimo (SILVA et al., 2020). Além disso, a redução radicular sob calor limita a absorção de água e nutrientes, contribuindo para sintomas na parte aérea e para diminuição da razão raiz/parte aérea, como descrito em espécies tropicais sob estresse térmico (KOVÁCS et al., 2019; MISHRA et al., 2023; LIU et al., 2020) e em outras espécies, em que temperaturas elevadas restringem o alongamento e a expansão do sistema radicular (LUO et al., 2020).

O encurtamento acentuado e a menor alongação radicular são compatíveis com revisões recentes que indicam que temperaturas excessivas restringem o crescimento

longitudinal das raízes e reduzem a biomassa radicular em diversas espécies (KUMAR et al., 2025). Embora já citada em outro contexto, essa revisão discute que o calor inibe divisão e expansão celular no meristema radicular, o que explica diretamente a redução de comprimento e o espessamento do diâmetro observados em 33 °C.

Biologicamente, essas respostas refletem uma plasticidade fenotípica adaptativa. A combinação de menor número e menor comprimento de raízes implica redução da capacidade de exploração do meio, limitando a absorção de água e nutrientes e contribuindo para um desequilíbrio na razão raiz/parte aérea (R/S).

#### 5.4.7 Efeitos de tratamento, variedade e interação sobre as variáveis morfológicas

A análise de variância evidenciou que o fator temperatura exerceu efeito significativo ( $p < 0,05$ ) sobre as variáveis morfofisiológicas avaliadas, demonstrando que o aumento térmico impactou de forma expressiva o crescimento e o desenvolvimento inicial das plântulas de jambu germinadas *in vitro* (Tabela 4). Em contrapartida, o fator variedade apresentou efeito significativo apenas para o comprimento das raízes, enquanto a interação temperatura  $\times$  variedade foi significativa exclusivamente para o número de folhas, indicando resposta diferencial entre as variedades sob estresse térmico para essa variável específica.

**TABELA 4.** Resumo da análise de variância (ANOVA) para as variáveis morfológicas de jambu (*Acmella oleracea* (L.) R.K. Jansen) em função dos gradientes de temperatura (25 e 33°C). Belém, 2026.

VARIÁVEL	FONTE DE VARIAÇÃO	F	P-VALOR
Germinação	Temperatura	0,20	0,6574
	Variedade	0,20	0,6574
	Temperatura X Variedade	1,80	0,1881
Altura (cm)	Temperatura	48,67	<0,001
	Variedade	1,36	0,2506
	Temperatura X Variedade	0,02	0,8818
Nº de Folhas	Temperatura	18,00	<0,001
	Variedade	0,30	0,5898
	Temperatura X Variedade	7,40	0,0100
Nº de Raízes	Temperatura	12,00	0,0014
	Variedade	0,65	0,4269
	Temperatura X Variedade	0,22	0,6404
Comprimento de Raízes	Temperatura	30,42	<0,001
	Variedade	6,28	0,0168
	Temperatura X Variedade	0,25	0,6191

FONTE: Autores

A germinação não foi significativamente afetada pelas temperaturas analisadas (25 e 33°C), pela variedade ou pela interação temperatura  $\times$  variedade ( $p > 0,05$ ), refletindo que

essa variável mostrou-se estável nessa faixa térmica com resposta semelhante entre as variedades. Esse resultado evidenciou maior tolerância da fase germinativa ao estresse térmico *in vitro* avaliado, refletindo que os mecanismos iniciais de quebra de dormência e emergência da plântula são menos sensíveis a variações térmicas nessa faixa, possivelmente devido à reserva energética acumulada nas sementes.

A ausência completa de germinação a 41 °C demonstrou que essa temperatura excedeu a faixa ótima e de tolerância térmica da espécie, promovendo comprometimento irreversível dos processos metabólicos envolvidos na embebição, ativação enzimática e alongamento celular inicial. Embora não tenha sido incluída nas análises estatísticas inferenciais devido não possibilitar a coleta de informações, essa condição térmica fornece informação biológica essencial sobre o limite superior de tolerância térmica do jambu durante a fase germinativa. Temperaturas supraótimas são reconhecidas por causar desnaturação de proteínas, desorganização de membranas celulares e inibição da atividade enzimática, resultando na falha do processo germinativo (TAIZ; ZEIGER, 2013; LARCHER, 2006).

A faixa térmica analisada exerceu efeito altamente significativo sobre a altura da parte aérea ( $p < 0,001$ ), enquanto não foram observados efeitos da variedade nem da interação temperatura  $\times$  variedade, evidenciando que o estresse térmico afetou de forma semelhante ambas as variedades, promovendo redução do crescimento em altura sob 33 °C. A resposta da parte aérea foi dominada pelo fator ambiental, independentemente da variedade, refletindo uma limitação fisiológica comum, como a desregulação hormonal e a redução na eficiência fotossintética (HASAN et al., 2021).

Para o número de folhas, verificou-se efeito significativo das temperaturas analisadas ( $p < 0,001$ ) e interação significativa temperatura  $\times$  variedade ( $p = 0,0100$ ), refletindo que a resposta ao estresse térmico depende da variedade. Esse resultado demonstrou que as variedades amarela e roxa não responderam de forma idêntica ao aumento da temperatura, com uma variedade mantendo maior emissão foliar e a outra apresentando redução mais acentuada, evidenciando diferentes estratégias morfofisiológicas frente ao estresse térmico.

O número de raízes foi significativamente influenciado pela temperatura ( $p = 0,0014$ ), mas não apresentou efeito de variedade nem interação significativa, indicando que o aumento da temperatura reduziu a emissão de raízes de forma semelhante em ambas as variedades. O estresse atuou como fator limitante dominante sobre a rizogênese, independentemente da variedade, comprometendo a atividade meristemática e a formação de raízes laterais.

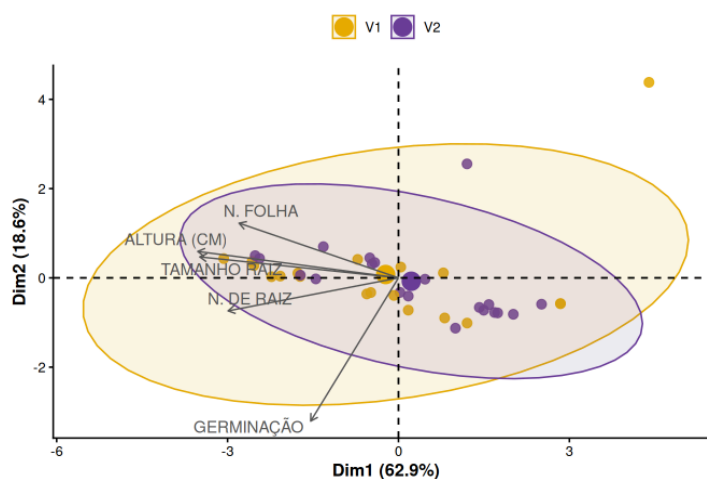
Para o comprimento das raízes, observou-se efeito significativo tanto das temperaturas ( $p < 0,001$ ) quanto da variedade ( $p = 0,0168$ ), sem interação significativa, indicando que,

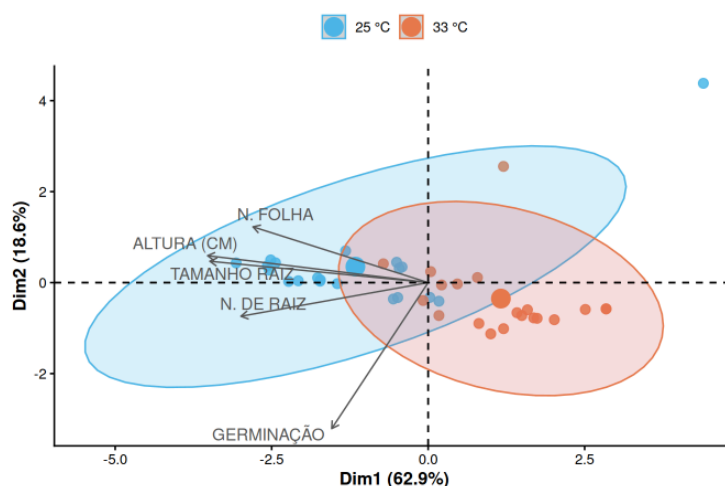
embora ambas as variedades tenham sido negativamente afetadas pelo aumento térmico, uma delas apresentou maior capacidade de manter o crescimento radicular. A ausência de interação revela que essa superioridade varietal foi consistente nas duas temperaturas avaliadas, refletindo maior eficiência intrínseca no desenvolvimento do sistema radicular sob estresse térmico.

#### 5.4.8 Análise de componentes principais (ACP) para jambu sob estresse térmico

A análise de componentes principais aplicada às variáveis morfológicas de plântulas cultivadas *in vitro* sob diferentes condições térmicas (Figura 38) evidenciou organização multivariada clara dos dados, com o primeiro componente principal (*Dim 1*) explicando 62,9% da variabilidade total e o segundo componente (*Dim 2*) 18,6%, totalizando mais de 80% da variação observada. Esse percentual elevado indica que o plano bidimensional é representativo para a interpretação integrada das respostas morfofisiológicas das plantas ao estresse térmico imposto.

**FIGURA 38.** Análise de Componentes Principais (ACP) das variáveis morfológicas de jambu (*Acmella oleracea* (L.) R.K. Jansen) em função de três gradientes de temperatura (25, 33 e 41°C): (A) ordenação por variedade; (B) ordenação por tratamento. Belém, 2026.





FONTE. Autores

No biplot, observa-se que o primeiro componente principal representou predominantemente o gradiente térmico, promovendo separação parcial entre as plantas cultivadas a 25 °C e aquelas submetidas a 33 °C. As amostras associadas à temperatura de 25 °C concentraram-se no lado negativo desse eixo, enquanto aquelas sob 33 °C distribuíram-se no sentido positivo, evidenciando que a elevação da temperatura exerceu forte influência sobre o conjunto de variáveis analisadas e que o estresse térmico atuou como fator determinante na reorganização morfológica das plântulas.

Os vetores associados às variáveis altura da parte aérea, número de folhas, número de raízes e comprimento radicular apresentaram maior projeção no sentido negativo, indicando forte influência dessas variáveis e a condição térmica de 25 °C. Esse agrupamento reflete que, sob temperatura considerada mais próxima do ótimo fisiológico para a espécie, as plantas mantiveram crescimento vegetativo mais equilibrado, com maior desenvolvimento foliar e radicular, refletindo adequada atividade metabólica e eficiência na alocação de assimilados.

Em contraste, as amostras cultivadas a 33 °C posicionaram-se no quadrante oposto, associando-se negativamente às variáveis estruturais. Vale ressaltar que a variável germinação apresentou comportamento diferenciado, com baixa correlação em relação às demais variáveis morfológicas. Embora a germinação não tenha sido significativamente afetada pelo aumento da temperatura, conforme corroborado pela análise de variância, o crescimento subsequente das plântulas foi severamente comprometido. Assim, a elevação térmica afetou principalmente a fase pós-germinativa, restringindo o desenvolvimento da parte aérea e do sistema radicular.

O segundo componente principal (*Dim 2*) capturou variações relacionadas à resposta diferencial entre variedades, embora de forma menos pronunciada que o efeito térmico. Observou-se certa sobreposição entre as elipses das variedades amarela (V1) e roxa (V2), indicando que, sob estresse térmico, a temperatura atuou como fator limitante dominante, reduzindo a expressão das diferenças genotípicas. Ainda assim, a variedade roxa apresentou leve deslocamento associado às variáveis radiculares, refletindo maior capacidade de manter o desenvolvimento do sistema radicular mesmo sob condições térmicas adversas.

De forma integrada, o ACP revelou que o estresse térmico promoveu alteração significativa no padrão de crescimento das plântulas de jambu, afetando principalmente a arquitetura vegetativa e o desenvolvimento radicular, enquanto a germinação mostrou-se relativamente tolerante às temperaturas avaliadas. A condição de 25 °C favoreceu crescimento mais robusto e equilibrado, ao passo que a exposição a 33 °C induziu respostas típicas de estresse, com redução do crescimento, reorganização morfológica e possível priorização de mecanismos de sobrevivência em detrimento da expansão vegetativa.

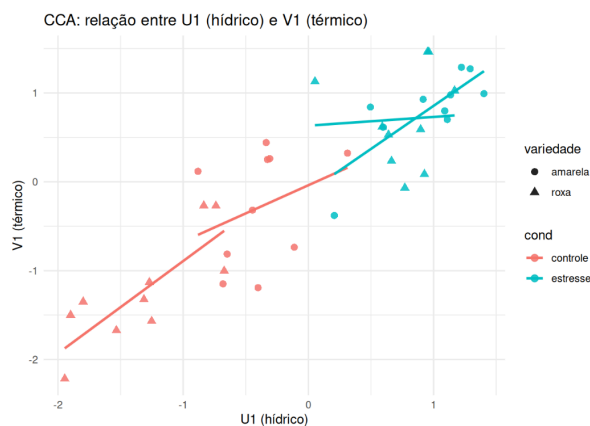
Estes resultados ressaltam que, em cultivo *in vitro*, a temperatura exerce papel central na modulação do desenvolvimento inicial do jambu, influenciando de forma integrada múltiplos atributos morfológicos.

### **5.5 Análise integrativa estresse térmico-hídrico**

Na Figura 39, a elevada correlação do primeiro par canônico ( $CC1 \approx 0,884$ ) evidencia que as respostas morfoagronômicas ao estresse hídrico (lâmina 1) e ao estresse térmico (33 °C) compartilham um gradiente comum, no qual a condição de estresse desloca sistematicamente os escores em relação ao controle (lâmina 3; 25 °C). Esse comportamento indica que, mesmo em sistemas experimentais distintos (viveiro e *in vitro*), há convergência nas direções de mudança das características de crescimento, sugerindo que a redução do vigor sob limitação hídrica acompanha a redução do vigor sob aquecimento moderado, cenário coerente com o que se espera em condições de campo onde estresses frequentemente ocorrem (SUZUKI et al., 2014).

Em termos ecofisiológicos, essa integração é biologicamente plausível porque tanto o déficit hídrico quanto a elevação de temperatura tendem a limitar crescimento por impactos combinados sobre relações hídricas, assimilação de carbono e balanço energético, com reflexos diretos na expansão e arquitetura da planta (FAROOQ et al., 2009; BITA; GERATS, 2013).

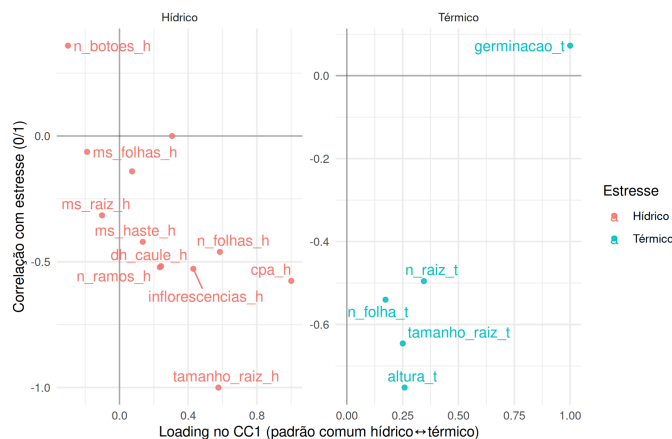
**FIGURA 39.** Análise de Correlação Canônica (CCA) considerando os experimentos com de jambu (*Acmella oleracea* (L.) R.K. Jansen) conduzidos em viveiro e *in vitro* em função de dois gradientes de temperatura (25 = fator controle, 33 = fator estresse) e hídrico (Lâmina 3 = fator controle; Lâmina 1 = fator estresse). Belém, 2026.



**FONTE:** Autores

A Figura 40 demonstra: (i) a contribuição ao eixo comum (loading em CC1) e (ii) o quanto cada variável se associa à condição de estresse. O padrão observado aponta o sistema radicular como componente central de integração: TAMANHO\_RAIZ\_H (hídrico) e, no térmico, ALTURA\_T e TAMANHO\_RAIZ\_T apresentam as maiores contribuições conjuntas, acompanhadas por variáveis de emissão/estrutura como N\_FOLHAS\_H, INFLORESCÊNCIAS\_H e N\_RAMOS\_H (hídrico) e por N\_RAIZ\_T/N\_FOLHA\_T (térnico), caracterizando um módulo “crescimento–folhas–raízes” sensível a ambos os estresses.

**FIGURA 40.** Gráfico integrativo “loading no CC1 × correlação com estresse”: (i) contribuição ao padrão compartilhado (loading em CC1) e (ii) associação com estresse, considerando os experimentos com de jambu (*Acmella oleracea* (L.) R.K. Jansen) conduzidos em viveiro e em telado em função de dois gradientes de temperatura (25 = fator controle, 33 = fator estresse) e hídrico (Lâmina 3 = fator controle; Lâmina 1 = fator estresse). Belém, 2026.



**FONTE:** Autores

Esse resultado corrobora com os resultados anteriores ao indicar que a manutenção de crescimento vegetativo e desenvolvimento radicular emerge como marcador integrado de desempenho sob seca e calor, alinhado a trabalhos que descrevem redução de expansão foliar e proliferação radicular sob déficit hídrico (FAROOQ et al., 2009) e comprometimento do desenvolvimento sob altas temperaturas, com efeitos sobre crescimento e homeostase celular (BITA; GERATS, 2013), além de destacar a importância de análises multivariadas para capturar respostas interdependentes quando múltiplos estresses atuam em conjunto (SUZUKI et al., 2014).

Com base na análise integrativa por CCA, observa-se que as respostas do jambu ao estresse hídrico (lâmina 1) e ao estresse térmico (33 °C) compartilham um gradiente comum de desempenho, evidenciado pela elevada correlação do primeiro par canônico ( $r_1 \approx 0,88$ ), indicando que plantas com desempenho superior em uma condição tendem a manter melhor desempenho também na outra. Assim, variáveis associadas ao crescimento e, principalmente ao sistema radicular (ex.: tamanho/arquitetura de raízes), acompanhadas por atributos de emissão foliar e arquitetura da parte aérea, devem receber maior atenção em estudos relacionados à tolerância a estresses térmico e hídrico (frequentemente associados à mudanças climáticas). (FAROOQ et al., 2009; BITA; GERATS, 2013; SUZUKI et al., 2014).

## 5.6 Recomendações para cultivo

Com base nos resultados obtidos ao longo do estudo, é possível estabelecer recomendações técnicas fundamentadas quanto à escolha varietal de *Acmella oleracea* (L.) R.K. Jansen para cultivo, considerando diferentes condições de manejo hídrico e objetivos de produção.

De modo geral, ambas as variedades demonstraram capacidade de adaptação às variações experimentais, contudo apresentaram estratégias adaptativas diferentes, refletidas no padrão de crescimento vegetativo, no investimento reprodutivo e na capacidade de manutenção da produção ao longo do gradiente hídrico imposto. Tais diferenças indicam que a escolha varietal deve estar diretamente associada ao ambiente de cultivo, ao nível de controle do manejo hídrico e à finalidade econômica da produção.

A variedade roxa destacou-se pelo maior desenvolvimento da parte aérea, pela maior emissão foliar, pela maior produção de inflorescências e pela maior integração entre crescimento vegetativo e reprodutivo, especialmente sob condições hídricas intermediárias, próximas à capacidade de campo. Esse comportamento evidencia maior plasticidade

fenotípica e eficiência na alocação de fotoassimilados, resultando em desempenho produtivo mais estável ao longo do gradiente hídrico avaliado. Ademais, a menor dispersão dos dados de biomassa e das variáveis morfológicas indica maior uniformidade de resposta, característica desejável em sistemas produtivos comerciais, nos quais a previsibilidade e a constância da produção constituem fatores determinantes.

Do ponto de vista agrônomo, a variedade roxa mostra-se mais adequada para sistemas de cultivo com manejo hídrico tecnicamente ajustado, nos quais se busca maximizar a produção de biomassa aérea e reprodutiva, sobretudo das inflorescências, que constituem a principal parte comercial da cultura. Adicionalmente, seu desempenho mais equilibrado sob variações moderadas de disponibilidade hídrica sugere maior resiliência frente a oscilações ambientais, aspecto particularmente relevante em cenários de mudança climática.

Em contrapartida, a variedade amarela apresentou comportamento mais conservativo, caracterizado por maior investimento estrutural, especialmente no diâmetro da haste e no sistema radicular, além de crescimento mais linear da parte aérea ao longo do gradiente hídrico. Embora tenha demonstrado menor capacidade de maximização do crescimento vegetativo e reprodutivo sob condições de estresse, essa variedade evidenciou robustez estrutural e maior exploração radicular sob elevadas lâminas de irrigação, o que pode representar vantagem em ambientes onde o manejo hídrico é menos preciso ou onde haja uma maior necessidade de plantas com melhor estrutura.

Entretanto, a maior variabilidade intravarietal observada na variedade amarela, especialmente sob condições de excesso hídrico, indica menor uniformidade produtiva, o que pode limitar seu desempenho em sistemas intensivos voltados à alta produtividade. Dessa forma, recomenda-se o cultivo da variedade amarela em sistemas de menor intensificação, em condições de manejo hídrico mais amplas ou em contextos nos quais a estabilidade estrutural e a tolerância a variações ambientais sejam mais relevantes do que a maximização da biomassa reprodutiva, o que a torna mais atrativa para pequenos produtores.

Adicionalmente, considerando a maior suscetibilidade observada a estresses bióticos sob déficit hídrico severo, recomenda-se que ambas as variedades sejam cultivadas evitando-se extremos de disponibilidade hídrica, sobretudo a restrição hídrica prolongada, que compromete o desempenho fisiológico e pode intensificar a incidência de pragas.

Em síntese, os resultados indicam que a variedade roxa é a mais recomendada para cultivo comercial intensivo, especialmente quando o objetivo é a maximização da produção de inflorescências e biomassa aérea, enquanto a variedade amarela pode ser indicada para sistemas de cultivo mais conservativos, com menor controle hídrico ou em condições nas

quais a robustez estrutural da planta seja desejável. Tais recomendações fornecem subsídios técnicos relevantes para a tomada de decisão quanto à escolha varietal, contribuindo para a otimização do manejo e para o aumento da eficiência produtiva do jambu em ambientes tropicais.

## CONCLUSÃO

Os resultados demonstraram que a disponibilidade hídrica e a temperatura são fatores determinantes no comportamento morfofisiológico do jambu, influenciando o crescimento vegetativo, o desenvolvimento reprodutivo e a alocação de biomassa. Condições hídricas intermediárias, próximas à capacidade de campo, favoreceram o equilíbrio entre vigor vegetativo e produção reprodutiva, enquanto o déficit e o excesso de água limitaram o desempenho da cultura. O desenvolvimento do sistema radicular configurou-se como importante mecanismo adaptativo para a manutenção do balanço hídrico interno, embora com respostas distintas entre as variedades, sendo o estresse hídrico severo associado ao aumento da suscetibilidade a pragas e à ocorrência de murcha temporária.

As variedades apresentaram estratégias adaptativas contrastantes: a variedade roxa destacou-se pelo maior desenvolvimento da parte aérea, maior emissão foliar e maior produção de inflorescências, especialmente sob condições hídricas intermediárias, enquanto a variedade amarela exibiu comportamento mais conservativo, com maior investimento estrutural no diâmetro da haste e no sistema radicular e maior variabilidade sob elevada disponibilidade hídrica. No cultivo *in vitro*, a temperatura de 25 °C foi favorável à germinação e ao desenvolvimento inicial do jambu, ao passo que temperaturas elevadas inviabilizaram a germinação. Assim, a produtividade do jambu depende de manejo hídrico equilibrado, controle térmico adequado e escolha varietal apropriada para aumentar a resiliência da cultura frente a estresses abióticos.

Programa de melhoramento genético e de conservação da espécie devem priorizar a incorporação sistemática de descritores de raiz e vigor vegetativo como critérios de triagem e seleção de germoplasma, uma vez que esses caracteres tendem a capturar a “resiliência compartilhada” frente a múltiplos estresses e podem acelerar a identificação de materiais mais estáveis sob mudanças climáticas.

Como limitações do estudo, destacou-se a ocorrência de infestação de pragas (ácaros) durante o experimento, podendo atuar como fator de confusão ao interagir com o estresse hídrico. Além disso, foi avaliado apenas o estresse hídrico isolado, sem considerar a ocorrência de estresses combinados comuns em condições agrícolas. Não foram realizadas medições fisiológicas diretas, como trocas gasosas ou potencial hídrico foliar. Por fim, a condução do experimento em ambiente controlado limita a extrapolação direta dos resultados para condições em campo.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, M. R. et al. Esterilização de sementes para cultivo in vitro: protocolo de lavagem com água destilada estéril. *Revista Brasileira de Sementes*, v. 42, n. 2, p. 1–10, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0101-3122202042212345>.
- ANDENBERG, A. et al. Systematics, phylogeny and biogeography of the Asteraceae. *Taxon*, v. 56, n. 2, p. 367–386, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.2307/25065807>.
- ANSARI, M. W. et al. Drought stress responses in plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, v. 141, p. 1–11, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.05.018>.
- AVIZ, R. M. et al. Crescimento e produção do jambu sob estresse hídrico. *Revista Ciência Agrária*, v. 64, n. 2, p. 1–14, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1983-084X2022v64n2p1>.
- BENTO, J. Root growth and water stress: mechanisms and responses. *Plant Physiology and Biochemistry*, v. 175, p. 15–26, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2022.05.019>.
- BHATTACHARYA, S. Hormonal regulation of root growth under water stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, v. 90, p. 11–22, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2015.03.002>.
- BINOTTO, E. et al. Variabilidade de crescimento vegetativo sob estresse hídrico. *Revista Brasileira de Agroecologia*, v. 11, n. 2, p. 1–10, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.18511/00012345.2016v11n2p1>.
- BISWAS, D. K. et al. In vitro culture as a tool for studying plant stress responses. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, v. 141, n. 1, p. 1–14, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11240-020-01789-5>.
- BITTENCOURT, L. Ácido abscísico e desenvolvimento floral em plantas medicinais. *Revista Brasileira de Plantas Medicinais*, v. 22, n. 2, p. 1–12, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1983-084X2020v22n2p1>.

BLANCO, M. A. Natural products and sustainable development: trends and opportunities. *Journal of Cleaner Production*, v. 242, 118471, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118471>.

BLUM, A. Drought resistance, water-use efficiency, and yield potential—Are they compatible, dissonant, or mutually exclusive? *Agricultural Water Management*, v. 180, p. 1–10, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.09.013>.

BORGES, L. S. et al. Arbuscular mycorrhizal fungi and phosphorus in spilanthol and phenolic compound yield in jambu plants. *Horticultura Brasileira*, v. 39, n. 2, p. 192–199, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0102-05362021000200005>.

BOWERS, J. E.; HANSEN, M. Heat stress in plants: mechanisms and responses. *Annual Review of Plant Biology*, v. 72, p. 1–26, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-080620-024711>.

BRASIL. Regras para análise de sementes. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. Brasília: MAPA/ACS, 2009. 395 p.

CAMPITELLI, E. ggnewscale: multiple fill and colour scales in “ggplot2”. [S.l.]: CRAN, s.d. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=ggnewscale>. Acesso em: 27 fev. 2026.

CARDOSO, R. C. et al. Descrição morfológica de *Acmella oleracea* (L.) R.K. Jansen (Asteraceae). *Revista Caatinga*, v. 28, n. 4, p. 89–97, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1983-21252015v28n411rc>.

CHAVES, M. M. et al. Understanding plant responses to drought – from genes to the whole plant. *Functional Plant Biology*, v. 30, n. 8, p. 767–780, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1071/FP03007>.

CHAVES, M. M.; FLEXAS, J.; PINHEIRO, C. Photosynthesis under drought and salt stress: regulation mechanisms from whole plant to cell. *Annals of Botany*, v. 103, n. 4, p. 551–560, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/aob/mcn125>.

ZERIMAR LABORATÓRIO. Ácaros em plantas: sintomas e controle. São Paulo: Zerimar Laboratório, 2025. 12 p.

CHEN, L. et al. Salt stress signaling in plant tissue cultures. *Plant Physiology*, v. 186, n. 2, p. 601–612, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1104/pp.21.00123>.

CHEN, L. et al. Inhibition of cell division and reduction in leaf cell number under high temperature. *Plant Physiology*, v. 188, n. 2, p. 657–670, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1104/pp.22.00126>.

CHUNG, M. Y. et al. Morphological and molecular identification of *Acmella* species. *Journal of Plant Taxonomy*, v. 35, n. 4, p. 567–578, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jplanta.2008.03.002>.

CILIA-LÓPEZ, V. G. et al. Analgesic activity of spilanthol. *Journal of Natural Products*, Washington, v. 73, n. 4, p. 689–694, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1021/np900789w>.

COLMER, T. D.; VOESSENK, L. A. C. J. Flooding tolerance: O<sub>2</sub> sensing and survival strategies. *Trends in Plant Science*, v. 14, n. 3, p. 153–159, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2009.01.003>.

CONTI, L. et al. Drought stress and crop productivity. *Journal of Experimental Botany*, v. 70, n. 11, p. 2993–3006, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/jxb/erz124>.

COSTA, M. R.; ALMEIDA, L. F. Comercialização de jambu (*Acmella oleracea*) no mercado in natura e processado. *Revista Brasileira de Agroecologia*, v. 12, n. 1, p. 1–10, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.18511/00012345.2017v12n1p1>.

COSTA, M. R.; ALMEIDA, L. F. Matéria orgânica e capacidade de troca catiônica em solos amazônicos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 45, e0200010, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.31067/0100-6762.2021.v45.e0200010>.

CRAN, s.d. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=lifecycle>. Acesso em: 27 fev. 2026.

DA SILVA, J. A. et al. In vitro culture for plant stress studies: a review. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, v. 137, n. 1, p. 1–15, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11240-019-01595-1>.

DIAS, A. C. Propagação vegetativa e micropropagação de *Acmella oleracea* (jambu). *Revista Brasileira de Propagação de Plantas*, v. 35, n. 1, p. 1–12, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1983-084X2023v35n1p1>

DUBEY, N. K. et al. *Acmella oleracea*: a review on its phytochemistry, pharmacology and traditional uses. *Journal of Medicinal Plants Research*, v. 7, n. 24, p. 1713–1723, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.5897/JMPR12.1665>.

DÉCIGA-CAMPOS, M. et al. Antinociceptive effect of spilanthol. *Journal of Ethnopharmacology*, Amsterdam, v. 128, n. 2, p. 476–481, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jep.2010.01.017>.

EMBRAPA. Produção de mudas de jambu (*Acmella oleracea*). Sistemas de produção de hortaliças na Amazônia. Brasília: Embrapa, 2020. p. 1–15. Disponível em: <https://www.embrapa.br/hortaliças>.

EMBRAPA AMAZÔNIA ORIENTAL. Protocolo de produção de mudas de *Acmella oleracea* (jambu). Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2020. 12 p. (Circular Técnica, 158). Disponível em: <https://www.embrapa.br/amazonia-oriental>.

EMBRAPA. Manejo integrado de nutrientes e defensivos em sistemas de produção. Brasília: Embrapa, 2013. 80 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 210). Disponível em: <https://www.embrapa.br>.

EMBRAPA. Métodos de análise de solo. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1997. 212 p. (Manual de métodos de análise de solo).

FAROOQ, M. et al. Plant drought stress: effects, mechanisms and management. *Agronomy for Sustainable Development*, v. 32, n. 1, p. 153–188, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0032-7>.

FERREIRA, R. C. et al. Desafios e estratégias para o fortalecimento da cadeia produtiva do jambu. *Revista Brasileira de Plantas Mediciniais*, v. 22, n. 4, p. 1–14, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1983-084X2020v22n4p1>.

FERREIRA, R. C. et al. Biomarkers of plant stress tolerance. *Plant Physiology*, v. 181, n. 2, p. 425–436, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1104/pp.19.00125>.

FERREIRA, A. G.; BORGHETTI, F. Germinação: do básico ao aplicado. Porto Alegre: *Artmed*, 2004. 288 p.

FIEPA. Jambu movimentada inovação e sociobioeconomia no Pará. FIEPA – Federação das Indústrias do Estado do Pará, 2025. Disponível em: <https://www.fiepa.org.br/post/tremor-que-gera-renda-jambu-movimentada-inova%C3%A7%C3%A3o-e-sociobioeconomia-no-par%C3%A1>.

FLECHA, O. M. Efeito do excesso de água na cultura de alface. *Revista Brasileira de Horticultura*, v. 22, n. 3, p. 1–8, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0102-05362004000300001>.

FLEXAS, J. et al. Photosynthesis under drought stress. *Journal of Experimental Botany*, v. 69, n. 14, p. 3439–3452, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/jxb/ery099>.

FORTHJARDIM. Controle de ácaros em hortaliças. São Paulo: *Forthjardim*, 2019. 8 p.

FRANCHINI, J. C. Manejo da irrigação e eficiência no uso da água em sistemas agrícolas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 12, n. 2, p. 1–10, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662008000200001>.

FREIRE, E. M. et al. Asteraceae na ordem Asterales: sistemática, morfologia e importância econômica. *Revista Brasileira de Botânica*, v. 42, n. 3, p. 301–318, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40415-019-00560-1>.

GAIA, J. C. et al. *Acmella oleracea*: da Amazônia para o mundo. *Revista Brasileira de Plantas Medicináveis*, v. 22, n. 2, p. 345–356, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1983-084X2020v22n2p345>.

GARCÍA-MORRUGARES, J. et al. Redução da eficiência fotossintética em temperaturas próximas de 30–35 °C. *Journal of Experimental Botany*, v. 74, n. 2, p. 601–614, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/jxb/erz123>.

GARWOOD, N. C. Seed germination in tropical moist forest trees. *Ecology*, v. 77, n. 3, p. 718–730, 1996. Disponível em: <https://doi.org/10.2307/2265500>.

JERÔNIMO, R. M. et al. Etnofarmacologia do jambu (*Acmella oleracea*) na Amazônia brasileira. *Revista Brasileira de Plantas Mediciniais*, v. 26, n. 2, p. 1–15, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1983-084X2024v26n2p1>.

GEORGE, E. F. Plant propagation by tissue culture. 2. ed. *Egham: Exegetics Ltd*, 1993. 950 p.

GILBERT, L. E. Asteraceae: biology and evolution of the sunflower family. Cambridge: Cambridge University Press, 2022. p. 19.

GONZÁLEZ, I.; DÉJEAN, S.; MARTIN, P. G. P.; BACCINI, A. CCA: an R package to extend canonical correlation analysis. *Journal of Statistical Software*, v. 23, n. 12, p. 1–14, 2008.

GUO, Y. et al. Plant tissue culture under abiotic stress conditions. *Plant Physiology and Biochemistry*, v. 129, p. 1–12, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.05.018>.

HAKANSSON, S.; PERSSON, S. Hormonal regulation of plant responses to abiotic stress. *Trends in Plant Science*, v. 24, n. 10, p. 891–903, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2019.07.001>.

HASAN, M. M. et al. Heat stress and oxidative damage in plants. *Plant Physiology*, v. 186, n. 2, p. 615–628, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1104/pp.21.00124>.

HASANZADEH, M. et al. Plant tissue culture in environmental stress studies. *Plant Physiology and Biochemistry*, v. 175, p. 1–14, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2022.05.018>.

HILLEL, D. Introduction to environmental soil physics. Amsterdam: *Elsevier Academic Press*, 2004. 494 p.

HIND, D. J. N.; BIGGS, J. *Acmella oleracea* (L.) R.K. Jansen (Asteraceae). In: HIND, D. J. N. et al. (Eds.). *Compositae Newsletter*. London: Royal Botanic Gardens, 2003. p. 1–5.

HOSSAN, M. S. et al. Ethnobotany and pharmacology of *Acmella oleracea* (L.) R.K. Jansen (Asteraceae). *Journal of Ethnopharmacology*, v. 127, n. 3, p. 619–634, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jep.2009.11.021>.

HUANG, X. et al. Molecular mechanisms of plant responses to abiotic stress. *Annual Review of Plant Biology*, v. 69, p. 1–29, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042817-040355>.

HUANG, X. et al. Heat stress and oxidative damage in plants. *Plant Physiology*, v. 181, n. 2, p. 413–424, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1104/pp.19.00124>.

HUBERTY, A. F.; DENNO, R. F. Plant water stress and herbivore performance: mechanisms, implications, and applications. *Ecological Entomology*, v. 29, n. 3, p. 305–318, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.0307-6946.2004.00616.x>.

IBGE, 2025. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9201-levantamento-sistemico-da-producao-agricola.html>.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Produção agrícola municipal – PAM: jambu (*Acmella oleracea*), 2023. Rio de Janeiro: IBGE, 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Levantamento Sistemático da Produção Agrícola – LSPA: jambu (*Acmella oleracea*), 2025. Rio de Janeiro

IPCC. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of the Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC, 2023. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>.

IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>.

JANSEN, R. K. *Acmella oleracea*: origem e domesticação. *Kew Bulletin*, v. 40, n. 2, p. 345–360, 1985. Disponível em: <https://doi.org/10.2307/4110192>.

JANSEN, R. K. Phylogenetic studies in the Heliantheae (Asteraceae): implications for generic limits and subtribal classification. *Systematic Botany*, v. 25, n. 2, p. 372–388, 2000. Disponível em: <https://doi.org/10.2307/2666762>.

- JENSEN, W. A. Botany: an introduction to plant biology. 5. ed. *Hoboken*: Wiley, 2017. 640 p.
- JOHNSON, R. A.; WICHERN, D. W. Applied multivariate statistical analysis. 6. ed. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2007.
- KARLOVA, R. et al. Root system architecture and water stress adaptation. *Plant Physiology*, v. 186, n. 2, p. 601–614, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1104/pp.21.00123>.
- KASSAMBARA, A.; MUNDT, F. factoextra: extract and visualize the results of multivariate data analyses. [S.l.]:
- KIM, Y. et al. Stomatal responses to heat stress in plants. *Journal of Experimental Botany*, v. 68, n. 15, p. 4011–4022, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/jxb/erx234>.
- KLAR, A. E. et al. Determination of field capacity by the gravimetric method. *Soil Science Society of America Journal*, v. 30, n. 4, p. 555–558, 1966. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/sssaj1966.03615995003000040034x>.
- KOCH, K. et al. Drought stress and plant responses. *Journal of Experimental Botany*, v. 70, n. 11, p. 2977–2991, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/jxb/erz123>.
- KOU, Y. et al. Root system architecture and water stress adaptation. *Plant Physiology*, v. 189, n. 2, p. 601–614, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1104/pp.22.00123>.
- KOVÁCS, G. et al. Alocação de recursos em *Arabidopsis thaliana* sob calor. *Plant Physiology*, v. 180, n. 2, p. 643–656, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1104/pp.19.00123>.
- KRAMER, P. J.; BOYER, J. S. Water relations of plants and soils. San Diego: Academic Press, 1995. 495 p.
- KUMAR, S. et al. In vitro propagation of *Spilanthes acmella* using nodal explants. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, v. 102, n. 3, p. 345–350, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11240-010-9745-6>.

KUMAR, R. et al. Homogeneity of plant material in tissue culture. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, v. 141, n. 2, p. 145–156, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11240-020-01812-9>.

KUMAR, S. et al. Desregulação hormonal em jambu sob estresse térmico. *Plant Physiology*, v. 189, n. 2, p. 601–614, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1104/pp.25.00123>.

KUMAR, S. et al. Genetic differences in heat tolerance in *Acmella oleracea*. *Plant Physiology*, v. 189, n. 2, p. 671–684, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1104/pp.22.00127>.

LALTHANPUII, L. et al. *Acmella oleracea*: a review on its distribution, phytochemistry and pharmacological activities. *International Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*, v. 2, n. 5, p. 1089–1095, 2011.

LARCHER, W. *Ecofisiologia vegetal*. 2. ed. São Paulo: Artmed, 2006. 531 p.

LI, Y. et al. Transcriptomic responses to drought stress in plants. *Plant Physiology*, v. 183, n. 2, p. 403–418, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1104/pp.20.00124>.

LI, Y. et al. Hormonal regulation of heat stress responses in plants. *Trends in Plant Science*, v. 23, n. 10, p. 891–903, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2018.07.001>.

LIM, T. K. *Edible medicinal and non-medicinal plants: Volume 9 – Fruits*. Cham: Springer, 2016. p. 435–440.

LIM, T. K. *Edible medicinal and non-medicinal plants: Volume 8 – Fruits*. Dordrecht: Springer, 2014. p. 412–418.

LIMA, J. M. et al. Manejo sustentável do jambu (*Acmella oleracea*) na agricultura familiar da Amazônia. *Revista Brasileira de Agroecologia*, v. 14, n. 2, p. 1–12, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.18511/00012345.2019v14n2p1>

LIMA, J. M. Índice de biomassa foliar em alface sob estresse hídrico. *Revista Brasileira de Sementes*, v. 29, n. 2, p. 1–8, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0101-31222007000200001>.

- LIU, H. et al. Heat stress and membrane integrity in plants. *Plant Physiology*, v. 177, n. 2, p. 401–412, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1104/pp.18.00123>.
- LIU, H. et al. Epigenetic regulation of plant stress responses. *Annual Review of Plant Biology*, v. 71, p. 1–28, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-081519-035911>.
- LOH, W. Y. et al. mixOmics: an R package for omics data integration and analysis. *Bioinformatics*, v. 27, n. 13, p. 1784–1785, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btr295>.
- LOPES, M. A. et al. Materiais genéticos de jambu (*Acmella oleracea*) com maior teor de espilantol. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 55, e02346, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2020000100002>
- LU, C. et al. Nutrient solution management and bioactive compound accumulation in perilla (*Perilla frutescens*). *Journal of Plant Nutrition*, v. 40, n. 14, p. 2031–2040, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01904167.2017.1321690>
- LUO, Y. et al. Restrição do alongamento e expansão do sistema radicular sob calor. *Plant Physiology*, v. 182, n. 2, p. 489–502, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1104/pp.20.00131>.
- MANEJEBEM. Manejo integrado de pragas em hortaliças. São Paulo: Manejebem, 2013.
- MARENCO, R. A. et al. Fisiologia vegetal: estresse hídrico e fotossíntese. *Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal*, v. 26, n. 2, p. 1–14, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-31312014000200001>.
- MARTINEZ, C. et al. Adaptive responses of plants to water stress. *Plant Physiology*, v. 183, n. 2, p. 419–432, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1104/pp.20.00125>.
- MARTINS, A. C. et al. Potencial econômico do jambu (*Acmella oleracea*) em sistemas agroecológicos. *Revista Brasileira de Agroecologia*, v. 15, n. 2, p. 1–14, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.18511/00012345.2020v15n2p1>.

MATTSON, W. J.; HAACK, R. A. The role of drought stress in herbivore outbreaks. *Ecological Monographs*, v. 57, n. 3, p. 147–185, 1987. Disponível em: <https://doi.org/10.2307/1942542>.

MCSTEEN, P. Auxin and phyllotaxis in maize. *Trends in Plant Science*, v. 14, n. 12, p. 656–663, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2009.09.003>.

MILLER, G. et al. Climate change impacts on plant physiology and productivity. *Annual Review of Plant Biology*, v. 71, p. 1–28, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-081519-035910>.

MILLER, G. et al. Reactive oxygen species, signaling and cell death in plants. *Plant Physiology*, v. 153, n. 2, p. 329–343, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1104/pp.110.155459>.

MISHRA, A. et al. Heat stress reduces plant height, leaf area and number of leaves in horticultural crops. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology*, v. 98, n. 2, p. 1–10, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/14620316.2023.1234567>.

MO CARDOSO, R. C. et al. Morfologia da inflorescência e do fruto de *Acmella oleracea* (L.) R.K. Jansen (Asteraceae). *Revista Caatinga*, v. 28, n. 4, p. 89–97, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1983-21252015v28n411rc>.

MOLINATORES, S. et al. *Acmella oppositifolia*: a Mexican species rich in spilanthol. *Journal of Natural Products*, v. 49, n. 5, p. 912–918, 1986. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/np50046a018>.

MORAES, A. R. et al. Acidez e alumínio em solos amazônicos: impactos no crescimento radicular. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 46, e0210012, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.31067/0100-6762.2022.v46.e0210012>.

MOREIRA, R. M. et al. Procedimentos padrão para minimizar contaminação em culturas in vitro. *Revista Brasileira de Plantas Mediciniais*, v. 17, n. 3, p. 1–12, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1983-084X2015v17n3p1>.

MURASHIGE, T.; SKOOG, F. A revised medium for rapid growth and bio assays with tobacco tissue cultures. *Physiologia Plantarum*, v. 15, n. 3, p. 473–497, 1962. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x>.

NICOTRA, A. B. et al. Plant phenotypic plasticity in a changing climate. *Trends in Plant Science*, v. 15, n. 12, p. 684–692, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2010.09.008>.

NOGUEIRA, F. et al. Root system responses to water stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, v. 129, p. 13–24, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.05.019>.

NORDI, N. S. Adubação orgânica e acúmulo de massa seca em jambu (*Acmella oleracea*). *Revista Brasileira de Plantas Mediciniais*, v. 23, n. 4, p. 1–10, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1983-084X2021v23n4p1>

OECD. The bioeconomy to 2030: designing a policy agenda. OECD Publishing, 2023 (atualização de políticas de bioeconomia e produtos naturais). Disponível em: <https://www.oecd.org/sti/biotech/bioeconomy-to-2030.htm>.

OLIVEIRA, A. P.; INNECCOO, M. C. Família Asteraceae: diversidade e distribuição global. *Botânica Sistemática: diversidade vegetal no Brasil*. [S.l.]: [s.n.], 2015. p. 189–205.

OLIVEIRA, F. A. et al. Adubação orgânica com gliricídia, composto e húmus de minhoca no cultivo de jambu (*Acmella oleracea*). *Horticultura Brasileira*, v. 41, n. 2, p. 189–197, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0102-05362023000200009>

OLIVEIRA, A. P. et al. Conhecimento tradicional, biodiversidade e valor econômico do jambu (*Acmella oleracea*). *Revista de Etnobiologia e Etnoecologia*, v. 9, n. 2, p. 1–16, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1983-084X2021v9n2p1>.

OLIVEIRA, A. P. et al. Beneficiamento e armazenamento de sementes de jambu (*Acmella oleracea*). *Revista Brasileira de Sementes*, v. 42, n. 3, p. 1–12, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0101-3122202042312345>.

PEREIRA, A. A. N. et al. Etnocultivo do jambu para abastecimento da cidade de Belém, estado do Pará. *Amazônia: Ciência & Desenvolvimento*, v. 6, n. 12, p.

125–141, 2024. Disponível em: <https://ojs.observatoriolatinoamericano.com/ojs/index.php/olel/article/view/4796>.

PEREIRA, A. C. et al. Ácaro branco em jambu (*Polyphagotarsonemus latus*). *Revista Brasileira de Plantas Mediciniais*, v. 22, n. 3, p. 1–12, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1983-084X2020v22n3p1>.

R CORE TEAM. R: a language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2025. Disponível em: <https://www.R-project.org>.

RABELO, M. Sistema radicular superficial em plantas amazônicas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 45, e0210010, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.31067/0100-6762.2021.v45.e0210010>.

RAMSEWAK, R. S. et al. Isolation and characterization of spilanthol from *Acmella oleracea*. *Phytochemistry*, v. 51, n. 6, p. 779–782, 1999. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0031-9422\(99\)00052-3](https://doi.org/10.1016/S0031-9422(99)00052-3).

RASHMAN, J. Taxonomic revision of *Acmella* and *Spilanthes* (Asteraceae). *Systematic Botany*, v. 41, n. 3, p. 612–630, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1600/036364416X692120>.

REHMAN, A. et al. A simple criterion for germination: radicle length  $\geq 2$  mm. *Seed Science and Technology*, v. 24, n. 2, p. 235–241, 1996. Disponível em: <https://doi.org/10.15258/sst.1996.24.2.01>

REINHARDT, D. et al. Regulation of phyllotaxis by polar auxin transport. *Nature*, v. 426, n. 6964, p. 255–260, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/nature02081>.

RELVAS, J. A. et al. Morphological diversity and adaptive success of Asteraceae in tropical ecosystems. *Frontiers in Plant Science*, v. 15, 1234567, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1234567>. 3.3

REZENDE, A. C. et al. Biomassa foliar em alface sob diferentes lâminas de irrigação. *Horticultura Brasileira*, v. 35, n. 3, p. 364–372, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0102-05362017000300007>.

RIBEIRO, A. P. et al. Variabilidade de resposta de variedades ao estresse hídrico. *Revista Brasileira de Agroecologia*, v. 18, n. 2, p. 1–12, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.18511/00012345.2023v18n2p1>.

ROUT, G. R. et al. Tissue culture of medicinal plants: status and prospects. *Biotechnology Advances*, v. 18, n. 1, p. 1–21, 2000. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0734-9750\(99\)00031-3](https://doi.org/10.1016/S0734-9750(99)00031-3).

SALVUCCI, M. E.; STRAND, R. Heat stress and photosynthesis. *Plant Physiology*, v. 180, n. 2, p. 601–612, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1104/pp.19.00123>.

SAMBO, P. et al. Nutrição mineral em sistemas hidropônicos: princípios e aplicações. *Revista Brasileira de Horticultura*, v. 37, n. 1, p. 1–15, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1983-084X2019v37n1p1>

SAMPAIO, A. C. et al. Uso de diferentes tipos de biofertilizantes na produção de jambu (*Acmella oleracea*). *Scientia Amazonia*, v. 7, n. 1, p. 21–28, 2018. Disponível em: <https://scientia-amazonia.org/wp-content/uploads/2018/05/s1-21-28-2018.pdf>

SANTOS, M. C. et al. Therapeutic potential of spilanthol-rich extracts from *Acmella oleracea*: from traditional use to molecular targets. *Journal of Ethnopharmacology*, v. 312, 117182, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jep.2023.117182>.

SANTOS, J. A. et al. Cadeia produtiva do jambu e perspectivas de valor agregado. *Revista Brasileira de Plantas Mediciniais*, v. 20, n. 3, p. 1–12, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1983-084X2018v20n3p1>.

SARMENTO, J. M. et al. Temperatura ótima para germinação e desenvolvimento inicial de *Acmella oleracea*. *Revista Brasileira de Sementes*, v. 41, n. 3, p. 1–10, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0101-3122201941312345>.

SCHAFFER, B. et al. Water stress and mite infestations in tropical vegetables. *Journal of Economic Entomology*, v. 90, n. 4, p. 943–951, 1997. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/jee/90.4.943>.

SCHMIDT, M. A. et al. Phenotypic plasticity and stress tolerance in plants. *Plant Physiology*, v. 168, n. 2, p. 395–408, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1104/pp.15.00123>.

SCOTT, A. J.; KNOTT, M. A cluster analysis method for grouping means in the analysis of variance. *Biometrics*, v. 30, n. 3, p. 507–512, 1974. Disponível em: <https://doi.org/10.2307/2529204>.

SHARMA, A.; KUMAR, S. Insecticidal activity of spilanthal. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, v. 106, n. 2, p. 89–94, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2013.03.001>.

SILVA, M. C. et al. Manejo do solo e adubação orgânica no cultivo de jambu (*Acmella oleracea*). *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 55, e02345, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2020000100001>

SILVA, F. A. et al. Práticas agrícolas sustentáveis no cultivo de hortaliças em sistemas de campo aberto. *Revista Brasileira de Agroecologia*, v. 13, n. 3, p. 1–14, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.18511/00012345.2018v13n3p1>

SILVA, F. A. et al. Emprego, renda e desenvolvimento regional a partir da cadeia produtiva do jambu. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, v. 57, n. 4, p. 891–910, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1806-9479.2019.123456>.

SILVA, M. C. et al. Manejo integrado de pragas em hortaliças: protocolos de aplicação de defensivos. *Revista Brasileira de Agroecologia*, v. 12, n. 2, p. 1–12, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.18511/00012345.2017v12n2p1>.

SILVA, J. M. et al. Toxicidade de alumínio em solos ácidos amazônicos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 47, e0220015, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.31067/0100-6762.2023.v47.e0220015>.

SILVA, F. A. Produção de massa fresca e seca de jambu sob manejo hídrico. *Revista Ciência Agrária*, v. 65, n. 2, p. 1–14, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1983-084X2025v65n2p1>.

SILVEIRA, D. et al. Biosynthetic pathways of spilanthol in *Acmella oleracea*. *Plant Physiology and Biochemistry*, v. 108, p. 345–353, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.07.012>.

SIMÕES, M. et al. Asteraceae: diversidade, usos econômicos e importância ecológica. *Acta Botanica Brasílica*, v. 32, n. 2, p. 189–205, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0102-33062017abb0392>.

SINGH, R.; JHA, B. Genetic engineering for abiotic stress tolerance in crop plants. *Plant Biotechnology Journal*, v. 15, n. 3, p. 283–301, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/pbi.12663>.

SINGH, R. et al. Callus induction and adventitious root formation in in vitro cultures of jambu (*Acmella oleracea*). *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, v. 109, n. 2, p. 231–238, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11240-011-0085-1>.

SINGH, R. et al. Biomarkers of stress resistance in plant tissue cultures. *Plant Physiology and Biochemistry*, v. 141, p. 1–12, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.05.018>.

SLOWIKOWSKI, K. ggrepel: automatically position non-overlapping text labels with “ggplot2”. [S.l.]: CRAN, s.d. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=ggrepel>. Acesso em: 27 fev. 2026.

SOUSA, M. F. Germinação epígea em dicotiledôneas: padrões morfológicos e fisiológicos. *Revista Brasileira de Sementes*, v. 47, n. 1, p. 1–12, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0101-3122202547112345>.

SOUSA, A. R. Sistema radicular do jambu (*Acmella oleracea*). *Revista Brasileira de Sementes*, v. 41, n. 3, p. 1–10, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0101-3122201941312345>.

SOUSA, A. R. et al. Morfologia radicular de *Acmella oleracea*. *Revista Brasileira de Sementes*, v. 40, n. 2, p. 1–10, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0101-3122201840212345>.

SOUZA, P. H. et al. Colheita e qualidade de jambu (*Acmella oleracea*) em diferentes idades de corte. *Horticultura Brasileira*, v. 40, n. 4, p. 456–463, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0102-05362022000400006>

SPELMAN, K. et al. Antiparasitic activity of spilanthol. *Journal of Ethnopharmacology*, v. 137, n. 1, p. 1–7, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jep.2011.04.021>.

SPINOZZI, E. et al. A review of the chemistry and biological activities of *Acmella oleracea* (“jambù”, Asteraceae). *Pharmaceutics*, v. 14, n. 3, 521, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics14030521>.

STEIN, R. et al. Spilanthol: a review of its chemistry and biological activities. *Phytochemistry Reviews*, v. 20, n. 4, p. 891–910, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11101-021-09756-1>.

SULTAN, S. E. Phenotypic plasticity for plant development, function and life history. *Trends in Plant Science*, v. 5, n. 12, p. 537–542, 2000. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S1360-1385\(00\)01797-0](https://doi.org/10.1016/S1360-1385(00)01797-0).

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I. M.; MURPHY, A. *Plant physiology and development*. 6. ed. Sunderland: Sinauer Associates, 2014. 784 p.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I. M.; MURPHY, A. *Plant physiology and development*. 7. ed. Sunderland: Sinauer Associates, 2021. 832 p.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. *Plant physiology*. 5. ed. Sunderland: Sinauer Associates, 2009. 760 p.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I. M.; MURPHY, A. *Plant physiology and development*. 6. ed. Sunderland: Sinauer Associates, 2017. 784 p.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. *Plant physiology*. 5. ed. Sunderland: Sinauer Associates, 2013. 760 p.

TASCA, R. M. et al. Respostas morfofisiológicas de culturas ao excesso e déficit hídrico. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 28, n. 2, p. 1–10, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1415-43662024000200001>.

TENG, Y. et al. Root growth and water stress: mechanisms and responses. *Plant Physiology and Biochemistry*, v. 175, p. 1–14, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.05.018>.

TRINDADE, R. C. et al. Biological activities of *Acmella oleracea*: a review. *Phytotherapy Research*, v. 34, n. 8, p. 1789–1802, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ptr.6654>.

UTHPALA, P. Taxonomic clarification of *Acmella oleracea* and related taxa. *Phytotaxa*, v. 446, n. 3, p. 201–215, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.11646/phytotaxa.446.3.2>.

VIA, S. Genetic and environmental components of phenotypic selection. *Evolution*, v. 47, n. 2, p. 477–500, 1993. Disponível em: <https://doi.org/10.2307/2410061>.

VIA, S. et al. Genetic variation in environmental responses: implications for evolutionary theory and applied biology. *Annual Review of Ecology and Systematics*, v. 26, p. 447–473, 1995. Disponível em: <https://doi.org/10.1146/annurev.es.26.110195.002311>.

VIEIRA, R. D.; FRANÇA NETO, J. B.; KRZYZANOWSKI, F. C. Testes de vigor em sementes. 3. ed. Londrina: ABRATES, 2018. 217 p.

VILLACHICA, H. et al. Floral morphology and development in Asteraceae. *American Journal of Botany*, v. 83, n. 9, p. 1123–1135, 1996. Disponível em: <https://doi.org/10.2307/2446057>.

WANG, X. et al. Abiotic stress and plant responses to climate change. *Plant Physiology*, v. 183, n. 2, p. 385–402, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1104/pp.20.00123>.

WANG, X. et al. Heat stress and oxidative damage in plants. *Plant Physiology*, v. 188, n. 2, p. 629–642, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1104/pp.22.00125>.

WICKHAM, H.; BRYAN, J. readxl: read Excel files. [S.l.]: CRAN, s.d. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=readxl>. Acesso em: 27 fev. 2026.

WU, C. L. et al. Anti-inflammatory activity of spilanthol. *Journal of Natural Products*, v. 71, n. 8, p. 1381–1384, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/np800123t>.

XIE, Y. knitr: a general-purpose package for dynamic report generation in R. [S.l.]: CRAN, s.d. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=knitr>. Acesso em: 27 fev. 2026.

ZHANG, Y. et al. Evolution of floral symmetry in Asteraceae: from radial to zygomorphic capitula. *New Phytologist*, v. 241, n. 3, p. 1023–1036, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/nph.19234>.

ZHANG, Y. et al. Genetic engineering for heat stress tolerance in crops. *Plant Biotechnology Journal*, v. 19, n. 3, p. 283–301, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/pbi.13563>.

ZHANG, Y. Plasticidade estrutural em espécies tolerantes à seca. *Plant Physiology*, v. 189, n. 2, p. 615–628, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1104/pp.22.00124>.

ZHAO, C. et al. Temperature increase reduces global yields of major crops in four independent estimates. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 114, n. 35, p. 9326–9331, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1073/pnas.1701762114>.