MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA E BIODIVERSIDADE

BIOTECNOLOGIA, SILVICULTURA E IMPORTÂNCIA SOCIOECONÔMICA DO UMBUZEIRO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

AUGUSTO VINICIUS DE SOUZA NASCIMENTO

2026

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA E BIODIVERSIDADE

AUGUSTO VINICIUS DE SOUZA NASCIMENTO

BIOTECNOLOGIA, SILVICULTURA E IMPORTÂNCIA SOCIOECONÔMICA DO UMBUZEIRO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

Tese apresentada à Universidade Federal de Sergipe, como parte das exigências do Curso de Doutorado em Agricultura e Biodiversidade, área de concentração em Agricultura e Biodiversidade, para obtenção do título de "Doutor em Ciências".

Orientadora
Profa. Dra. Ana da Silva Lédo
Coorientador
Prof. Dr. Paulo Augusto Almeida Santos

SÃO CRISTÓVÃO
SERGIPE – BRASIL
2026

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE

N244b

Nascimento, Augusto Vinícius de Souza.
Biotecnologia, silvicultura e importância socioeconômica do umbuzeiro no semiárido brasileiro / Augusto Vinícius de Souza Nascimento; orientadora Ana da Silva Lédo. – São Cristóvão, SE, 2026.
184 f.; il.

Tese (doutorado em Agricultura e Biodiversidade) – Universidade Federal de Sergipe, 2026.

1. Agrobiodiversidade. 2. Umbuzeiro. 3. Caatinga. 4. Economia regional. 5. Renda. 6. Biotecnologia agrícola. 7. Umbuzeiro - Mudas. I. Lédo, Ana da Silva, orient. II. Título.

CDU 634.442

AUGUSTO VINICIUS DE SOUZA NASCIMENTO

BIOTECNOLOGIA, SILVICULTURA E IMPORTÂNCIA SOCIOECONÔMICA DO UMBUZEIRO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

Tese apresentada à Universidade Federal de Sergipe, como parte das exigências do Curso de Doutorado em Agricultura e Biodiversidade, área de concentração em Agricultura e Biodiversidade, para obtenção do título de "Doutor em Ciências".

APROVADA em 30 de julho de 2026.

Dra. Ane Marcela das Chagas Mendonça	(IFS)
Dra. Caroline de Araujo Machado Brandão	(SEMED)
Dra. Itamara Bomfim Gois	(PPGAGRI-UFS)
Dr. Paulo Augusto Almeida Santos	(DBI-UFS)

gov.br
Documento assinado digitalmente
ANA DA SILVA LEDO
Data: 29/09/2026 12:10:31-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Profa. Dra. Ana da Silva Lédo
(Orientadora)

SÃO CRISTÓVÃO
SERGIPE – BRASIL

À minha família, em especial aos meus pais,
irmãos, esposa e filha, pelo amor, apoio e
incentivo constantes ao longo
dessa caminhada.
Dedico

AGRADECIMENTOS

A Deus, primeiramente, por me conceder força, sabedoria e perseverança ao longo desta caminhada.

À minha família, minha base e meu maior apoio. À minha mãe, Iracema, por dedicar sua vida à realização dos nossos sonhos, meus e dos meus irmãos, sempre com amor, cuidado e carinho. Ao meu pai, Sulo, por todo apoio, incentivo e presença constante. Aos meus irmãos, Vitor e Clésio, pelo companheirismo, apoio e ajuda nas coletas de frutos, contribuindo também para a realização deste trabalho.

À minha tia Denise e a Walter, por terem aberto as portas de sua casa para mim logo no início da graduação, oferecendo acolhimento e apoio em um momento tão importante da minha trajetória.

À minha esposa, Edicarla, por todo amor, companheirismo, paciência e ajuda em todos os momentos. À minha filha, Açucena, que chegou na reta final desta tese para abrilhantar minha vida, renovar minhas forças e me transformar em uma pessoa melhor.

À minha orientadora, professora Dra. Ana Lédo, por todo apoio, confiança, orientação e por ter aberto as portas do LABCULT para mim, contribuindo de forma essencial para minha formação acadêmica e profissional.

Ao professor Dr. Paulo Augusto, por ter me acompanhado em mais esta etapa da minha formação, pelo apoio, incentivo e contribuições ao longo desta caminhada.

Às professoras Ane Marcela, Ana Veruska, Itamara Bonfim, Caroline Araújo e Valdinete Vieira, pelo apoio, pelas contribuições na qualificação, na defesa ou nas disciplinas do PPGAGRI, que foram importantes para o aprimoramento deste trabalho e para minha formação.

A Inácio Roque, técnico do LABCULT da Embrapa, por todo apoio, disponibilidade e colaboração durante a realização das atividades.

Ao técnico João dos Santos, da UFS, por toda ajuda, amizade e companheirismo que me acompanham desde a graduação, além das muitas histórias, ensinamentos e experiências compartilhadas ao longo dos anos.

Ao amigo James Cardoso, do Monumento Natural Grota do Angico, por todo apoio durante as coletas de frutos de umbuzeiro. Da mesma forma, agradeço ao meu tio Luciano Souza pela colaboração nas coletas de frutos, contribuindo diretamente para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos amigos que contribuíram de alguma forma para a realização desta tese, em especial a Gilmara, por todo apoio de sempre.

Aos amigos do Laboratório de Fisiologia Vegetal da UFS, Eduarda e Mariana, e, de modo especial, a Graziela Andrade, Mara Lúcia e Maria Thayná, por toda ajuda na condução dos experimentos e na tabulação dos dados.

Aos amigos da minha turma de doutorado e do PPGAGRI, pelo apoio, parceria e convivência, principalmente nos primeiros anos desta caminhada.

Agradeço à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Nível Superior) pela concessão da bolsa de pesquisa (código de financiamento 001).

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho e fizeram parte desta importante etapa da minha vida.

BIOGRAFIA

Augusto Vinicius de Souza Nascimento é biólogo, formado pela Universidade Federal de Sergipe (UFS) em 2018, mestre em Desenvolvimento e Meio Ambiente pelo Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente da UFS (PRODEMA/UFS), título obtido em 2022, e doutorando em Agricultura e Biodiversidade pelo Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Biodiversidade da UFS (PPGAGRI/UFS).

Ao longo de sua trajetória acadêmica, desenvolveu pesquisas relacionadas à flora da Caatinga, com ênfase em espécies nativas de importância ecológica, socioeconômica e ambiental. Durante a graduação, atuou em estudos sobre germinação e micropropagação da aroeira-do-sertão (*Astronium urundeuva* Allemão). No mestrado, dedicou-se à produção de mudas de espécies nativas da Caatinga, avaliando o uso de substratos alternativos formulados com diferentes fontes de esterco animal.

No doutorado, concentrou suas pesquisas no umbuzeiro (*Spondias tuberosa* Arruda), espécie frutífera nativa do semiárido brasileiro, investigando aspectos relacionados à propagação, germinação, produção de mudas, cultivo *in vitro*, uso de reguladores vegetais, seleção de matrizes e estratégias biotecnológicas e silviculturais voltadas à conservação e ao uso sustentável da espécie.

Suas áreas de interesse incluem tecnologia de sementes, produção de mudas, propagação vegetal, cultura de tecidos vegetais, fisiologia vegetal, conservação de germoplasma e estudos florísticos e fitossociológicos. Sua trajetória acadêmica é marcada pelo interesse na valorização da biodiversidade da Caatinga e na geração de conhecimentos aplicados à conservação, propagação e uso sustentável de espécies nativas do semiárido brasileiro.

SUMÁRIO

Página
LISTA DE FIGURAS i
LISTA DE TABELAS v
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS vii
RESUMO viii
ABSTRACT ix
1. INTRODUÇÃO GERAL 1
2. REVISÃO DE LITERATURA 2
2.1 O semiárido brasileiro e a Caatinga 2
2.2 Aspectos gerais sobre o umbuzeiro 3
2.3 Conservação, domesticação e seleção de matrizes 6
2.4 Propagação sexuada, unidade de dispersão e dormência 6
2.5 Variação entre matrizes, biometria e crescimento inicial 7
2.6 Produção de mudas, nutrição mineral e manejo em viveiro 8
2.7 Cultura de tecidos vegetais e germinação *in vitro* 9
2.8 Micropropagação e desafios para espécies lenhosas nativas 10
3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 12
4. ARTIGO 1 26
DIVERSIDADE, USOS TRADICIONAIS E IMPORTÂNCIA SOCIOECONÔMICA DA FAMÍLIA ANACARDIACEAE PARA O SEMIÁRIDO BRASILEIRO 26
RESUMO 26
4.1. Introdução 26
4.2. Métodos 27
4.3. Resultados e Discussão 28
4.4. Conclusões 42
4.5. Referências Bibliográficas 43
5. ARTIGO 2 59
THE PROPAGATION OF UMBUZEIRO (*Spondias tuberosa* Arruda), A NATIVE FRUIT TREE OF GROWING IMPORTANCE FOR THE BRAZILIAN SEMI-ARID REGION 59
ABSTRACT 59
5.1. Introduction 59
5.2. Methods 61
5.3. Results and Discussion 62
5.4. Conclusions and future perspectives 74
5.5. References 75
6. ARTIGO 3 84
DA UNIDADE DE DISPERSÃO À MUDA: VARIAÇÃO ENTRE PROCEDÊNCIAS E MATRIZES DE *Spondias tuberosa* Arruda NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO 84

RESUMO 84
6.1. Introdução 84
6.2. Material e Métodos 85
6.3. Resultados e Discussão 91
6.4. Conclusão 102
6.5. Referências Bibliográficas 103
7. ARTIGO 4 107
FERTILIZANTE DE LIBERAÇÃO CONTROLADA PROMOVE O CRESCIMENTO DAS MUDAS E O DESENVOLVIMENTO DO XILOPÓDIO DE UMBUZEIRO SOB DIFERENTES CONDIÇÕES DE LUMINOSIDADE 107
RESUMO 107
7.1. Introdução 107
7.2. Material e Métodos 108
7.3. Resultados e Discussão 111
7.4. Conclusão 122
7.5. Referências Bibliográficas 122
8. ARTIGO 5 129
FECHANDO O CICLO DE NUTRIENTES NA CULTURA DE TECIDOS VEGETAIS: REÚSO DE MEIO RESIDUAL COMO FONTE ALTERNATIVA DE NUTRIENTES PARA A PRODUÇÃO DE MUDAS DE *Spondias tuberosa* 129
RESUMO 129
8.1. Introdução 129
8.2. Material e Métodos 130
8.3. Resultados e Discussão 134
8.4. Conclusão 149
8.5. Referências Bibliográficas 150
9. ARTIGO 6 155
NEW METHOD FOR UMBU TREE (*Spondias tuberosa* Arruda) PROPAGATION VIA ENDOCARP REMOVAL AND *IN VITRO* SEED GERMINATION 155
ABSTRACT 155
9.1. Introduction 155
9.2. Materials and Methods 156
9.3. Results and Discussion 159
9.4. Conclusions 164
9.5. References 164
10. ARTIGO 7 168
ESTABELECIMENTO *IN VITRO* E RESPOSTAS MORFOGÊNICAS DE *Spondias tuberosa* Arruda SOB DIFERENTES CONDIÇÕES DE CULTIVO 168
RESUMO 168
10.1. Introdução 168

10.2. Material e Métodos 169
10.3. Resultados e Discussão 172
10.4. Conclusão 179
10.5. Referências Bibliográficas 180
11. CONSIDERAÇÕES FINAIS 184

LISTA DE FIGURAS

REVISÃO DE LITERATURA

Figura		Página
1	Distribuição espacial do bioma Caatinga e da delimitação do semiárido brasileiro.	2
2	Aspectos morfológicos e reprodutivos do umbuzeiro.	4
3	Registros de ocorrência de umbuzeiro no bioma Caatinga.	5

ARTIGO 1

Figura		Página
1	Fluxograma do processo metodológico.	28
2	Distribuição dos registros de ocorrência da família Anacardiaceae na região semiárida brasileira.	29
3	Número de registro por espécies da família Anacardiaceae no semiárido brasileiro. Fonte: *SpeciesLink*.	35
4	(A) aspecto geral de um indivíduo adulto de aroeira-do-sertão na época chuvosa, (B) e (C) aspecto geral de um indivíduo adulto na época seca em período de frutificação, (D) aspecto geral da folha, (E) aspecto geral do caule e (F) frutos/sementes com alas persistentes. Fonte: Augusto Nascimento.	36
5	(A) aspecto geral da planta adulta, (B) aspecto geral do caule, (C) aspecto geral das folhas, (D) inflorescência, (E) frutos e (F) sementes de baraúna. Fonte: Augusto Nascimento.	38
6	(A) Aspecto geral da planta adulta, (B) inflorescência e (C) frutos de umbuzeiro. Fonte: Augusto Nascimento.	40
7	(A) aspecto geral de uma planta adulta, (B) folhas simples e coriáceas, (C) fruto (castanha) e pseudofruto em destaque e (D) flores dispostas em panículas terminais do cajueiro. Fonte: Augusto Nascimento.	41

ARTIGO 2

Figura		Página
1	PRISMA 2020 flow diagram in this systematic review.	62
2	(A and B) Umbuzeiro in the rainy and dry seasons; (C) inflorescence; (D and E) green fruits attached to the plant, and ripe fruits; (F) xylopodium of the umbuzeiro.	63
3	Annual progression of published studies by research area on umbuzeiro propagation.	63
4	Trends in umbuzeiro research based on authors' keywords in studies on its propagation.	65
5	Detail of the fruit, dispersal unit, and seed of umbuzeiro.	66
6	Germination of umbuzeiro. Ra – radicle; en – endocarp; Hy – hypocotyl; Co – cotyledon; eo – eophyll; xy – xylopodium.	67
7	Xylopodia of umbuzeiro seedlings at 120 days old grown in different concentrations of animal manure. CM – Cattle manure; SM – Sheep manure.	70
8	Grafting process of umbuzeiro by top wedge grafting: (A) preparation of the rootstock with a cut in the stem; (B and C) preparation of the scion (wedge cut); (D) insertion of the scion into the rootstock slit; (E) tying with tape to secure the graft; (F) sealing with protective plastic.	73

ARTIGO 3

Figura Página
1 Localização das procedências geográficas de umbuzeiro avaliadas no estudo, com destaque para o estado de Sergipe, região Nordeste do Brasil, e para os municípios de Graccho Cardoso, Nossa Senhora da Glória e Poço Redondo. 86
2 Aspectos morfológicos de frutos, unidades de dispersão, emergência, plântula, muda e xilopódio de umbuzeiro. 91
3 Dotplot das características biométricas das unidades de dispersão de umbuzeiro provenientes de três procedências geográficas em Sergipe. 93
4 Biplot da análise de componentes principais das características biométricas das unidades de dispersão de umbuzeiro provenientes de 17 árvores matrizes. 95
5 Emergência acumulada de plântulas de umbuzeiro provenientes de diferentes árvores matrizes e procedências. A: GC-Graccho Cardoso; B: NSG-Nossa Senhora da Glória; C: PR-Poço Redondo. As curvas representam a média acumulada de emergência ao longo de 60 dias após a semeadura. 96
6 Teor de água das unidades de dispersão (A) e emergência de plântulas (B) de umbuzeiro em função de diferentes matrizes e procedências geográficas. 98
7 Crescimento em altura (A), diâmetro do caule (B) e número de folhas (C) de mudas de umbuzeiro oriundas de diferentes matrizes e procedências geográficas, avaliadas aos 30, 60 e 90 dias após o transplantio. GC = Graccho Cardoso; NSG = Nossa Senhora da Glória; PR = Poço Redondo. 100
8 Biplot da análise de componentes principais integrada das características biométricas, de emergência e de crescimento de nove árvores matrizes de umbuzeiro. 102

ARTIGO 4

Figura Página
1 Crescimento inicial de mudas de umbuzeiro em função de diferentes doses de fertilizante de liberação controlada (FLC) (0, 2, 4, 8 e 12 g L^{-1}), cultivadas em dois ambientes (pleno sol e sombrite) ao longo de 120 dias. Foram avaliadas a altura da planta (cm), o diâmetro do caule (mm) e o número de folhas aos 0, 30, 60, 90 e 120 dias após o transplantio. 111
2 Desenvolvimento morfológico de mudas de umbuzeiro cultivadas sob sombreamento e pleno sol, em resposta à aplicação de diferentes doses de FLC aos 120 dias. Barra de escala = 30 cm. 112
3 Altura da planta (A), diâmetro do caule (B) e número de folhas (C) de mudas submetidas a diferentes doses de fertilizante de liberação controlada (FLC) e cultivadas em dois ambientes (pleno sol e tela de sombreamento) aos 120 dias. 113
4 Massa fresca da parte aérea (A) e massa seca da parte aérea (B) de mudas submetidas a diferentes doses de fertilizante de liberação controlada (FLC) e cultivadas em dois ambientes (pleno sol e tela de sombreamento) aos 120 dias. 115
5 Massa fresca total (A) e massa seca total (B) de mudas de umbuzeiro submetidas a diferentes doses de fertilizante de liberação controlada (FLC) e cultivadas em dois ambientes (pleno sol e sombrite) aos 120 dias. 116
6 Massa fresca da raiz (g) e massa seca da raiz (g) de mudas de umbuzeiro submetidas a diferentes doses de fertilizante de liberação controlada (FLC) e cultivadas em dois ambientes (pleno sol e sombrite) aos 120 dias. 117
7 Comprimento do xilopódio (cm) e diâmetro do xilopódio (mm) de mudas de umbuzeiro submetidas a diferentes doses de fertilizante de liberação controlada (FLC) e cultivadas em dois ambientes (pleno sol e sombrite) aos 120 dias. 118
8 Variação morfológica dos xilopódios de mudas de umbuzeiro cultivadas sob sombreamento e pleno sol, em resposta à aplicação de diferentes doses de FLC aos 120 dias de experimento. Barra de escala = 6 cm. 119

9 Relação massa seca da parte aérea/raiz (MSPA/MSR) (A) e Índice de Qualidade de Dickson (IQD) (B) de mudas de umbuzeiro submetidas a diferentes doses de fertilizante de liberação controlada (FLC) e cultivadas em dois ambientes (pleno sol e sombrite) aos 120 dias. 120

ARTIGO 5

Figura Página

1 Altura (cm), diâmetro do caule (mm) e número de folhas de mudas de umbuzeiro submetidas a diferentes frequências de aplicação de resíduo de meio de cultura (0, 7, 14, 21 e 28 dias) aos 30, 60 e 90 dias após o transplantio. 135
2 Altura (A), diâmetro do caule (B), número de folhas (C) e área foliar (D) de mudas submetidas a diferentes frequências de aplicação de resíduo de meio de cultura de tecidos vegetais via solo. 137
3 Aspecto visual das mudas e do sistema radicular de umbuzeiro em função da frequência de aplicação do resíduo de meio de cultura. 138
4 Massa seca da parte aérea (A), massa seca da raiz (B) e massa seca total (C) de mudas submetidas a diferentes frequências de aplicação de resíduo de meio de cultura de tecidos vegetais via solo. 140
5 Comprimento do xilopódio (A) e relação H/D de mudas de umbuzeiro submetidas a diferentes frequências de aplicação de resíduo de meio de cultura de tecidos vegetais via solo. 141
6 Nitrogênio (A), fósforo (B), potássio (C) e magnésio (D) de mudas de umbuzeiro submetidas a diferentes frequências de aplicação de resíduo de meio de cultura de tecidos vegetais via solo. 144
7 Sódio (A), cálcio (B) e enxofre (C) de mudas de umbuzeiro submetidas a diferentes frequências de aplicação de resíduo de meio de cultura de tecidos vegetais via solo. 146
8 Cobre (A), manganês (B) e zinco (C) de mudas de umbuzeiro submetidas a diferentes frequências de aplicação de resíduo de meio de cultura de tecidos vegetais via solo. 148

ARTIGO 6

Figura Página

1 Seed extraction from the *Spondias tuberosa* endocarp. (A) Mature fruit; (B) dispersal unit in lateral view with the longitudinal axis positioned horizontally; (C) dispersal unit in lateral view with the longitudinal axis oriented vertically; (D) indication of the cutting site on the endocarp; (E) cut performed using a PVC pipe cutter; (F and G) longitudinal section of the dispersal unit; and (H) extracted seed. 157
2 *In vitro* germination of *Spondias tuberosa* seeds without the endocarp. (A) Seed inoculated under *in vitro* conditions; (B) cotyledon opening; (C) radicle emergence; (D) cotyledon chlorophyllization and root growth; and (E) normal seedling. SE – seed; CO – cotyledon opening; CC – cotyledon chlorophyllization; RA – radicle; HY – hypocotyl; EP – epicotyl; EO – eophyll (first pair of leaves). 159
3 (A) *Spondias tuberosa* dispersal units under *in vitro* conditions; (B) fungal contamination observed at 60 days. 160
4 *In vitro* germination of *Spondias tuberosa* seeds from mother plants M3-GC and M4-PR cultured on MS and WPM media. 162

ARTIGO 7

Figura Página
1 Germinação e formação de plantas normais de umbuzeiro cultivadas *in vitro* em meio WPM completo ou com metade da concentração de sais, na presença ou ausência de carvão ativado. 173
2 Germinação *in vitro* de sementes de umbuzeiro e desenvolvimento inicial de plântulas em diferentes condições de cultivo. 174
3 Senescência em plântulas de umbuzeiro cultivadas *in vitro*. 175
4 Plântula de umbuzeiro cultivada *in vitro* apresentando a formação de estrutura semelhante à inflorescência no tratamento contendo 880 mg L^{-1} de $CaCl_2 \cdot 2H_2O$. 176
5 Estabelecimento e desenvolvimento *in vitro* de explantes de umbuzeiro em meio de cultura. 177
6 Respostas morfogênicas de explantes apicais e nodais cotiledonares de umbuzeiro cultivados *in vitro* em meio WPM suplementado com 0 ou 2 mg L^{-1} de BAP. 178

LISTA DE TABELAS

ARTIGO 1

Tabela — Página

1 Lista de espécies da família Anacardiaceae com registros no semiárido brasileiro... 30
2 Espécies da família Anacardiaceae nativas do semiárido brasileiro, com respectivas partes utilizadas, principais usos registrados na literatura científica (M: medicinal; A: alimentar; Ma: madeireiro; O: outros)... 33
3 Produção de umbu no Brasil em 2024. Fonte: IBGE, 2023. ... 40
4 Produção de castanha de caju no Brasil em 2023. Fonte: IBGE. ... 42

ARTIGO 2

Tabela — Página

1 Scientific studies related to umbuzeiro seed biology. ... 67
2 Scientific studies related to umbuzeiro seedling production. ... 69
3 Scientific studies related to vegetative propagation of umbuzeiro (air layering, grafting, and cuttings)... 71

ARTIGO 3

Tabela — Página

1 Caracterização das procedências geográficas de umbuzeiro amostradas no estado de Sergipe. ... 86
2 Variáveis de emergência calculadas a partir das contagens diárias e respectivas expressões utilizadas. ... 88
3 Caracterização físico-química do substrato utilizado para o cultivo de mudas de umbuzeiro. ... 89
4 Estatística descritiva das características biométricas das unidades de dispersão de umbuzeiro provenientes de diferentes árvores matrizes e procedências em Sergipe. ... 92
5 Caracterização biométrica das unidades de dispersão de umbuzeiro provenientes de diferentes árvores matrizes. ... 93
6 Emergência e índices de emergência de plântulas de umbuzeiro provenientes de diferentes árvores matrizes. ... 96
7 Crescimento inicial de plântulas de umbuzeiro oriundas de diferentes matrizes, aos 30 dias após a semeadura. ... 99
8 Crescimento e qualidade de mudas de umbuzeiro oriundas de diferentes matrizes, aos 90 dias após o transplantio. ... 101

ARTIGO 4

Tabela — Página

1 Caracterização físico-química do substrato utilizado para o cultivo de mudas de umbuzeiro. ... 109
2 Composição nutricional garantida do fertilizante de liberação controlada utilizado no experimento. ... 109
3 Índice de clorofila de mudas de umbuzeiro submetidas a diferentes doses de fertilizante de liberação controlada e cultivadas em dois ambientes de cultivo (sol pleno e sombrite) aos 60, 90 e 120 dias após o transplante. ... 122

ARTIGO 5

Tabela — Página

1 Principais componentes potencialmente presentes nos resíduos de meios de cultura reutilizados no experimento. ... 131

2 Crescimento vegetativo e qualidade de mudas de umbuzeiro submetidas a diferentes tempos de aplicação do resíduo de meio de cultura.....136
3 Teores de macro e micronutrientes em mudas de umbuzeiro submetidas a diferentes frequências de aplicação de resíduo de meio de cultura de tecidos vegetais via solo.....142

ARTIGO 6

Tabela Página
1 *In vitro* and *ex vitro* germination, normal seedlings (NS), and *in vitro* contamination percentage of dispersal units (DUs) and seeds extracted (SE) from two *Spondias tuberosa* mother plants at 7, 15, 30, and 60 days after sowing.....159
2 Biometric characteristics of the dispersal units of four *Spondias tuberosa* mother plants.....163
3 Descriptive statistics of the dispersal unit biometric characteristics of four *Spondias tuberosa* mother plants. 163

ARTIGO 7

Tabela Página
1 Germinação, formação de hipocótilo, plantas normais e senescência de umbuzeiro cultivado *in vitro* sob diferentes concentrações de $CaCl_2 \cdot 2H_2O$. 174
2 Efeito de diferentes citocininas na multiplicação *in vitro* de umbuzeiro. 179

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

AF	Área foliar
BAP	6-benzilaminopurina
CX	Comprimento do xilopódio
DC	Diâmetro do caule
DIC	Delineamento inteiramente casualizado
Dg	Diâmetro geométrico
DX	Diâmetro do xilopódio
E	Espessura
%E	Percentagem de emergência
EO	Eófilo
EP	Epicótilo
FLC	Fertilizante de liberação controlada
GA_3	Ácido giberélico
GC	Graccho Cardoso
H	Altura
H/D	Relação altura/diâmetro do caule
IQD	Índice de Qualidade de Dickson
IVE	Índice de velocidade de emergência
MFPA	Massa fresca da parte aérea
MFR	Massa fresca da raiz
MFT	Massa fresca total
MS	Meio de cultura Murashige e Skoog
MSPA	Massa seca da parte aérea
MSR	Massa seca da raiz
MST	Massa seca total
NF	Número de folhas
NSG	Nossa Senhora da Glória
NX	Número de xilopódios
PC	Primeira contagem de emergência
PCA	Principal Component Analysis
pH	Potencial hidrogeniônico
PR	Poço Redondo
PS	Pleno sol
SB	Sombreamento
SE	Semente sem endocarpo
TME	Tempo médio de emergência
UD	Unidade de dispersão
VME	Velocidade média de emergência
WPM	Woody Plant Medium
cm	Centímetro
g	Grama
g L^{-1}	Grama por litro
L	Litro
mg L^{-1}	Miligrama por litro
mm	Milímetro
μM	Micromolar

RESUMO

NASCIMENTO, Augusto Vinicius de Souza. **Biotecnologia, silvicultura e importância socioeconômica do umbuzeiro no semiárido brasileiro**. São Cristóvão: UFS, 2026. 184 p. (Tese – Doutorado em Agricultura e Biodiversidade).*

O umbuzeiro (*Spondias tuberosa* Arruda) é uma frutífera nativa da Caatinga, de elevada importância ecológica, socioeconômica e cultural para o semiárido brasileiro. Apesar de seu potencial para alimentação, geração de renda, conservação da biodiversidade e produção de mudas, a espécie ainda apresenta limitações relacionadas à propagação, dormência das unidades de dispersão, estabelecimento inicial e escassez de protocolos biotecnológicos e silviculturais consolidados. Nesse contexto, esta tese teve como objetivo avaliar aspectos biotecnológicos, silviculturais e socioeconômicos relacionados ao umbuzeiro, visando subsidiar estratégias de propagação, produção de mudas, conservação e uso sustentável da espécie. No Artigo 1, foi abordada a família Anacardiaceae, com ênfase na diversidade, nos usos e na importância socioeconômica de espécies nativas para o semiárido brasileiro. O estudo destacou o umbuzeiro como espécie estratégica da Caatinga, em razão de seu valor alimentar, cultural, econômico e ambiental. No Artigo 2, foi realizada uma revisão sistemática sobre a propagação do umbuzeiro, reunindo estudos publicados entre 1991 e 2025. Os resultados evidenciaram avanços em tecnologia de sementes, nutrição mineral, produção de mudas e propagação vegetativa, mas também lacunas relacionadas à micropropagação, conservação de germoplasma e padronização de protocolos de propagação vegetativa. No Artigo 3, avaliou-se a influência de matrizes e procedências na biometria das unidades de dispersão, emergência e crescimento inicial de mudas. As diferenças foram mais evidentes nos atributos biométricos e nas variáveis de emergência, enquanto o crescimento inicial apresentou respostas menos pronunciadas ou pontuais entre matrizes. No Artigo 4, avaliou-se a produção de mudas sob diferentes condições de luminosidade e doses de fertilizante de liberação controlada. Doses moderadas favoreceram o crescimento e a qualidade das mudas, enquanto doses elevadas comprometeram o equilíbrio morfológico das plantas. No Artigo 5, foi avaliado o reaproveitamento de resíduos de meios de cultura como alternativa para a produção de mudas. A aplicação desses resíduos apresentou potencial para favorecer o crescimento inicial e a nutrição das mudas, especialmente em determinados períodos de aplicação, indicando uma estratégia sustentável para aproveitamento desse resíduo para produção de mudas em viveiro. No Artigo 6, investigou-se a germinação *in vitro* de sementes após a remoção do endocarpo, considerando diferentes matrizes, procedências e meios de cultura. A retirada dessa estrutura favoreceu a germinação e reduziu limitações associadas à emergência lenta e desuniforme e à contaminação das unidades de dispersão. No Artigo 7, foram avaliadas estratégias de cultivo *in vitro* e micropropagação do umbuzeiro, envolvendo diferentes condições de cultivo, composição dos meios, reguladores vegetais e tipos de explantes. Os resultados indicaram respostas distintas conforme o tratamento, reforçando a necessidade de ajustes específicos para o estabelecimento, multiplicação e desenvolvimento *in vitro* da espécie. De forma geral, os resultados demonstram que a propagação e a produção de mudas de umbuzeiro dependem da integração entre seleção de matrizes, manejo das unidades de dispersão, superação das barreiras impostas pelo endocarpo, ajustes no cultivo *in vitro* e práticas silviculturais adequadas.

Palavras-chave: *Spondias tuberosa* Arruda, Caatinga, propagação, seleção de matrizes, produção de mudas, micropropagação.

---

* Comitê Orientador: Ana da Silva Lédo – UFS/EMBRAPA (Orientadora), Paulo Augusto Almeida Santos – UFS (Coorientador).

ABSTRACT

NASCIMENTO, Augusto Vinicius de Souza. **Biotechnological, silvicultural and socioeconomic aspects of the umbu tree in the Brazilian semi-arid region.** São Cristóvão: UFS, 2026. 184 p. (Thesis - Doctor of Science in Agriculture and Biodiversity).*

The umbu tree (*Spondias tuberosa* Arruda) is a fruit species native to the Caatinga, with high ecological, socioeconomic and cultural importance for the Brazilian semi-arid region. Despite its potential for food production, income generation, biodiversity conservation and seedling production, the species still presents limitations related to propagation, dormancy of dispersal units, initial establishment and the scarcity of consolidated biotechnological and silvicultural protocols. In this context, this thesis aimed to evaluate biotechnological, silvicultural and socioeconomic aspects related to the umbu tree, in order to support strategies for propagation, seedling production, conservation and sustainable use of the species. Article 1 addressed the Anacardiaceae family, with emphasis on the diversity, uses and socioeconomic importance of native species for the Brazilian semi-arid region. The study highlighted the umbu tree as a strategic species of the Caatinga, due to its food, cultural, economic and environmental value. Article 2 presented a systematic review on umbu tree propagation, gathering studies published between 1991 and 2025. The results showed advances in seed technology, mineral nutrition, seedling production and vegetative propagation, but also gaps related to micropropagation, germplasm conservation and the standardization of vegetative propagation protocols. In Article 3, the effects of mother trees and provenances on dispersal unit biometry, seedling emergence, and initial seedling growth were evaluated. Differences were more evident in biometric attributes and emergence variables, while initial growth showed less pronounced or occasional responses among mother trees.. In Article 4, seedling production was evaluated under different light conditions and doses of controlled-release fertilizer. Moderate doses favored seedling growth and quality, whereas high doses compromised the morphological balance of the plants. In Article 5, the reuse of culture medium residues was evaluated as an alternative for seedling production. The application of these residues showed potential to promote initial growth and seedling nutrition, especially at specific application periods, suggesting their potential as a sustainable input for nursery seedling production.. In Article 6, the *in vitro* germination of seeds after endocarp removal was investigated, considering different mother trees, provenances and culture media. The removal of this structure favored germination and reduced limitations associated with slow and uneven emergence, as well as contamination of dispersal units. In Article 7, strategies for *in vitro* culture and micropropagation of the umbu tree were evaluated, involving different culture conditions, medium compositions, plant growth regulators and explant types. The results indicated distinct responses according to the treatment, reinforcing the need for specific adjustments for the establishment, multiplication and *in vitro* development of the species. Overall, the results demonstrate that the propagation and seedling production of the umbu tree depend on the integration of mother tree selection, management of dispersal units, removal of barriers imposed by the endocarp, adjustments in *in vitro* culture, and appropriate silvicultural practices.

Keywords: *Spondias tuberosa*, Caatinga, plant propagation, seedling production, *in vitro* culture, conservation.

---

* Guidance Committee: Ana da Silva Lédo – UFS/EMBRAPA (Advisor), Paulo Augusto Almeida Santos – UFS (Adjunct advisor).

1. INTRODUÇÃO GERAL

Spondias tuberosa Arruda, conhecida como umbuzeiro, é uma frutífera nativa e endêmica do Brasil, com ocorrência natural na Caatinga e considerada uma das espécies de maior importância para o semiárido brasileiro (Mertens *et al.*, 2015; Mitchell; Daly, 2015). A espécie apresenta elevada importância ecológica, socioeconômica e cultural, especialmente por sua relação com comunidades rurais e sistemas produtivos tradicionais da região semiárida (Lins Neto; Peroni; Albuquerque, 2010; Nunes *et al.*, 2018; Oliveira *et al.*, 2018).

Seus frutos são utilizados na alimentação humana, tanto *in natura* quanto no preparo de polpas, doces, geleias, sucos e outros produtos regionais, além de contribuírem para a geração de renda durante o período de safra (Lins Neto; Peroni; Albuquerque, 2010; Oliveira *et al.*, 2018; Xavier *et al.*, 2022). A produção nacional de umbu no Brasil em 2024 foi de 15.548 t, representando mais de 25 milhões de reais anuais, sendo o maior produtor o estado da Bahia, com 5.831 t, seguido por Minas Gerais, com 5.655 t (IBGE, 2026). A adaptação do umbuzeiro às condições de déficit hídrico está relacionada, entre outros fatores, à formação do xilopódio, estrutura subterrânea de reserva que armazena água e nutrientes e favorece a sobrevivência da planta durante períodos prolongados de estiagem (Cavalcanti; Resende, 2006; Mertens *et al.*, 2017a; Silva *et al.*, 2009a).

Apesar de sua importância, o umbuzeiro ainda é explorado predominantemente de forma extrativista, com baixa implantação de pomares comerciais e poucos avanços no processo de domesticação da espécie (Gama *et al.*, 2024; Lins Neto *et al.*, 2013). As sementes apresentam comportamento ortodoxo, caracterizado pela tolerância à dessecação e pela possibilidade de conservação em baixas temperaturas (Sader; Medeiros, 1993; Carvalho, 2008). Apesar dessa característica, a propagação por sementes apresenta algumas limitações, principalmente pela emergência lenta e desuniforme, associada à presença do endocarpo rígido que envolve a semente (Lopes *et al.*, 2009). Além disso, diferenças entre matrizes podem influenciar a biometria das unidades de dispersão, a germinação, a emergência e o crescimento inicial das plântulas, o que reforça a importância da seleção do material propagativo (Sales *et al.*, 2024; Santana *et al.*, 2025; Silva *et al.*, 2025a). A propagação vegetativa e o cultivo *in vitro* também apresentam desafios, como a formação limitada de xilopódios em mudas produzidas por estacas e a existência de poucos protocolos de micropropagação para a espécie (Fonseca *et al.*, 2019; Nascimento *et al.*, 2026).

Diante dessas limitações, estudos voltados à seleção de matrizes, à produção de mudas e ao estabelecimento de protocolos de propagação *in vitro*, unindo estratégias biotecnológicas e silviculturais, são importantes para ampliar as possibilidades de propagação, conservação e uso sustentável do umbuzeiro. Assim, esta tese teve como objetivo avaliar estratégias biotecnológicas e silviculturais relacionadas à propagação do umbuzeiro, desde a caracterização de matrizes e unidades de dispersão até a produção de mudas e a micropropagação da espécie, bem como a sua importância socioeconômica, visando subsidiar sua conservação e uso sustentável no semiárido brasileiro.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 O semiárido brasileiro e a Caatinga

O Semiárido brasileiro constitui uma das regiões mais singulares do país, abrangendo áreas dos nove estados do Nordeste, além de partes de Minas Gerais e do Espírito Santo, compreendendo atualmente 1.477 municípios (IBGE, 2019; SUDENE, 2024). Do ponto de vista climático, é caracterizada pela elevada sazonalidade, irregularidade na distribuição das chuvas, altas temperaturas e ocorrência frequente de períodos prolongados de estiagem, o que influencia diretamente a dinâmica da vegetação e os modos de vida das populações locais (Alvalá *et al.*, 2019; Marengo *et al.*, 2018).

Em grande parte da região, as chuvas são concentradas em poucos meses do ano, enquanto a estação seca pode se prolongar por longos períodos (Alvalá *et al.*, 2019; Marengo *et al.*, 2018). Esse regime climático favorece a ocorrência de secas recorrentes, com impactos sobre os recursos naturais, a produção agropecuária e a segurança hídrica das comunidades rurais (Rito *et al.*, 2017; Sena *et al.*, 2018). A vegetação predominante no semiárido brasileiro é a Caatinga, o maior e mais contínuo núcleo de Floresta Tropical Sazonalmente Seca (FTSS) das Américas (Figura 1) (Dryflor *et al.*, 2016). Esse bioma ocupa aproximadamente 862.818 km², o equivalente a cerca de 10,1% do território nacional, englobando os estados de Alagoas, Bahia, Ceará, Maranhão, Pernambuco, Paraíba, Rio Grande do Norte, Piauí, Sergipe e o norte de Minas Gerais (IBGE, 2019).

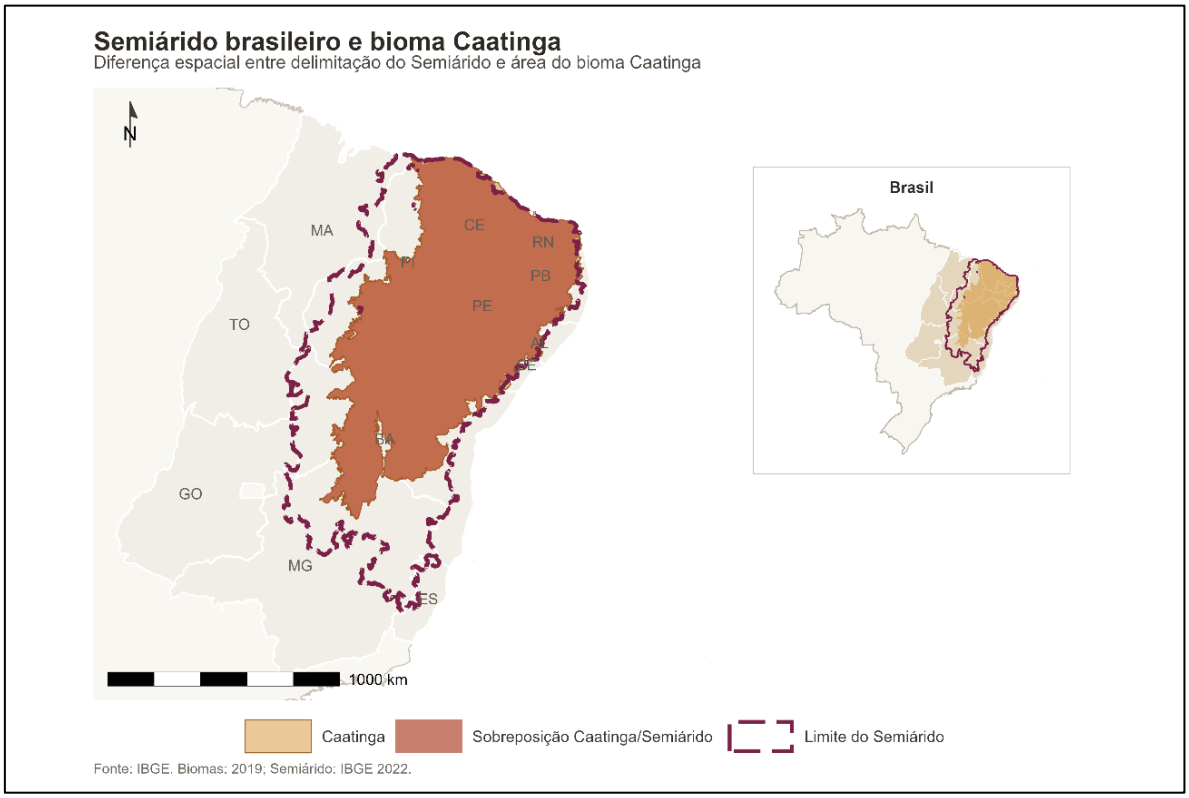


Figura 1. Distribuição espacial do bioma Caatinga e da delimitação do semiárido brasileiro. O mapa destaca a área do bioma Caatinga, o limite do Semiárido brasileiro e a região de sobreposição entre ambos. A miniatura indica a localização da área de estudo no território brasileiro.

O termo Caatinga tem origem indígena e é frequentemente associado à expressão “mata branca”, em referência ao aspecto esbranquiçado da vegetação durante o período seco, quando muitas plantas perdem as folhas (Maia, 2012). A sua flora é formada por um conjunto heterogêneo de formações vegetacionais, com espécies herbáceas, arbustivas e arbóreas adaptadas às condições de déficit hídrico e elevado grau de endemismo (Albuquerque *et al.*,

2012). Muitas dessas espécies apresentam características xeromórficas, como redução da área foliar, presença de espinhos, caducifolia durante a estação seca e estruturas de reserva, estratégias que favorecem a sobrevivência em ambientes com baixa disponibilidade hídrica (Accioly; Farias; Arruda, 2024).

Apesar de historicamente ter sido considerada uma vegetação pouco diversa, a Caatinga abriga elevada riqueza florística e expressivo número de espécies endêmicas (Albuquerque *et al.*, 2012). Além da importância ecológica, seus recursos vegetais são utilizados pelas populações locais para alimentação, medicina popular, forragem, madeira, lenha, carvão e outros produtos florestais, exercendo papel fundamental na manutenção dos modos de vida de comunidades rurais do semiárido, especialmente em áreas onde a dependência dos recursos naturais é maior (Gariglio *et al.*, 2010).

Entretanto, a Caatinga tem sido submetida a intensos processos de degradação ambiental, associados principalmente ao desmatamento, à exploração extrativista desordenada, à retirada de lenha, à agricultura de corte e queima, ao sobrepastoreio e à conversão de áreas naturais para atividades agropecuárias, reduzindo a cobertura vegetal, causando perda de biodiversidade, empobrecimento dos solos e intensificação de áreas suscetíveis à desertificação (Araujo *et al.*, 2025; Barros *et al.*, 2021; Leal *et al.*, 2005; Ribeiro *et al.*, 2015; Schulz *et al.*, 2019). Esse cenário reforça a importância de estudos voltados às espécies nativas da Caatinga que apresentam valor ecológico, alimentar e econômico. Entre elas, o umbuzeiro se destaca por sua relação com comunidades rurais do semiárido e pelo potencial de uso em estratégias de conservação, manejo sustentável, domesticação e produção de mudas.

2.2 Aspectos gerais sobre o umbuzeiro

A família Anacardiaceae reúne espécies de grande importância ecológica, econômica, madeireira, alimentícia e medicinal, incluindo frutíferas cultivadas em escala comercial e espécies nativas exploradas regionalmente (Pell *et al.*, 2010). No Brasil, representantes dessa família ocorrem em diferentes formações vegetais, com destaque para espécies do gênero *Spondias*, que possuem relevância alimentar, ecológica e socioeconômica, especialmente em regiões tropicais e semiáridas (Mitchell; Daly, 2015; Santos *et al.*, 2023).

Entre as espécies do gênero, *Spondias tuberosa* Arruda, conhecida popularmente como umbuzeiro ou imbuzeiro, destaca-se por sua forte relação com a Caatinga e por sua importância para comunidades rurais do semiárido brasileiro (Nunes *et al.*, 2018). Trata-se de uma espécie nativa e endêmica do Brasil, adaptada às condições de sazonalidade hídrica, sendo considerada uma das frutíferas nativas mais representativas da região semiárida e uma das plantas para o futuro da região Nordeste (Lins Neto; Peroni; Albuquerque, 2010; Oliveira *et al.*, 2018).

O umbuzeiro apresenta porte arbóreo, geralmente com tronco curto, copa ampla arredondada e caducifólia durante a época mais seca do ano. As folhas são compostas, alternas e imparipenadas, formadas por folíolos de coloração verde, enquanto as flores são pequenas, reunidas em inflorescências terminais e, em geral, de coloração branca ou creme. Os frutos são drupas arredondadas a elipsoides, com casca fina, polpa suculenta e endocarpo rígido envolvendo a semente, característica diretamente relacionada à dispersão e às limitações observadas na germinação e emergência de plântulas (Figura 2) (Herrera *et al.*, 2018; Mitchell; Daly, 2015).

Uma das características mais marcantes do umbuzeiro é a presença do xilopódio, estrutura subterrânea de reserva que armazena água e nutrientes, favorecendo a sobrevivência da planta durante períodos prolongados de estiagem (Figura 2 I). Essa adaptação permite que a espécie mantenha sua capacidade de rebrota e resistência mesmo sob condições ambientais restritivas, típicas da Caatinga (Cavalcanti; Resende, 2006; Mertens *et al.*, 2017b; Nascimento *et al.*, 2026; Silva *et al.*, 2009).

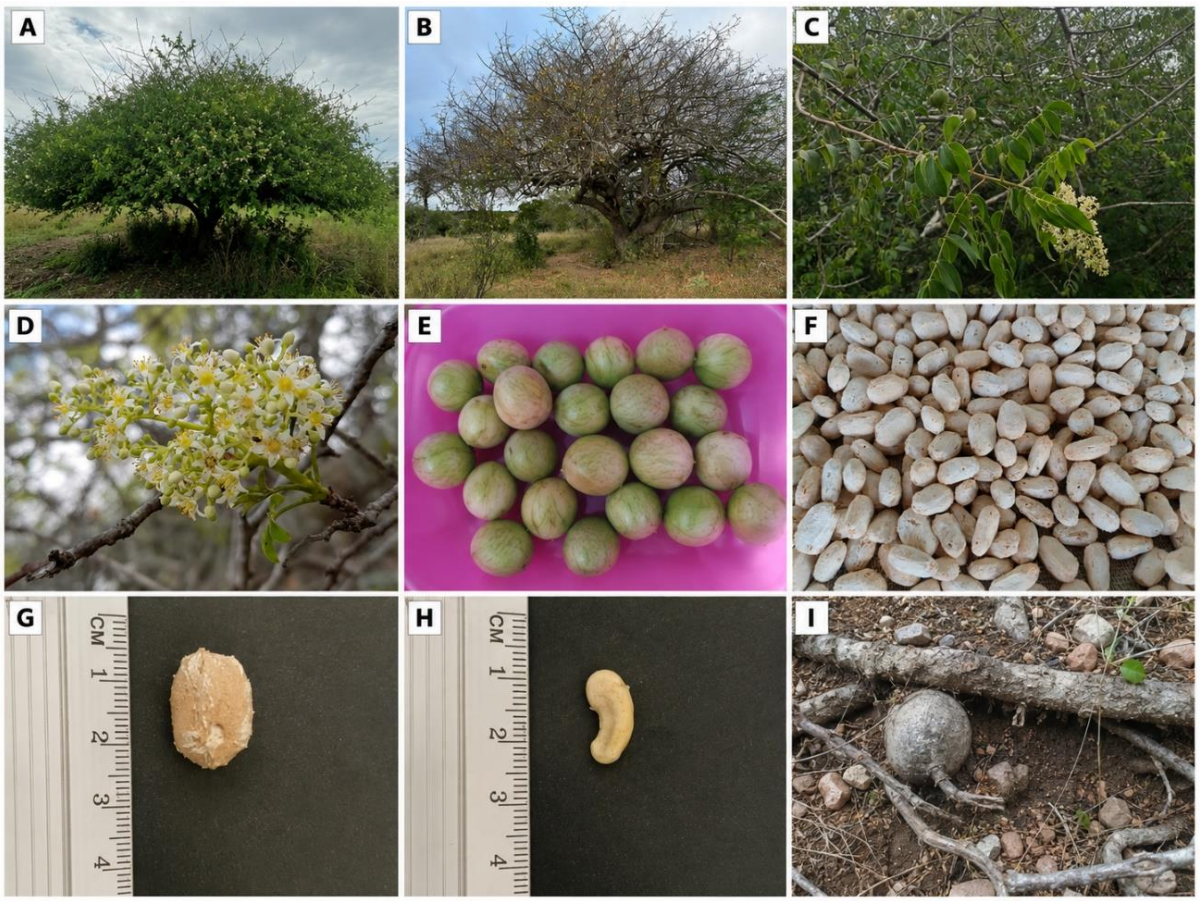


Figura 2. Aspectos morfológicos e reprodutivos do umbuzeiro. (A) indivíduo adulto em fase vegetativa, com copa folhada; (B) indivíduo adulto em fase de caducifolia, com redução da cobertura foliar; (C) ramo com folhas compostas, inflorescências e frutos jovens; (D) detalhe da inflorescência; (E) frutos maduros ou em fase de maturação; (F) endocarpos/pirênios após remoção da polpa; (G) endocarpo/pirênio individualizado com escala; (H) semente após remoção do endocarpo, com escala; (I) estrutura subterrânea de reserva, conhecida como xilopódio. Fonte: Augusto Nascimento.

A distribuição do umbuzeiro está fortemente associada à Caatinga, com registros em diferentes estados do Nordeste brasileiro e em áreas de transição com o norte de Minas Gerais (Figura 2) (Mertens *et al.*, 2015; Mertens *et al.*, 2017a; Nascimento *et al.*, 2025). Essa ampla ocorrência regional reforça a importância ecológica da espécie para o semiárido, especialmente por sua capacidade de persistir em ambientes sazonalmente secos e por sua participação na oferta de recursos alimentares para a fauna e para populações humanas locais (Lins Neto; Peroni; Albuquerque, 2010; Mertens *et al.*, 2015; Sales *et al.*, 2025).

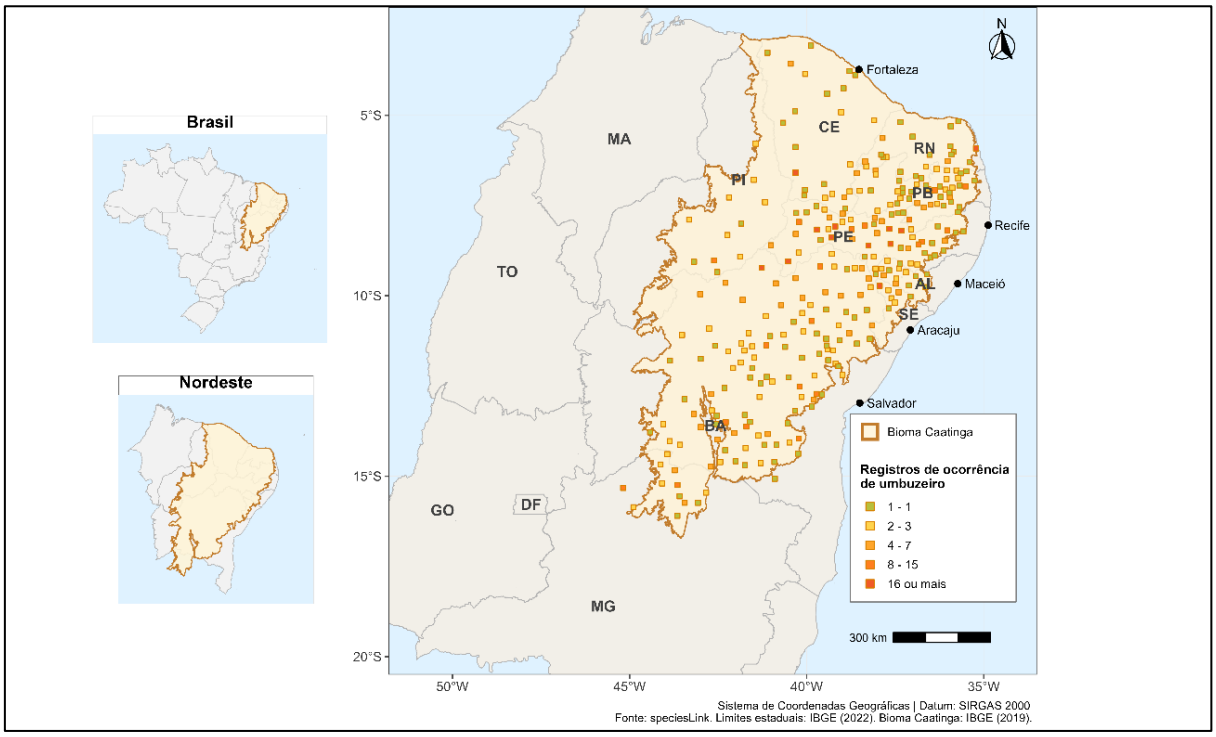


Figura 3. Registros de ocorrência de umbuzeiro no bioma Caatinga.

Além do valor ecológico, o umbuzeiro possui importância alimentar, cultural e econômica. Seus frutos são consumidos *in natura* e utilizados na produção de polpas, doces, geleias, sucos, sorvetes e outros produtos regionais (Cangussu *et al.*, 2021; Xavier *et al.*, 2022). Em muitas comunidades rurais, a coleta e a comercialização dos frutos representam fonte complementar de renda, especialmente durante a safra que se concentra em poucos meses do ano e é fortemente influenciada pela disponibilidade hídrica, ocorrendo geralmente entre dezembro e março na região Nordeste, reforçando o papel da espécie em cadeias produtivas da sociobiodiversidade no semiárido (Lins Neto; Peroni; Albuquerque, 2010; Lima; Silva, 2016; Nunes *et al.*, 2018).

Apesar desse potencial, a exploração do umbuzeiro ainda ocorre predominantemente de forma extrativista. A implantação de pomares comerciais é limitada, e a produção de mudas de qualidade ainda representa um entrave para a domesticação e expansão do cultivo da espécie (Gama *et al.*, 2024). A baixa disponibilidade de materiais propagativos selecionados, associada às dificuldades de germinação, à emergência desuniforme e à carência de protocolos eficientes de propagação vegetativa e *in vitro*, reforça a necessidade de estudos voltados ao manejo, conservação e produção de mudas de umbuzeiro (Lopes *et al.*, 2009; Nascimento *et al.*, 2026).

Assim, o estudo do umbuzeiro deve considerar sua importância socioeconômica para o semiárido e os desafios biotecnológicos e silviculturais relacionados à sua propagação (Lins Neto; Peroni; Albuquerque, 2010; Oliveira *et al.*, 2018; Gama *et al.*, 2024). Do ponto de vista silvicultural, a seleção de matrizes, a avaliação das unidades de dispersão, a emergência, o crescimento inicial e o manejo em viveiro são importantes para melhorar a qualidade das mudas produzidas, especialmente diante da variação entre matrizes e das limitações na propagação sexuada da espécie (Lopes *et al.*, 2009; Sales *et al.*, 2024; Santana *et al.*, 2025; Silva *et al.*, 2025b). Já no campo biotecnológico, a germinação *in vitro*, o ajuste de meios de cultura e a micropropagação podem contribuir para superar limitações da propagação convencional e auxiliar na multiplicação e conservação da espécie (George; Hall; De Klerk, 2008; Phillips; Garda, 2019; Fonseca *et al.*, 2019; Nascimento *et al.*, 2026).

2.3 Conservação, domesticação e seleção de matrizes

A conservação de espécies nativas da Caatinga exige estratégias que conciliem o uso produtivo com a manutenção da variabilidade genética, especialmente diante das pressões antrópicas e dos desafios associados à proteção efetiva desse bioma (Gariglio *et al.*, 2010; Leal *et al.*, 2005; Teixeira *et al.*, 2021). No caso do umbuzeiro, a conservação está diretamente ligada ao uso produtivo da espécie. Por ser endêmica da Caatinga e apresentar importância socioeconômica, sua exploração ainda depende, em grande parte, da coleta de frutos em populações naturais. Além disso, a ausência de programas de melhoramento e clonagem, associada ao uso de material vegetal heterogêneo, reforça a necessidade de seleção de matrizes e de controle da origem do material propagativo (Lins Neto *et al.*, 2010; Lins Neto *et al.*, 2012; Mertens *et al.*, 2015).

Por ser uma espécie predominantemente alógama, com fecundação cruzada e elevada heterozigosidade nas progênies, a coleta de unidades de dispersão em número reduzido de árvores pode resultar em lotes de sementes com baixa representatividade genética (Santos; Gama, 2013; Broadhurst *et al.*, 2008; Santos *et al.*, 2011). Em programas de restauração e conservação, essa limitação é preocupante, pois mudas provenientes de poucas matrizes podem não representar adequadamente a variabilidade existente nas populações naturais (Lu-Irving *et al.*, 2023; Thomas *et al.*, 2014).

A coleta de sementes para restauração e reposição florestal deve considerar um número adequado de árvores matrizes, preferencialmente distribuídas em diferentes pontos da população, de modo a reduzir efeitos de parentesco e ampliar a diversidade genética dos lotes produzidos (Pedrini *et al.*, 2020; Sebbenn, 2002). Essa recomendação é especialmente importante para espécies nativas ainda pouco domesticadas, como o umbuzeiro, cuja produção de mudas depende majoritariamente da coleta em populações naturais (Sales *et al.*, 2024; Santos *et al.*, 2008).

A seleção de matrizes, entretanto, não deve considerar apenas a diversidade genética. Características fenotípicas, produtivas e fisiológicas também são importantes, especialmente quando o objetivo é produzir mudas vigorosas (Silva *et al.*, 2025b). Para o umbuzeiro, atributos como produção de frutos, sanidade da planta, tamanho e massa das unidades de dispersão, teor de água, emergência de plântulas, vigor inicial e formação do xilopódio podem fornecer informações relevantes sobre o potencial das matrizes (Santana *et al.*, 2025; Silva *et al.*, 2025a; Silva *et al.*, 2024).

A variação entre matrizes pode ocorrer dentro de uma mesma procedência. Isso indica que a origem geográfica, embora importante, nem sempre explica isoladamente o desempenho das sementes e das mudas (Kolawole *et al.*, 2025). Fatores como idade da planta, condição fisiológica da matriz, disponibilidade hídrica, fertilidade do solo, maturação dos frutos e condições de armazenamento podem influenciar a qualidade fisiológica das sementes (Sales *et al.*, 2024; Santana *et al.*, 2025; Silva *et al.*, 2025a).

Essa perspectiva é importante para o avanço do cultivo e do uso sustentável do umbuzeiro. A domesticação de espécies nativas envolve a identificação de indivíduos com características de interesse, a propagação eficiente desses materiais e a incorporação gradual da espécie em sistemas produtivos (Miller; Gross, 2011). No entanto, no caso do umbuzeiro, esse processo ainda é incipiente, e grande parte da produção depende de indivíduos naturalmente estabelecidos ou remanescentes em áreas rurais e pastagens, o que reforça a necessidade de ampliar a seleção de matrizes, estruturar programas de conservação e avançar na transição do extrativismo para sistemas de cultivo manejado (Lins Neto *et al.*, 2012, 2013).

2.4 Propagação sexuada, unidade de dispersão e dormência

A propagação por sementes é uma das principais formas de obtenção de mudas de umbuzeiro. Essa via é especialmente importante quando o objetivo é conservar a variabilidade genética, formar porta-enxertos, produzir mudas para restauração ecológica ou estabelecer populações em áreas de conservação (Cruz; Andrade; Feitosa, 2016). No entanto, a propagação

seminífera da espécie apresenta limitações importantes, principalmente relacionadas à emergência lenta, desuniforme e, em muitos casos, de baixa porcentagem da germinação (<50%) (Costa *et al.*, 2001; Lopes *et al.*, 2009).

No umbuzeiro, a semente encontra-se protegida por uma estrutura rígida, fibrosa e lenhosa, geralmente denominada unidade de dispersão, endocarpo ou pirênio. Essa estrutura é formada por tecidos associados ao endocarpo e apresenta resistência mecânica considerável (Herrera *et al.*, 2018; Rodrigues *et al.*, 2024). A presença desse envoltório pode dificultar a embebição, reduzir as trocas gasosas e limitar fisicamente o crescimento do embrião, atrasando ou impedindo a protrusão da radícula e a emergência da plântula (Lopes *et al.*, 2009; Rodrigues *et al.*, 2024, 2025).

Dessa forma, a dormência do umbuzeiro tem sido frequentemente associada a mecanismos exógenos, principalmente físicos e mecânicos, relacionados à resistência imposta pelo endocarpo, devido à sua alta dureza (Lopes *et al.*, 2009; Pompelli; Jarma-Orozco; Rodriguez-Páez, 2023). A dormência física está relacionada à restrição de entrada de água, enquanto a dormência mecânica decorre da presença de estruturas rígidas que impedem o crescimento do embrião e a emissão da radícula ou do epicótilo (Carvalho; Nakagawa, 2012; Garcia *et al.*, 2024). A dormência é uma característica evolutiva que ajuda as espécies a superar eventos de seca; porém, para sistemas comerciais ou programas de restauração, essa desuniformidade na germinação é um problema, pois resulta em lotes heterogêneos, com mudas em diferentes estágios de desenvolvimento (Araujo *et al.*, 2018).

Além da barreira física e mecânica, há indícios de que outros componentes possam influenciar a dormência do umbuzeiro. A resposta positiva ao armazenamento e à embebição em ácido giberélico em alguns estudos sugere possível participação de fatores ligados à maturação embrionária ou à redução gradual da dormência após a dispersão e ao balanço entre ácido abscísico e giberelinas, a depender do lote de sementes analisado (Nascimento *et al.*, 2026).

Diversos métodos têm sido avaliados para superar ou reduzir os efeitos da dormência das unidades de dispersão do umbuzeiro. Entre eles estão a escarificação mecânica, o corte em bisel, a embebição em água, a escarificação química, o uso de ácido giberélico ou ácido salicílico e o armazenamento. Os resultados relatados na literatura, entretanto, são bastante variáveis, indicando que ainda não há um método único e universalmente eficiente para todos os lotes da espécie (Correia *et al*., 2024; Costa *et al*., 2001; Lopes *et al*., 2009; Melo *et al*., 2012; Nobre *et al*., 2017; Rodrigues *et al*., 2025).

A variação de resposta entre métodos pode estar relacionada à procedência das unidades de dispersão, ao grau de maturação dos frutos, às condições de armazenamento, à idade das sementes, ao teor de água e à própria variabilidade entre matrizes (Costa *et al.*, 2001; Nobre *et al.*, 2017; Santana *et al.*, 2025). Por isso, o estudo da propagação sexuada do umbuzeiro deve considerar não apenas o tratamento de superação de dormência, mas também a origem e a qualidade do material propagativo.

2.5 Variação entre matrizes, biometria e crescimento inicial

A qualidade das mudas de umbuzeiro começa a ser definida antes da semeadura, a partir da escolha das matrizes e das características das unidades de dispersão coletadas. Variáveis biométricas, como comprimento, largura, espessura e massa, podem expressar diferenças entre matrizes e procedências, além de refletirem variações no desenvolvimento dos frutos e sementes (Jesus *et al.*, 2021; Pires; Baute, 2023; Sales *et al.*, 2024; Santana *et al.*, 2025)

Além das características físicas, fatores fisiológicos também interferem no desempenho inicial: o teor de água, a maturidade das sementes, o tempo de armazenamento e as condições ambientais durante a formação dos frutos podem alterar a qualidade fisiológica das unidades de dispersão (Carvalho; Nakagawa, 2012; Marcos-Filho, 2015; Piña-Rodrigues; Figliolia; Silva, 2015). Dessa forma, a avaliação de matrizes deve integrar informações biométricas e

fisiológicas, evitando interpretações baseadas apenas no tamanho ou na massa das unidades de dispersão (Dresch *et al.*, 2015; Jesus *et al.*, 2021; Pires; Baute, 2023).

Após a emergência, o crescimento inicial das plântulas constitui outra etapa importante para avaliar a qualidade do material propagativo (Chen *et al.*, 2022). Variáveis como altura, diâmetro do caule, número de folhas, área foliar, massa seca da parte aérea, massa seca do sistema radicular e massa seca total permitem estimar o vigor das mudas e sua capacidade de estabelecimento e sobrevivência no campo (Bayala *et al.*, 2009; Guimarães; Silva; Ferreira, 2024). Para espécies nativas destinadas ao plantio em campo, a qualidade das mudas não deve ser avaliada apenas pelo crescimento rápido da parte aérea, mas pelo equilíbrio entre parte aérea e raiz, robustez e capacidade de tolerar estresses ambientais (Bayala *et al.*, 2009; Guimarães; Silva; Ferreira, 2024). No caso do umbuzeiro, a formação do xilopódio deve ser incluída nessa avaliação, pois essa estrutura está diretamente relacionada à adaptação da espécie ao semiárido (Cruz; Andrade; Feitosa, 2016; Matos *et al.*, 2020).

2.6 Produção de mudas, nutrição mineral e manejo em viveiro

A produção de mudas de umbuzeiro exige práticas silviculturais que favoreçam crescimento equilibrado, rusticidade e sobrevivência após o plantio no campo, especialmente pelas condições ambientais do semiárido (Grossnickle; MacDonald, 2018). No caso do umbuzeiro, esse desafio é ainda mais relevante pois as mudas podem enfrentar alta radiação, temperaturas elevadas, baixa disponibilidade hídrica e solos com limitações nutricionais (Franco *et al.*, 2006; Mainhart *et al.*, 2024; Mohsin *et al.*, 2021; Silva; Gonçalves; Pinho, 2005).

A nutrição mineral é um dos principais fatores que determinam o crescimento e a qualidade de mudas (Cortina; Vilagrosa; Trubat, 2013). Nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e micronutrientes participam de processos fisiológicos essenciais, como fotossíntese, divisão celular, expansão foliar, formação de tecidos, desenvolvimento radicular e regulação osmótica (Maathuis, 2009; White; Brown, 2010). Deficiências ou desequilíbrios nutricionais podem reduzir o crescimento, comprometer o acúmulo de biomassa e afetar a qualidade final das mudas (Xu *et al.*, 2020, 2024).

Para o umbuzeiro, estudos sobre manejo nutricional demonstram que o crescimento inicial das mudas pode ser influenciado pela disponibilidade de sais minerais no substrato ou em solução nutritiva. Trabalhos com macronutrientes e micronutrientes indicam que a espécie responde às condições nutricionais do ambiente de cultivo na fase inicial de crescimento, o que reforça a importância do manejo nutricional na fase de viveiro (Cruz; Andrade; Feitosa, 2016; Gonçalves; Neves; Carvalho, 2006; Neves *et al.*, 2007a; Neves *et al.*, 2007b; Neves *et al.*, 2008; Silva; Gonçalves; Pinho, 2005).

O uso de fertilizantes de liberação controlada tem se tornado uma alternativa para a produção de mudas florestais e frutíferas (Smiderle; Souza; Menegatti, 2020). Esses fertilizantes disponibilizam nutrientes gradualmente ao longo do tempo, reduzindo perdas por lixiviação e favorecendo o fornecimento contínuo durante o crescimento das plantas (Madrid-Aispuro *et al.*, 2020). No entanto, a dose utilizada deve ser ajustada à espécie e ao substrato, pois doses insuficientes podem limitar o crescimento, enquanto doses excessivas podem causar desequilíbrio nutricional ou salinização do substrato (Cunha *et al.*, 2021).

Além da nutrição, a radiação solar exerce forte influência sobre o crescimento das mudas, pois altera a disponibilidade de energia para fotossíntese e pode modificar características como altura, diâmetro, área foliar, biomassa e alocação de fotoassimilados entre parte aérea e sistema radicular (Bebre; Riebl; Annighöfer, 2021; Zhang *et al.*, 2022; Zhu *et al.*, 2025). O sombreamento pode favorecer o crescimento em altura e aumentar a área foliar, enquanto o pleno sol pode estimular maior robustez, maior diâmetro do caule e aclimatação a condições de campo (Huang *et al.*, 2025; Zhang *et al.*, 2022). No entanto, essa resposta depende da espécie, do estágio de desenvolvimento e das condições de manejo (Bebre; Riebl; Annighöfer, 2021; Carvalho *et al.*, 2025).

A qualidade de mudas pode ser avaliada por variáveis isoladas ou por índices integrados (Grossnickle, 2012). Altura, diâmetro, biomassa e relação altura/diâmetro fornecem informações importantes sobre crescimento e robustez (Grossnickle; MacDonald, 2018). A relação entre massa seca da parte aérea e massa seca da raiz indica o equilíbrio de alocação de biomassa, enquanto o índice de qualidade de Dickson integra diferentes características morfológicas e pode auxiliar na avaliação da qualidade das mudas (Avelino *et al.*, 2021; Dickson *et al.*, 1960; Guimarães *et al.*, 2024).

Além das estratégias convencionais de adubação, o reaproveitamento de meios de cultura utilizados em laboratório pode representar uma alternativa complementar no manejo nutricional de mudas. Meios como MS, WPM e KNUDSON C contêm sais minerais e outros componentes que, após o uso em cultivo *in vitro*, geralmente são descartados. Esses resíduos, se manejados adequadamente, podem apresentar potencial como fonte nutritiva para mudas em condições *ex vitro*.

2.7 Cultura de tecidos vegetais e germinação *in vitro*

Dentro da biotecnologia, a cultura de tecidos vegetais compreende um conjunto de técnicas que permite o cultivo de células, tecidos, órgãos ou plantas inteiras sob condições assépticas e controladas (George; Hall; De Klerk, 2008). Essa abordagem tem ampla aplicação na propagação clonal, conservação de germoplasma, limpeza de patógenos, produção de mudas e estudos fisiológicos (Delgado-Paredes *et al.*, 2021; Thakur *et al.*, 2024). Para espécies com dificuldades de propagação convencional, como muitas lenhosas nativas, o cultivo *in vitro* pode oferecer alternativas importantes para o estabelecimento de plântulas e multiplicação de genótipos selecionados (Cardoso; Gerald; Silva, 2018).

Os meios de cultura são fundamentais para o sucesso do cultivo *in vitro*. Entre os meios mais utilizados estão o MS e o WPM. O meio MS apresenta elevada concentração de sais e é amplamente utilizado para diferentes espécies e finalidades, enquanto o WPM foi desenvolvido para espécies lenhosas e possui menor concentração salina, especialmente em relação a alguns macronutrientes (Gonzales-Alvarado *et al.*, 2025; Jafarova *et al.*, 2025; Lloyd; McCown, 1980; Murashige; Skoog, 1962; Sharma; Sharma; Kumar, 2025).

Essas diferenças podem alterar a resposta das sementes e plântulas, principalmente em espécies sensíveis à concentração salina ou à disponibilidade de nitrogênio (Pasternak; Steinmacher, 2024). O nitrogênio é um dos componentes mais importantes dos meios de cultura, sendo fornecido geralmente nas formas nítrica e amoniacal, e participa tanto da constituição de aminoácidos, proteínas, ácidos nucleicos e clorofila quanto de processos fisiológicos associados ao crescimento e desenvolvimento vegetal (Marschner, 2012; Pasternak; Steinmacher, 2024; Taiz *et al.*, 2017). Além de sua função estrutural, o nitrato pode atuar como molécula sinalizadora durante a germinação. Estudos com diferentes espécies indicam que o nitrato pode participar da superação da dormência, interagindo com vias hormonais relacionadas ao ácido abscísico e ao óxido nítrico (Alboresi *et al.*, 2005; Arc *et al.*, 2013; Duermeyer *et al.*, 2018; Klupczyńska; Pawłowski, 2021).

A germinação *in vitro* pode ser influenciada pela composição do meio de cultura, uma vez que a concentração de sais, vitaminas, fonte de carbono e potencial osmótico interfere diretamente na embebição, na protrusão radicular e no desenvolvimento inicial das plântulas (Bhojwani; Dantu, 2013; George; Hall; De Klerk, 2008). Embora o meio MS seja amplamente utilizado na cultura de tecidos vegetais por sua elevada disponibilidade de macro e micronutrientes, sua maior concentração salina pode não favorecer todas as espécies, especialmente lenhosas e frutíferas, que muitas vezes apresentam melhor desempenho em meios com menor concentração de sais, como o WPM, originalmente desenvolvido para espécies lenhosas (Lloyd; McCown, 1980; Murashige; Skoog, 1962).

Diferenças na germinação *in vitro* em função do meio de cultura já foram relatadas para diversas espécies frutíferas nativas, incluindo mangabeira (*Hancornia speciosa*), ingazeiro (*Inga vera* subsp. *affinis*), murici (*Byrsonima cydoniifolia*) e cajuzinho-do-cerrado

(*Anacardium occidentale*) (Assis *et al.*, 2012; Martendal *et al.*, 2013; Oliveira *et al.*, 2014; Soares *et al.*, 2009; Stein *et al.*, 2007). Esses estudos demonstram que a resposta germinativa pode variar conforme a composição salina, a concentração do meio e as exigências fisiológicas da espécie, reforçando a necessidade de ajustes específicos para cada material vegetal cultivado *in vitro*.

Outro componente frequentemente utilizado no cultivo *in vitro* é o carvão ativado, empregado principalmente por sua elevada capacidade de adsorção de compostos presentes no meio de cultura (Pan; Van Staden, 1998; Thomas, 2008). Sua adição pode reduzir a oxidação dos explantes pela adsorção de compostos fenólicos e quinonas liberados pelos tecidos, favorecendo o estabelecimento e o desenvolvimento inicial em algumas espécies (Permadi *et al.*, 2024). Esse efeito tem sido observado especialmente em espécies lenhosas e frutíferas, nas quais a oxidação fenólica constitui uma limitação frequente durante o cultivo *in vitro* (Abohatem, 2025; Fagundes *et al.*, 2018). No entanto, a resposta ao carvão ativado nem sempre é positiva, pois sua ação adsorvente também pode reduzir a disponibilidade de reguladores de crescimento, vitaminas, nutrientes e outros compostos orgânicos presentes no meio, alterando o balanço químico disponível para os explantes e, consequentemente, a germinação ou o crescimento das plântulas (Pan; Van Staden, 1998; Thomas, 2008).

Apesar do potencial, o estabelecimento *in vitro* do umbuzeiro apresenta desafios. A contaminação é um dos principais problemas, especialmente quando se utilizam unidades de dispersão ou explantes provenientes de campo. A estrutura fibrosa do endocarpo pode abrigar microrganismos, dificultando a desinfestação e comprometendo a germinação *in vitro*. Além disso, a presença do endocarpo rígido impede a absorção de água pela semente do meio de cultura para iniciar o processo germinativo.

2.8 Micropropagação e desafios para espécies lenhosas nativas

Entre as ferramentas biotecnológicas aplicadas à propagação vegetal, a micropropagação destaca-se como uma das principais aplicações da cultura de tecidos, consistindo na produção de plantas a partir de pequenos explantes cultivados *in vitro* (Cardoso; Gerald; Silva, 2018). Essa técnica permite multiplicar genótipos selecionados em espaço reduzido, sob condições controladas e independentemente da época do ano (Fernández-Poquioma *et al.*, 2026; Micheli *et al.*, 2020). Além disso, pode contribuir para a produção de mudas com melhor qualidade sanitária, conservação de germoplasma, limpeza clonal e propagação de espécies de difícil multiplicação por métodos convencionais (Bettoni; Wang; Wang, 2024; Bhardwaj *et al.*, 2025).

De modo geral, a micropropagação envolve diferentes etapas. A primeira corresponde à seleção e preparação da planta-mãe, etapa importante para reduzir a contaminação e aumentar a responsividade dos explantes. Em seguida, ocorre o estabelecimento *in vitro*, no qual os explantes são desinfestados e inoculados em meio de cultura. A etapa seguinte é a multiplicação, geralmente conduzida com o uso de citocininas para estimular a emissão de brotos. Posteriormente, os brotos podem passar por alongamento, enraizamento (nesses passos geralmente com o uso de auxinas) e aclimatização, até que sejam transferidos para condições *ex vitro* (Abdalla *et al.*, 2022; Cardoso; Gerald; Silva, 2018; Murashige, 1974).

Para espécies lenhosas nativas, essas etapas frequentemente apresentam limitações. A contaminação por fungos e bactérias é uma das principais causas de perdas no estabelecimento *in vitro*, principalmente quando o material vegetal é coletado em campo (Assis *et al.*, 2017; Oliveira; Dias; Brondani, 2013). A contaminação pode ser superficial, quando associada à desinfestação inadequada, ou endógena, quando os microrganismos estão presentes internamente nos tecidos da planta (Grattapaglia; Machado, 1998; Oliveira; Dias; Brondani, 2013; Abdalla *et al.*, 2022).

Outro problema recorrente em sistemas de micropropagação é a senescência ou necrose apical, também descrita como *shoot-tip necrosis*, caracterizada pelo escurecimento, paralisação do crescimento e morte da região apical (Bairu; Stirk; Van Staden, 2009; Silva *et al.*, 2020).

Esse distúrbio fisiológico tem sido associado a desequilíbrios nutricionais, especialmente envolvendo cálcio e boro, à baixa mobilidade desses elementos para tecidos jovens, à reduzida transpiração no interior dos frascos, à alta umidade relativa, à baixa ventilação, ao acúmulo de etileno e, em alguns casos, ao efeito de reguladores de crescimento presentes no meio de cultura (Bairu *et al.*, 2009; Machado *et al.*, 2014; Silva *et al.*, 2020). Estratégias como ajuste da concentração de cálcio e boro no meio, uso de meios menos concentrados, maior frequência de subcultivos, melhoria da ventilação dos recipientes, redução da hiperidricidade e adequação dos reguladores de crescimento podem contribuir para minimizar esse problema, embora a eficiência dessas medidas varie conforme a espécie, o tipo de explante e a fase de cultivo (Bairu; Stirk; Van Staden, 2009; Liu *et al.*, 2024; Machado *et al.*, 2014; Morales-Tapia; Gambardella, 2022; Silva *et al.*, 2020).

Os reguladores de crescimento são componentes centrais nos protocolos de micropropagação, pois direcionam respostas como divisão celular, multiplicação de brotos, enraizamento, calogênese e diferenciação celular (Bhojwani; Dantu, 2013; George; Hall; De Klerk, 2008). As citocininas, especialmente o BAP (6-benzilaminopurina), são amplamente utilizadas na fase de multiplicação por estimularem a divisão celular, a quebra de dominância apical e a emissão de brotos, resposta observada em diferentes espécies lenhosas e frutíferas cultivadas *in vitro* (Carvalho *et al.*, 2002; Hiep; Hong, 2026; Manzoor *et al.*, 2025). As auxinas, como AIB (ácido indolbutírico), AIA (ácido indolacético) e ANA (ácido naftalenoacético), são mais frequentemente utilizadas na indução de raízes, embora também possam participar de respostas de calogênese e diferenciação celular (Bhojwani; Dantu, 2013; Cardoso; Gerald; Silva, 2018; Hiep; Hong, 2026).

O tipo de explante é outro fator determinante na micropropagação, uma vez que a capacidade de regeneração e multiplicação pode variar entre ápices caulinares, segmentos nodais, cotilédones, embriões zigóticos e outros tecidos vegetais (Cachiță-Cosma, 1991; Martini; Vlachou; Papafotiou, 2022). Explantes apicais tendem a manter maior dominância apical, o que pode favorecer crescimento mais alongado, mas limitar a emissão de múltiplas brotações. Explantes cotiledonares ou nodais, por outro lado, podem apresentar maior responsividade, especialmente quando associados à presença de citocininas no meio (Cachiță-Cosma, 1991; Costa *et al.*, 2020; Ibrahim *et al.*, 2024; Marks; Myers, 1992; Marks; Simpson, 2000; Martini; Papafotiou, 2023; Trivedi; Joshi, 2015). Em espécies lenhosas, explantes juvenis derivados de sementes germinadas *in vitro* são frequentemente utilizados por apresentarem menor contaminação e maior capacidade morfogênica (Isah, 2023; Martini; Papafotiou, 2023; Read; Bavougian, 2013; Venkatachalam *et al.*, 2024).

Os estudos com cultivo *in vitro* de umbuzeiro ainda são limitados (Fonseca *et al.*, 2019). Trabalhos anteriores indicam que o BAP pode induzir brotações em umbuzeiro, embora o número de brotos por explante ainda seja baixo em comparação com protocolos consolidados para outras frutíferas (Melo *et al.*, 1997). A adição de giberelina também tem sido relatada como alternativa para favorecer germinação e alongamento caulinar em condições *in vitro* (Santos *et al.*, 2018).

3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDALLA, N.; EL-RAMADY, H.; SELIEM, M. K.; EL-MAHROUK, M. E.; TAHA, N.; BAYOUMI, Y.; SHALABY, T. A.; DOBRÁNSZKI, J. An academic and technical overview on plant micropropagation challenges. **Horticulturae**, v. 8, n. 8, art. 677, 2022.

ABOHATEM, M. A. Effect of activated charcoal and subculture rates on a two-phase culture strategy involving biomass accumulation followed by phenolic production in date palm cell suspension cultures. **BMC Plant Biology**, v. 25, n. 1, 2025.

ACCIOLY, A. do N.; FARIAS, R. de P.; ARRUDA, E. C. P. de. Plants in the caatinga possess multiple adaptive leaf morphoanatomical traits concurrently, a pattern revealed from a systematic review. **Journal of Arid Environments**, v. 222, 2024.

ALBORESI, A.; GESTIN, C.; LEYDECKER, M.-T.; BEDU, M.; MEYER, C.; TRUONG, H.-N. Nitrate, a signal relieving seed dormancy in *Arabidopsis*. **Plant, Cell & Environment**, v. 28, n. 4, p. 500–512, 2005.

ALBUQUERQUE, U. P. de; ARAÚJO, E. de L.; EL-DEIR, A. C. A.; LIMA, A. L. A. de; SOUTO, A.; BEZERRA, B. M.; FERRAZ, E. M. N.; FREIRE, E. M. X.; SAMPAIO, E. V. de S. B.; LAS-CASAS, F. M. G.; MOURA, G. J. B. de; PEREIRA, G. A.; MELO, J. G. de; RAMOS, M. A.; RODAL, M. J. N.; SCHIEL, N.; LYRA-NEVES, R. M. de; ALVES, R. R. N.; AZEVEDO-JÚNIOR, S. M. de; TELINO JÚNIOR, W. R.; SEVERI, W. Caatinga revisited: ecology and conservation of an important seasonal dry forest. **The Scientific World Journal**, v. 2012, art. 205182, 2012.

ALVALÁ, R. C. D. S.; CUNHA, A. P. M. A.; BRITO, S. S. B.; SELUCHI, M. E.; MARENGO, J. A.; MORAES, O. L. L.; CARVALHO, M. A. Drought monitoring in the Brazilian semiarid region. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 91, 2019.

ARAUJO, A. S. F.; MEDEIROS, E. V. de; COSTA, D. P. da; MENDES, L. W.; CHERUBIN, M. R.; ALCANTARA NETO, F. de; BEIRIGO, R. M.; LAMBAIS, G. R.; MELO, V. M. M.; NÓBREGA, G. N.; BARBOSA, H. A.; MOTA, J. C. A.; SANTANA, R. M.; KAVAMURA, V. N.; BORGES, W. L.; PEREIRA, A. P. A. Caatinga Microbiome Initiative: disentangling the soil microbiome across areas under desertification and restoration in the Brazilian drylands. **Restoration Ecology**, v. 33, n. 2, e14298, 2025.

ARAUJO, M. M.; GASPARIN, E.; OLIVEIRA, L. M. de; ZAVISTANOVICZ, T. C.; FELIPPI, M. Dormência de sementes: uma abordagem voltada à silvicultura. In: ARAUJO, M. M.; NAVROSKI, M. C.; SCHORN, L. A. (org.). **Produção de sementes e mudas: um enfoque à silvicultura**. Santa Maria: Ed. UFSM, 2018. p. 79–98.

ARC, E.; SECHET, J.; CORBINEAU, F.; RAJJOU, L.; MARION-POLL, A. ABA crosstalk with ethylene and nitric oxide in seed dormancy and germination. **Frontiers in Plant Science**, v. 4, art. 63, 2013.

ASSIS, F. A. de; RODRIGUES, F. A.; PASQUAL, M.; ASSIS, G. A.; LUZ, J. M. Q.; JANONI, F.; COSTA, I. de J. S.; COSTA, B. N. S.; SOARES, J. D. R. Antioxidants in the control of microorganism contamination and phenol oxidation in *Eugenia pyriformis*. **Bioscience Journal**, v. 34, n. 1, p. 49–58, 2017.

ASSIS, K. C.; PEREIRA, F. D.; CABRAL, J. S. R.; SILVA, F. G.; SILVA, J. W.; SANTOS, S. C. dos. *In vitro* cultivation of *Anacardium othonianum* Rizz.: effects of salt concentration and culture medium volume. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 34, n. 1, p. 77–83, 2012.

AVELINO, N. R.; SCHILLING, A. C.; DALMOLIN, Â. C.; SANTOS, M. S. dos; MIELKE, M. S. Biomass allocation and growth indicators for quality evaluation of seedlings of native forest species. **Ciência Florestal**, v. 31, n. 4, p. 1733–1750, 2021.

BAIRU, M. W.; JAIN, N.; STIRK, W. A.; DOLEŽAL, K.; VAN STADEN, J. Solving the problem of shoot-tip necrosis in *Harpagophytum procumbens* by changing the cytokinin types, calcium and boron concentrations in the medium. **South African Journal of Botany**, v. 75, n. 1, p. 122–127, 2009.

BAIRU, M. W.; STIRK, W. A.; VAN STADEN, J. Factors contributing to *in vitro* shoot-tip necrosis and their physiological interactions. **Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)**, v. 98, n. 3, p. 239–248, 2009.

BARROS, M. F.; RIBEIRO, E. M. S.; VANDERLEI, R. S.; PAULA, A. S. de; SILVA, A. B.; WIRTH, R.; CIANCIARUSO, M. V.; TABARELLI, M. Resprouting drives successional pathways and the resilience of Caatinga dry forest in human-modified landscapes. **Forest Ecology and Management**, v. 482, 2021.

BAYALA, J.; DIANDA, M.; WILSON, J.; OUÉDRAOGO, S. J.; SANON, K. Predicting field performance of five irrigated tree species using seedling quality assessment in Burkina Faso, West Africa. **New Forests**, v. 38, n. 3, p. 309–322, 2009.

BEBRE, I.; RIEBL, H.; ANNIGHÖFER, P. Seedling growth and biomass production under different light availability levels and competition types. **Forests**, v. 12, n. 10, 2021.

BETTONI, J. C.; WANG, M. R.; WANG, Q. C. *In vitro* regeneration, micropropagation and germplasm conservation of horticultural plants. **Horticulturae**, v. 10, n. 1, 2024.

BHARDWAJ, S.; KUMARI, M.; T., C.; HOSAMANI, M.; PAUL, M.; MOIRANGTHEM, A.; DASH, A. P.; VERMA, S. Advances in micropropagation and tissue culture for horticultural crops: a review. **Plant Cell Biotechnology and Molecular Biology**, v. 26, n. 11–12, p. 166–182, 2025.

BHOJWANI, S. S.; DANTU, P. K. **Plant tissue culture: an introductory text**. 1. ed. New Delhi: Springer India, 2013.

BROADHURST, L. M.; LOWE, A.; COATES, D. J.; CUNNINGHAM, S. A.; MCDONALD, M.; VESK, P. A.; YATES, C. Seed supply for broadscale restoration: Maximizing evolutionary potential. **Evolutionary Applications**, v. 1, n. 4, p. 587–597, 2008.

CACHIȚĂ-COSMA, D. The effect of the nature and origin of explants on micropropagation. In: BAJAJ, Y. P. S. (org.). **High-Tech and Micropropagation I**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1991. p. 142–167.

CANGUSSU, L. B.; FRONZA, P.; FRANCA, A. S.; OLIVEIRA, L. S. Chemical characterization and bioaccessibility assessment of bioactive compounds from umbu (*Spondias tuberosa* Arruda) fruit peel and pulp flours. **Foods**, v. 10, n. 11, 2021.

CARDOSO, J. C.; GERALD, L. T. S.; SILVA, J. A. T. da. Micropropagation in the twenty-first century. In: LOYOLA-VARGAS, V. M.; OCHOA-ALEJO, N. (org.). **Plant Cell Culture Protocols**. New York, NY: Springer New York, 2018. p. 17–46.

CARVALHO, C. P. da S.; CORREIA, D.; BENBADIS, A. K.; LUZ, J. M. Q.; ROSSETTI, A. G. *In vitro* culture of *Spondias mombin* L. nodal segments. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 24, n. 3, p. 776–777, 2002.

CARVALHO, D. F. de; SILVA, L. de O.; SURIANI, M. C. V.; SILVA, L. de O. da; ROCHA, J. G. da; LELES, P. S. dos S. Growth of tree species seedlings under shading levels and automatic irrigation management. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 29, n. 5, 2025.

CARVALHO, N. M. DE; NAKAGAWA, J. **Sementes: ciência, tecnologia e produção**. 5. ed. Jaboticabal: FUNEP, 2012.

CARVALHO, P. E. R. Umbuzeiro: *Spondias tuberosa*. In: CARVALHO, P. E. R. **Espécies arbóreas brasileiras**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Colombo: Embrapa Florestas, 2008. v. 3, p. 503-509.

CAVALCANTI, N. D. B.; RESENDE, G. M. de. Ocorrência de xilopódio em plantas nativas de imbuzeiro. **Revista Caatinga**, v. 19, n. 3, p. 287–293, 2006.

CHEN, Y.; WANG, K.; ZHANG, Z.; OU, L.; LUO, X.; ZHU, F.; HIRST, P. M.; AO, Y. Phenotypic Variation in Seed Morphochemical and Seedling Traits in Four Chinese Provenances of *Xanthoceras sorbifolium*. **Forests**, v. 13, n. 6, 2022.

CORREIA, M. A.; SILVA, L. de A.; NÓBREGA, J. S.; SOUTO, L. S.; BRITO, L. A.; MOREIRA, R. C. L.; SOUZA, A. dos S.; SÁ, F. V. da S. Salicylic acid and soaking times on the emergence, gas exchange and early growth of umbu. **Revista Caatinga**, v. 37, 2024.

CORTINA, J.; VILAGROSA, A.; TRUBAT, R. The role of nutrients for improving seedling quality in drylands. **New Forests**, v. 44, n. 5, p. 719–732, 2013.

COSTA, A. de O.; SILVA, L. A. S.; DUARTE, I. M.; MACHADO, M.; SILVA, G. Z. da; SILVA, D. F. P. da; NETTO, A. P. da C.; ROCHA, D. I. Shoot proliferation and *in vitro* organogenesis from shoot apex and cotyledonary explants of royal poinciana (*Delonix regia*), an ornamental leguminous tree. **Trees – Structure and Function**, v. 34, n. 1, p. 189–197, 2020.

COSTA, N. P. da; BRUNO, R. de L. A.; SOUZA, F. X. de; LIMA, E. D. P. de A. Efeito do estádio de maturação do fruto e do tempo de pré-embebição de endocarpos na germinação de sementes de umbuzeiro (*Spondias tuberosa* Arr. Câm.). **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 23, n. 3, p. 738–741, 2001.

CRUZ, F. R. da S.; ANDRADE, L. A. de; FEITOSA, R. C. Produção de mudas de umbuzeiro (*Spondias tuberosa* Arruda Câmara) em diferentes substratos e tamanho de recipientes. **Ciência Florestal**, v. 26, n. 1, p. 69–80, 2016.

CUNHA, F. L.; NIERI, E. M.; SANTOS, J. A. dos; ALMEIDA, R. S. de; MELO, L. A. de; VENTURIN, N. Use of slow-release fertilizers in the forest sector. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 41, 2021.

DELGADO-PAREDES, G. E.; VÁSQUEZ-DÍAZ, C.; ESQUERRE-IBAÑEZ, B.; BAZÁN-SERNAQUÉ, P.; ROJAS-IDROGO, C. *In vitro* tissue culture in plants propagation and germplasm conservation of economically important species in Peru. **Scientia Agropecuaria**, v. 12, n. 3, p. 337–349, 2021.

DICKSON, A.; LEAF, A. L.; HOSNER, J. F. Quality appraisal of white spruce and white pine seedling stock in nurseries. **The Forestry Chronicle**, v. 36, n. 1, p. 10–13, 1960.

DRESCH, D. M.; SCALON, S. de P. Q.; MUSSURY, R. M.; MASETTO, T. E. Do desiccation and storage of *Campomanesia adamantium* (Cambess.) O. Berg (Myrtaceae) seeds affect the formation and survival of seedlings? **African Journal of Agricultural Research**, v. 10, n. 33, p. 3216–3224, 2015.

DRYFLOR et al. Plant diversity patterns in neotropical dry forests and their conservation implications. **Science**, v. 353, n. 6306, p. 1383-1387, 2016.

DUERMEYER, L.; KHODAPANAHI, E.; YAN, D.; KRAPP, A.; ROTHSTEIN, S. J.; NAMBARA, E. Regulation of seed dormancy and germination by nitrate. **Seed Science Research**, v. 28, n. 3, p. 150–157, 2018.

FAGUNDES, C. de M.; MOREIRA, R. M.; RAMM, A.; SCHUCH, M. W.; TOMAZ, Z. F. P. Carvão ativado no estabelecimento *in vitro* de cultivares de framboeseira. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 16, n. 4, p. 406–413, 2018.

FERNÁNDEZ-POQUIOMA, D. M.; LLAJA-ZUTA, E.; HERNÁNDEZ-AMASIFUEN, A. D.; CONDORI-APFATA, J. A. *In Vitro* Micropropagation of Native Ulluco (*Ullucus tuberosus* Caldas) from the Amazonas Region of Peru. **Plants**, v. 15, n. 6, 2026.

FONSECA, N.; CARDOSO, M. M.; RITZINGER, R.; LONDE, L. C. N.; GONÇALVES, N. P.; SATURNINO, H. M. Propagação do umbuzeiro. **Informe Agropecuário**, v. 40, n. 307, p. 39–51, 2019.

FRANCO, J. A.; MARTÍNEZ-SÁNCHEZ, J. J.; FERNÁNDEZ, J. A.; BAÑÓN, S. Selection and nursery production of ornamental plants for landscaping and xerogardening in semi-arid environments. **The Journal of Horticultural Science and Biotechnology**, v. 81, n. 1, p. 3–17, 2006.

GAMA, D. C.; DEUS, D. A. de; OLIVEIRA, F. F. de; CASTRO, M. S. de; SOUZA, M. O. de; NASCIMENTO, J. S. do. Umbu tree (*Spondias tuberosa* Arr. Cam. – Anacardiaceae): from extractive to planted culture in Brazil. **Scientia Agraria**, v. 20, n. 2, 2024.

GARCIA, Q. S.; SANTOS, J. A. S.; BICALHO, E. M.; RODRIGUES-JUNIOR, A. G. **Germinação: princípios, processos e aplicações**. 1. ed. Brasília, DF: Rede de Sementes do Cerrado, 2024.

GARIGLIO, M. A.; SAMPAIO, E. V. S. B.; CESTARO, L. A.; KAGEYAMA, P. Y. **Uso sustentável e conservação dos recursos florestais da Caatinga**. Brasília: Serviço Florestal Brasileiro, 2010.

GEORGE, E. F.; HALL, M. A.; DE KLERK, G.-J. Plant Tissue Culture Procedure – background. In: GEORGE, E. F.; HALL, M. A.; DE KLERK, G.-J. (org.). **Plant**

Propagation by Tissue Culture: Volume 1. The Background. Dordrecht: Springer Netherlands, 2008. p. 1–28.

GONÇALVES, F. C.; NEVES, O. S. C.; CARVALHO, J. G. de. Deficiência nutricional em mudas de umbuzeiro decorrente da omissão de macronutrientes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 6, p. 1053–1057, 2006.

GONZALES-ALVARADO, A. C.; HILARIO-ROMÁN, N.; REVILLA-CHÁVEZ, J. M.; CCOPE, C. R. S.; MORI-VÁSQUEZ, J. A. Woody Plant Medium optimizes *in vitro* germination and development of *Calycophyllum spruceanum*. **Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín**, v. 78, n. 3, p. 11353–11363, 2025.

GRATTAPAGLIA, D.; MACHADO, M. A. Micropropagação. In: TORRES, A. C.; CALDAS, L. S.; BUSO, J. A. (ed.). **Cultura de tecidos e transformação genética de plantas**. Brasília, DF: Embrapa-SPI: Embrapa-CNPH, 1998. v. 1, p. 183-260**.**

GROSSNICKLE, S. C. Why seedlings survive: influence of plant attributes. **New Forests**, v. 43, n. 5, p. 711–738, 2012.

GROSSNICKLE, S. C.; MACDONALD, J. E. Why seedlings grow: influence of plant attributes. **New Forests**, v. 49, n. 1, p. 1–34, 2018.

GUIMARÃES, Z. T. M.; SILVA, D. C. da; FERREIRA, M. J. Seedling quality and short-term field performance of three Amazonian forest species as affected by site conditions. **iForest**, v. 17, n. 2, p. 80–89, 2024.

HERRERA, F.; MITCHELL, J. D.; PELL, S. K.; COLLINSON, M. E.; DALY, D. C.; MANCHESTER, S. R. Fruit Morphology and Anatomy of the Spondioid Anacardiaceae. **Botanical Review**, v. 84, n. 4, p. 315–393, 2018.

HIEP, H. P.; HONG, T. T. *In vitro* propagation of *Aegle marmelos* (L.) Corrêa via nodal cultures: effects of auxin-cytokinin combinations and acclimatization substrates. **BMC Research Notes**, v. 19, n. 1, 2026.

HUANG, C.; LIN, L.; CHEN, F.; WANG, X.; SHI, M.; CHEN, L.; YANG, X.; DONG, X.; ZHANG, M. Shading Effects on the Growth and Physiology of Endangered *Hopea hainanensis* Merr.; Chun Seedlings. **Forests**, v. 16, n. 7, 2025.

IBRAHIM, M. S. D.; SARI, L.; NOORROHMAH, S.; HARTATI, R. S.; UDARNO, L.; RANDRIANI, E.; ERNAWATI; WARDIANA, E.; DEWI, A. K. Multiplication of apical and axillary shoots of coffee arabica using various types of cytokinins. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 1377, n. 1, p. 012101, 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Biomas e Sistema Costeiro-Marinho do Brasil: compatível com a escala 1:250.000**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Tabela 289: quantidade produzida e valor da produção na extração vegetal, por tipo de produto extrativo**. Sistema IBGE de Recuperação Automática – SIDRA. Rio de Janeiro: IBGE, 2026. Disponível em: https://sidra.ibge.gov.br/tabela/289. Acesso em: 22 ago. 2026.

ISAH, T. Explant rejuvenation in the clonal propagation of woody plants. **Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)**, v. 154, n. 1, p. 209–212, 2023.

JAFAROVA, V.; SADIGOVA, A.; ISMAYILOVA, G.; ADILOVA, L.; SULEYMANOVA, S.; MAMMADOVA, M. Evaluation of physiological responses of hazelnut (*Corylus avellana* L.) explants to MS and WPM culture media. **Transactions of the Institute of Molecular Biology & Biotechnologies**, v. 9, n. 1, p. 59–65, 2025.

JESUS, J. B. de; FERREIRA, R. A.; GAMA, D. C.; TORRES, M. F. O. Physical and physiological attributes of native forest seeds and their influence on direct seeding for restoration of ciliary forest. **Floresta**, v. 51, n. 2, p. 255, 2021.

KLUPCZYŃSKA, E. A.; PAWŁOWSKI, T. A. Regulation of seed dormancy and germination mechanisms in a changing environment. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 22, n. 3, 2021.

KNUDSON, L. A new nutrient solution for the germination of orchid seed. **American Orchid Society Bulletin**, v. 15, p. 214–217, 1946.

KOLAWOLE, M. A.; AKAKPO, A. D. M.; SALAKO, K. V.; NOULÈKOUN, F.; DIMOBE, K.; ASSOGBADJO, A. E.; GLÈLÈ KAKAÏ, R. Provenance and tree-to-tree differences in germination performance of *Balanites aegyptiaca* (L.) Delile: Insights for domestication and selection. **Heliyon**, v. 11, n. 4, 2025.

LEAL, I. R.; SILVA, J. M. C. da; TABARELLI, M.; LACHER, T. E. Changing the course of biodiversity conservation in the Caatinga of northeastern Brazil. **Conservation Biology**, v. 19, n. 3, p. 701–706, 2005.

LIMA, M. A. C. de; SILVA, S. de M. Qualidade e conservação pós-colheita. In: DRUMOND, M. A.; AIDAR, S. de T.; NASCIMENTO, C. E. de S.; OLIVEIRA, V. R. de (ed.). **Umbuzeiro: avanços e perspectivas**. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2016. cap. 6, p. 177-215.

LINS NETO, E. M. F.; OLIVEIRA, I. F. de; BRITTO, F. B.; ALBUQUERQUE, U. P. de. Traditional knowledge, genetic and morphological diversity in populations of *Spondias tuberosa* Arruda (Anacardiaceae). **Genetic Resources and Crop Evolution**, v. 60, n. 4, p. 1389–1406, 2013.

LINS NETO, E. M. F.; PERONI, N.; ALBUQUERQUE, U. P. de. Traditional knowledge and management of Umbu (*Spondias tuberosa*, Anacardiaceae): An Endemic Species from the Semi-Arid Region of Northeastern Brazil. **Economic Botany**, v. 64, n. 1, p. 11–21, 2010.

LINS NETO, E. M. F.; PERONI, N.; MARANHÃO, C. M. C.; MACIEL, M. I. S.; ALBUQUERQUE, U. P. de. Analysis of umbu (*Spondias tuberosa* Arruda (Anacardiaceae)) in different landscape management regimes. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 184, n. 7, p. 4489–4499, 2012.

LIU, C. L.; DENG, J. M.; YAN, H. M.; HUANG, H. Y. *In vitro* cluster buds regeneration and control of shoot tip necrosis in tissue cultures of *Trichosanthes cucumerina* L. **Plant Cell, Tissue and Organ Culture**, v. 159, n. 1, 2024.

LLOYD, G.; MCCOWN, B. Commercially-feasible micropropagation of mountain laurel, *Kalmia latifolia*, by use of shoot-tip culture. **Combined Proceedings of the International Plant Propagators' Society**, v. 30, p. 421–427, 1980.

LOPES, P. S. N.; MAGALHÃES, H. M.; GOMES, J. G.; BRANDÃO JÚNIOR, D. da S.; ARAÚJO, V. D. de. Superação da dormência de sementes de umbuzeiro (*Spondias tuberosa* Arr. Câm.) utilizando diferentes métodos. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 31, n. 3, p. 872–880, 2009.

LU-IRVING, P.; BRAGG, J. G.; ROSSETTO, M.; KING, K.; O'BRIEN, M.; VAN DER MERWE, M. M. Capturing Genetic Diversity in Seed Collections: An Empirical Study of Two Congeners with Contrasting Mating Systems. **Plants**, v. 12, n. 3, 2023.

MAATHUIS, F. J. M. Physiological functions of mineral macronutrients. **Current Opinion in Plant Biology**, v. 12, n. 3, p. 250–258, 2009.

MACHADO, M. P.; SILVA, A. L. L. da; BIASI, L. A.; DESCHAMPS, C.; BESPALHOK FILHO, J. C.; ZANETTE, F. Influence of calcium content of tissue on hyperhydricity and shoot-tip necrosis of *in vitro* regenerated shoots of *Lavandula angustifolia* Mill. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 57, n. 5, p. 636–643, 2014.

MADRID-AISPURO, R. E.; PRIETO-RUÍZ, J. Á.; ALDRETE, A.; HERNÁNDEZ-DÍAZ, J. C.; WEHENKEL, C.; CHÁVEZ-SIMENTAL, J. A.; MEXAL, J. G. Alternative substrates and fertilization doses in the production of *Pinus cembroides* Zucc. in nursery. **Forests**, v. 11, n. 1, 2020.

MAIA, G. N. **Caatinga: árvores e arbustos e suas utilidades**. 2. ed. Fortaleza: Printcolor, 2012.

MAINHART, D. E.; CHRISTOFFERSEN, B. O.; THOMPSON, R. A.; REEMTS, C. M.; FIERRO-CABO, A. Preparing for the worst: enhancing seedling traits to reduce transplant shock in semi-arid regions. **Forests**, v. 15, n. 9, p. 1607, 2024.

MANZOOR, I.; BHAT, K. M.; MIR, M. A.; NAIR, N. M.; PANDIT, A. H.; KULSUM, U.; QUADRI, S.; DESHMUKH, S.; PASTERNAK, T. The optimization of *in vitro* culture establishment and shoot proliferation of "GiSelA 17" (*Prunus canescens* × *Prunus avium*): a novel cherry rootstock. **International Journal of Plant Biology**, v. 16, n. 1, 2025.

MARCOS-FILHO, J. **Fisiologia de sementes de plantas cultivadas**. 2. ed. Londrina: ABRATES, 2015.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; ALVALA, R. C. S.; CUNHA, A. P.; BRITO, S.; MORAES, O. L. L. Climatic characteristics of the 2010–2016 drought in the semiarid northeast Brazil region. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 90, n. 2, p. 1973–1985, 2018.

MARKS, T. R.; MYERS, P. E. Effect of explant location upon early culture development *in vitro*. **Journal of Horticultural Science**, v. 67, n. 5, p. 583–591, 1992.

MARKS, T. R.; SIMPSON, S. E. Interaction of explant type and indole-3-butyric acid during rooting *in vitro* in a range of difficult and easy-to-root woody plants. **Plant Cell, Tissue and Organ Culture**, v. 62, n. 1, p. 65–74, 2000.

MARSCHNER, H. **Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants**. San Diego: Elsevier, 2012.

MARTENDAL, C. D. O.; BERNARDINO, M. M.; PEREIRA, F. D.; SILVA, F. G.; MENEZES, C. C. E. de; MONTEIRO HARA, A. C. B. de A. *In vitro* cultivation of zygotic embryos from Murici (*Byrsonima cydoniifolia* A. Juss.): establishment, disinfection, and germination. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 35, n. 2, p. 221–229, 2013.

MARTINI, A. N.; PAPAFOTIOU, M. *In vitro* seed and clonal propagation of the Mediterranean bee-friendly plant *Anthyllis hermanniae* L. **Sustainability (Switzerland)**, v. 15, n. 5, 2023.

MARTINI, A. N.; VLACHOU, G.; PAPAFOTIOU, M. Effect of explant origin and medium plant growth regulators on *in vitro* shoot proliferation and rooting of *Salvia tomentosa*, a native sage of the Northeastern Mediterranean Basin. **Agronomy**, v. 12, n. 8, 2022.

MATOS, F. S.; FREITAS, I. A. S.; PEREIRA, V. L. G.; PIRES, W. K. L. Effect of gibberellin on growth and development of *Spondias tuberosa* seedlings. **Revista Caatinga**, v. 33, n. 4, p. 1124–1130, 2020.

MELO, A. P. C. de; SELEGUINI, A.; CASTRO, M. N.; MEIRA, F. de A.; GONZAGA, J. M. da S.; HAGA, K. I. Superação de dormência de sementes e crescimento inicial de plântulas de umbuzeiro. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 33, n. 4, p. 1343–1350, 2012.

MELO, N.; FÁRI, M.; TEIXEIRA, J. *In vitro* cultivation of nodal segments of the umbu tree [*Spondias tuberosa* (Arr.) Cam.]. **Acta Horticulturae**, n. 447, p. 535–538, 1997.

MERTENS, J.; ALMEIDA-CORTEZ, J. S. de; GERMER, J.; SAUERBORN, J. Umbuzeiro (*Spondias tuberosa*): a systematic review. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, n. 36, p. 179–197, 2015.

MERTENS, J.; GERMER, J.; SIQUEIRA FILHO, J. A.; SAUERBORN, J. *Spondias tuberosa* Arruda (Anacardiaceae), uma árvore ameaçada de extinção da caatinga? **Brazilian Journal of Biology**, v. 77, n. 3, p. 542–552, 2017a.

MERTENS, J.; GERMER, S.; GERMER, J.; SAUERBORN, J. Comparison of soil amendments for reforestation with a native multipurpose tree under semiarid climate: Root and root tuber response of *Spondias tuberosa*. **Forest Ecology and Management**, v. 396, p. 1–10, 2017b.

MICHELI, M.; PROSPERI, F.; FACCHIN, S.; SILVA, D. F. da. Safeguard of plant germplasm through the *in vitro* culture. **Horticulture International Journal**, v. 4, n. 2, p. 50–52, 2020.

MILLER, A. J.; GROSS, B. L. From forest to field: perennial fruit crop domestication. **American Journal of Botany**, v. 98, n. 9, p. 1389–1414, 2011.

MITCHELL, J. D.; DALY, D. C. A revision of *Spondias* L. (Anacardiaceae) in the neotropics. **PhytoKeys**, v. 55, n. 1, p. 1–92, 2015.

MOHSIN, F.; ARIAS, M.; ALBRECHT, C.; WAHL, K.; FIERRO-CABO, A.; CHRISTOFFERSEN, B. Species-specific responses to restoration interventions in a Tamaulipan thornforest. **Forest Ecology and Management**, v. 491, p. 119154, 2021.

MORALES-TAPIA, P.; GAMBARDELLA, M. Control of shoot-tip necrosis during *Argylia radiata in vitro* multiplication. **Ornamental Horticulture**, v. 28, n. 4, p. 423–430, 2022.

MURASHIGE, T. Plant Propagation Through Tissue Cultures. **Annual Review of Plant Physiology**, v. 25, n. 1, p. 135–166, 1974.

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.

NASCIMENTO, A. V. de S.; SANTOS, P. A. A.; MUNIZ, A. V. C. da S.; LÉDO, A. da S. The propagation of umbuzeiro (*Spondias tuberosa* Arruda), a native fruit tree of growing importance for the Brazilian semi-arid region. **Forests, Trees and Livelihoods**, p. 1–25, 2026.

NASCIMENTO, W. F. do; COSTA, F. M.; ALVES-PEREIRA, A.; BATISTA, C. E. de A.; CARVALHO, I. A. S. de; GARCIA, C. B.; SILVA, A. V. da; SILVA, E. F. da; DIAS, M. M. de S. G.; PEREIRA, F. R. A.; ZUCCHI, M. I.; VEASEY, E. A. SNP-based analysis reveals high genetic structure and diversity in umbu tree (*Spondias tuberosa* Arruda), a native and endemic species of the Caatinga biome. **Genetic Resources and Crop Evolution**, v. 72, p. 965–980, 2025.

NEVES, O. S. C.; CARVALHO, J. G. de; FERREIRA, E. V. de O.; PEREIRA, N. V. Crescimento, nutrição mineral e nível crítico foliar de K em mudas de umbuzeiro, em função da adubação potássica. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 31, n. 3, p. 636–642, 2007a.

NEVES, O. S. C.; FERREIRA, E. V. de O.; CARVALHO, J. G. de; SOARES, C. R. F. S. Adição de níquel na solução nutritiva para o cultivo de mudas de umbuzeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 3, p. 485–490, 2007b.

NEVES, O. S. C.; CARVALHO, J. G. de; OLIVEIRA, E. V. de; NEVES, V. B. F. Crescimento, nutrição mineral e nível crítico foliar de P em mudas de umbuzeiro, em função da adubação fosfatada. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 30, n. 3, p. 801–805, 2008.

NOBRE, D. A. C.; SILVA, I. C.; MAIA, V. M.; DAVID, A. M. S. de S.; ALEXANDRE, R. S. Qualidade física, fisiológica e superação de dormência de sementes de umbuzeiro (*Spondias tuberosa* Arr. Câmara). **Pesquisa Agropecuária Pernambucana**, v. 22, 2017.

NUNES, E. N.; GUERRA, N. M.; ARÉVALO-MARÍN, E.; ALVES, C. A. B.; NASCIMENTO, V. T. do; CRUZ, D. D. da; LADIO, A. H.; SILVA, S. de M.; OLIVEIRA, R. S. de; LUCENA, R. F. P. de. Local botanical knowledge of native food plants in the semiarid region of Brazil. **Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine**, v. 14, n. 1, 2018.

OLIVEIRA, K. S. de; OLIVEIRA, M. da S.; PEREIRA, E. C.; LIMA, S. C. de; ALOUFA, M. A. I. Efeito de diferentes meios de cultura na germinação *in vitro* de sementes de mangabeira (*Hancornia speciosa* Gomes). **Revista Árvore**, v. 38, n. 4, p. 601–607, 2014.

OLIVEIRA, L. S. de; DIAS, P. C.; BRONDANI, G. E. Micropropagação de espécies florestais brasileiras. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 33, n. 76, p. 439–453, 2013.

OLIVEIRA, V. R. de; DRUMOND, M. A.; SANTOS, C. A. F. dos; NASCIMENTO, C. E. de S. *Spondias tuberosa*: umbu. In: CORADIN, L.; CAMILLO, J.; PAREYN, F. G. C. (org.). **Espécies nativas da flora brasileira de valor econômico atual ou potencial: plantas para o futuro: região Nordeste**. Brasília: MMA, 2018. p. 304–315.

PAN, M. J.; VAN STADEN, J. The use of charcoal in *in vitro* culture – a review. **Plant Growth Regulation**, v. 26, n. 3, p. 155–163, 1998.

PASTERNAK, T. P.; STEINMACHER, D. Plant growth regulation in cell and tissue culture *in vitro*. **Plants**, v. 13, n. 1, 2024.

PEDRINI, S.; GIBSON-ROY, P.; TRIVEDI, C.; GÁLVEZ-RAMÍREZ, C.; HARDWICK, K.; SHAW, N.; FRISCHIE, S.; LAVERACK, G.; DIXON, K. Collection and production of native seeds for ecological restoration. **Restoration Ecology**, v. 28, n. S3, p. S228–S238, 2020.

PELL, S. K.; MITCHELL, J. D.; MILLER, A. J.; LOBOVA, T. A. Anacardiaceae. In: KUBITZKI, K. (org.). **Flowering Plants. Eudicots**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010. p. 7–50.

PERMADI, N.; AKBARI, S. I.; PRISMANTORO, D.; INDRIYANI, N. N.; NURZAMAN, M.; ALHASNAWI, A. N.; DONI, F.; JULAEHA, E. Traditional and next-generation methods for browning control in plant tissue culture: current insights and future directions. **Current Plant Biology**, v. 38, art. 100339, 2024.

PHILLIPS, G. C.; GARDA, M. Plant tissue culture media and practices: an overview. **In Vitro Cellular & Developmental Biology - Plant**, v. 55, n. 3, p. 242-257, 2019.

PIÑA-RODRIGUES, F. C.; FIGLIOLIA, M. B.; SILVA, A. da. **Sementes florestais tropicais: da ecologia à produção**. Londrina, PR: ABRATES, 2015.

PIRES, R. M. de O.; BAUTE, J. L. Importance of seed quality for the forestry sector. **Boletim Técnico SIF**, v. 03, n. 05, p. 1–6, 30 maio 2023.

POMPELLI, M. F.; JARMA-OROZCO, A.; RODRIGUEZ-PÁEZ, L. A. Imbibition and germination of seeds with economic and ecological interest: physical and biochemical factors involved. **Sustainability (Switzerland)**, v. 15, n. 6, 2023.

READ, P. E.; BAVOUGIAN, C. M. *In Vitro* Rejuvenation of Woody Species. In: LAMBARDI, M.; OZUDOGRU, E. A.; JAIN, S. M. (org.). **Protocols for Micropropagation of Selected Economically-Important Horticultural Plants**. Totowa, NJ: Humana Press, 2013. p. 383–395.

RIBEIRO, E. M. S.; ARROYO-RODRÍGUEZ, V.; SANTOS, B. A.; TABARELLI, M.; LEAL, I. R. Chronic anthropogenic disturbance drives the biological impoverishment of the Brazilian Caatinga vegetation. **Journal of Applied Ecology**, v. 52, n. 3, p. 611–620, 2015.

RITO, K. F.; ARROYO-RODRÍGUEZ, V.; QUEIROZ, R. T.; LEAL, I. R.; TABARELLI, M. Precipitation mediates the effect of human disturbance on the Brazilian Caatinga vegetation. **Journal of Ecology**, v. 105, n. 3, p. 828–838, 1 maio 2017.

RODRIGUES, A. M. B.; TORRES, M. F. O.; NUNES, V. V.; SOUZA, J. L.; SANTANA, N. A.; PINHEIRO, A. C.; MANN, R. S. Pre-germination treatments for *Spondias tuberosa* seeds. **Revista Delos**, v. 18, n. 64, p. e4044, 2025.

RODRIGUES, A. M. B.; TORRES, M. F. O.; NUNES, V. V.; SOUZA, J. L.; SANTANA, N. A.; SILVA-MANN, R. Unveiling the structure of *Spondias tuberosa* dispersal units through X-ray imaging. **Genetic Resources and Crop Evolution**, v. 71, n. 2, p. 947–956, 2024.

SADER, R.; MEDEIROS, A. C. de S. Efeito da desidratação, congelamento e frio na germinação de sementes de umbuzeiro (*Spondias tuberosa* Arruda Câmara). **Informativo ABRATES**, Londrina, v. 3, n. 3, p. 109, 1993.

SALES, R. P. de; NEVES, A. G. da S.; PINHEIRO, L. G.; FAJARDO, C. G.; AZEVEDO, T. K. B. de; VIEIRA, F. de A. Fruit exploitation and climate suitability for *Spondias tuberosa*: implications for management and conservation. **Cerne**, v. 31, n. 1, 2025.

SALES, R. P. de; SILVA, L. C. da; NEVES, A. G. da S.; FAJARDO, C. G.; PINHEIRO, L. G.; VIEIRA, F. de A. Addressing conservation needs: genetic diversity and population ecology of the endemic tree *Spondias tuberosa* Arruda. **Scientifica**, v. 2024, n. 1, 2024.

SANTANA, N. A.; NUNES, V. V.; SILVA, M. S. O. da; SILVA-MANN, R. Phenotypic selection for improvement of *Spondias tuberosa* trees in on-farm biodiversity conservation. **Genetic Resources and Crop Evolution**, v. 72, n. 3, p. 3603–3620, 2025.

SANTOS, C. A. F.; GAMA, R. N. An AFLP estimation of the outcrossing rate of *Spondias tuberosa* (Anacardiaceae), an endemic species to the Brazilian semiarid region. **Revista de Biología Tropical**, v. 61, n. 2, 2013.

SANTOS, C. A. F.; OLIVEIRA, V. R. de; RODRIGUES, M. A.; RIBEIRO, H. L. C.; DRUMOND, M. A. Estimativas de polinização cruzada em população de *Spondias tuberosa* Arruda (Anacardiaceae) usando marcador AFLP. **Revista Árvore**, v. 35, n. 3, supl. 1, p. 691–697, 2011.

SANTOS, C. A. F.; RODRIGUES, M. A.; ZUCCHI, M. I. Variabilidade genética do umbuzeiro no Semi-Árido brasileiro, por meio de marcadores AFLP. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 8, p. 1037–1043, 2008.

SANTOS, É. M. dos; ATAIDE, J. A.; COCO, J. C.; FAVA, A. L. M.; SILVÉRIO, L. A. L.; SUEIRO, A. C.; SILVA, J. R. A.; LOPES, A. M.; PAIVA-SANTOS, A. C.; MAZZOLA, P. G. *Spondias* sp.: shedding light on its vast pharmaceutical potential. **Molecules**, v. 28, n. 4, art. 1862, 2023.

SANTOS, P. A. A.; DIAS, G. S.; MENDONÇA, A. M. C.; SILVA JÚNIOR, C. D.; SILVA, L. C.; SANTANA, M. C. Embryo rescue of *Spondias tuberosa* and exogenous application of gibberellic acid. **Acta Horticulturae**, v. 1224, n. 1224, p. 39–44, 2018.

SCHULZ, K.; GUSCHAL, M.; KOWARIK, I.; ALMEIDA-CORTEZ, J. S. de; SAMPAIO, E. V. de S. B.; CIERJACKS, A. Grazing reduces plant species diversity of Caatinga dry forests in northeastern Brazil. **Applied Vegetation Science**, v. 22, n. 2, p. 348–359, 2019.

SEBBENN, A. M. Número de árvores matrizes e conceitos genéticos na coleta de sementes para reflorestamentos com espécies nativas. **Revista do Instituto Florestal**, v. 14, n. 2, p. 115–132, 2002.

SENA, A.; FREITAS, C.; SOUZA, P. F.; ALPINO, T.; PEDROSO, M.; CORVALAN, C.; BARCELLOS, C.; CARNEIRO, F. Drought in the semiarid region of Brazil: exposure, vulnerabilities and health impacts from the perspectives of local actors. **PLoS Currents**, 2018.

SHARMA, S.; SHARMA, S.; KUMAR, P. *In vitro* establishment of walnut (*Juglans regia* L.) from the embryonic axis with customized nutrient media and synergy of growth regulators. **South African Journal of Botany**, v. 177, p. 598–603, 2025.

SILVA, E. C.; NOGUEIRA, R. J. M. C.; VALE, F. H. A.; ARAÚJO, F. P. de; PIMENTA, M. A. Stomatal changes induced by intermittent drought in four umbu tree genotypes. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 21, n. 1, p. 33–42, 2009a.

SILVA, E. C.; NOGUEIRA, R. J. M. C.; VALE, F. H. A.; MELO, N. F. de; ARAÚJO, F. P. de. Water relations and organic solutes production in four umbu tree (*Spondias tuberosa*) genotypes under intermittent drought. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 21, n. 1, p. 43–53, 2009b.

SILVA, E. D. B.; GONÇALVES, N. P.; PINHO, P. J. de. Limitações nutricionais para crescimento de mudas de umbuzeiro em Latossolo Vermelho distrófico no Norte de Minas. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 27, n. 1, p. 55–59, 2005.

SILVA, J. A. T. da; NEZAMI-ALANAGH, E.; BARREAL, M. E.; KHER, M. M.; WICAKSONO, A.; GULYÁS, A.; HIDVÉGI, N.; MAGYAR-TÁBORI, K.; MENDLER-DRIENYOVSZKI, N.; MÁRTON, L.; LANDÍN, M.; GALLEGO, P. P.; DRIVER, J. A.; DOBRÁNSZKI, J. Shoot tip necrosis of *in vitro* plant cultures: a reappraisal of possible causes and solutions. **Planta**, v. 252, art. 47, 2020.

SILVA, J. H. C. S.; SILVA, J. N. da; RODRIGUES, C. M.; SILVA, E. L. F. da; ALMEIDA, L. G. A. de; BERNARDO, M. K. F.; NASCIMENTO, K. L. do; RAMOS, R. da S.; NASCIMENTO, N. F. F. do; ALVES, E. U. Phenotypic expression of diaspores indicates genetic diversity in natural populations of *Spondias tuberosa* (Anacardiaceae). **Biology**, v. 14, n. 12, 2025a.

SILVA, J. N. da; PÁDUA, G. V. G. de; RODRIGUES, C. M.; SILVA, J. H. C. S.; GOMES, C. L. S.; RODRIGUES, M. H. B. S.; BERNARDO, M. K. F.; SILVA, E. L. F. da; ALMEIDA, L. G. A. de; ARAÚJO, L. D. A. de; SOUZA, A. das G.; NASCIMENTO, N. F. F. do; ALVES, E. U. Fruits and seeds as indicators of the genetic diversity of *Hymenaea martiana* (Fabaceae) in Northeast Brazil. **Biology**, v. 14, n. 10, art. 1418, 2025b.

SILVA, P. V.; FERREIRA, M. A. R.; OLIVEIRA, V. R. de; FREITAS, S. T. de. Umbu physicochemical quality, diversity in the Caatinga biome and promising genotypes for consumption. **Comunicata Scientiae**, v. 15, p. e3721, 2024.

SMIDERLE, O. J.; SOUZA, A. das G.; MENEGATTI, R. D. Controlled-release fertilizer in the production of seedlings of *Annona cacans* Warm. **Journal of Agricultural Studies**, v. 8, n. 3, p. 125, 2020.

SOARES, F. P.; PAIVA, R.; STEIN, V. C.; NERY, F. C.; NOGUEIRA, R. C.; OLIVEIRA, L. M. de. Efeito de meios de cultura, concentrações de GA_3 e pH sobre a germinação *in vitro* de mangabeira (*Hancornia speciosa* Gomes). **Ciência e Agrotecnologia**, v. 33, n. esp., p. 1847–1852, 2009.

STEIN, V. C.; PAIVA, R.; SOARES, F. P.; NOGUEIRA, R. C.; SILVA, L. C.; EMRICH, E. Germinação *in vitro* e *ex vitro* de *Inga vera* Willd. subsp. *affinis* (DC.) T.D. Penn. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 31, n. 6, p. 1702–1708, 2007.

SUDENE. **Resolução CONDEL/SUDENE n. 176, de 3 de janeiro de 2024: delimitação do Semiárido brasileiro**. Recife: Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste, 2024.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.

TEIXEIRA, M. G.; VENTICINQUE, E. M.; LION, M. B.; PINTO, M. P. The Brazilian Caatinga protected areas: an extremely unbalanced conservation system. **Environmental Conservation**, v. 48, n. 4, p. 287–294, 2021.

THAKUR, S.; SHRUTI; HASHMI, S.; MISHRA, S.; EKKA, S. K.; KUSHWAHA, A.; KUJUR, R. A Review on Plant Tissue Culture. **Asian Journal of Biology**, v. 20, n. 2, p. 14–18, 2024.

THOMAS, E.; JALONEN, R.; LOO, J.; BOSHIER, D.; GALLO, L.; CAVERS, S.; BORDÁCS, S.; SMITH, P.; BOZZANO, M. Genetic considerations in ecosystem restoration using native tree species. **Forest Ecology and Management**, v. 333, p. 66–75, 2014.

THOMAS, T. D. The role of activated charcoal in plant tissue culture. **Biotechnology Advances**, v. 26, n. 6, p. 618–631, 2008.

TRIVEDI, D. R.; JOSHI, A. G. *In vitro* shoot regeneration of *Stereospermum suaveolens* DC. using cotyledonary node and nodal explants. **Plant Tissue Culture and Biotechnology**, v. 24, n. 2, p. 235–246, 2015.

VENKATACHALAM, V.; NAKASHA, J. J.; SINNIAH, U. R. Enhanced micropropagation protocol for teak (*Tectona grandis*) through zygotic embryo and *in vitro* seedling-derived explants. **In Vitro Cellular and Developmental Biology – Plant**, v. 60, n. 6, p. 851–865, 2024.

WHITE, P. J.; BROWN, P. H. Plant nutrition for sustainable development and global health. **Annals of Botany**, v. 105, n. 7, p. 1073–1080, 2010.

XAVIER, V. L.; BARBOSA, J. M. L.; ARAUJO, K. S. de; SILVA, M. V. da; CORREIA, M. T. S.; SOUZA, M. P. de; CARNEIRO-DA-CUNHA, M. D. G. Nutritional and technological potential of Umbu (*Spondias tuberosa* Arr. Cam.) processing by-product flour. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 94, n. 1, 2022.

XU, J.; LI, X.; CHEN, S.; CHEN, L.; TANG, J.; CHEN, P.; CAI, N.; XU, Y. Integrative analyses of morpho-physiological, biochemical, and transcriptomic reveal the seedling growth response of *Pinus yunnanensis* to nitrogen and phosphorus fertilization. **Frontiers in Plant Science**, v. 15, 2024.

XU, X.; DU, X.; WANG, F.; SHA, J.; CHEN, Q.; TIAN, G.; ZHU, Z.; GE, S.; JIANG, Y. Effects of Potassium Levels on Plant Growth, Accumulation and Distribution of Carbon, and Nitrate Metabolism in Apple Dwarf Rootstock Seedlings. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, 2020.

ZHANG, J.; GE, J.; DAYANANDA, B.; LI, J. Effect of light intensities on the photosynthesis, growth and physiological performances of two maple species. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, 2022.

ZHU, W.; LIU, Y.; WU, J.; LI, C. Adaptations of *Pinus yunnanensis* seedlings to simulated light patches: growth dynamics and C:N:P stoichiometry. **Forests**, v. 16, n. 3, 2025.

4. ARTIGO 1
DIVERSIDADE, USOS TRADICIONAIS E IMPORTÂNCIA SOCIOECONÔMICA DA FAMÍLIA ANACARDIACEAE PARA O SEMIÁRIDO BRASILEIRO

RESUMO

A família Anacardiaceae inclui diversas espécies nativas que desempenham papéis ecológicos, econômicos e culturais importantes para o semiárido brasileiro, onde predomina a Caatinga. Este estudo teve como objetivo caracterizar a diversidade de espécies da família Anacardiaceae presentes na região, analisar seus usos tradicionais e discutir sua importância socioeconômica para as populações locais. Por meio de levantamento em bases de dados de herbários virtuais (SpeciesLink e Flora do Brasil 2020) e revisão da literatura, foram identificadas as principais espécies coletadas, os estados com maior número de registros e as formas de utilização das espécies. A análise revelou um predomínio de espécies como *Astronium urundeuva*, *Schinopsis brasiliensis*, *Spondias tuberosa* e *Anacardium occidentale*, amplamente utilizadas na alimentação, medicina tradicional, construção e extrativismo de produtos vegetais. Observou-se também uma concentração de coletas em áreas próximas a centros urbanos e instituições de pesquisa, indicando lacunas no conhecimento sobre a ocorrência e o uso de espécies em regiões menos acessíveis. Os resultados reforçam a relevância da família Anacardiaceae como recurso estratégico para o desenvolvimento sustentável do semiárido brasileiro e evidenciam a necessidade de ampliar os esforços de pesquisa, conservação e valorização do conhecimento tradicional associado a essa família botânica.

Palavras-chave: Caatinga, etnobotânica, espécies nativas, uso sustentável, biodiversidade vegetal.

4.1. Introdução

O semiárido brasileiro ocupa uma área de aproximadamente 1.335.298 km², abrangendo 11 estados e 1.474 municípios, incluindo todos os estados da região Nordeste e áreas do norte de Minas Gerais e do Espírito Santo (IBGE, 2024). A região é caracterizada por altas temperaturas, escassez e irregularidade das chuvas, com precipitação anual inferior ou igual a 800 mm, geralmente concentrada em poucos meses do ano (Rito *et al*., 2017). O semiárido apresenta elevada heterogeneidade ambiental e vegetacional, com predominância de formações associadas ao domínio fitogeográfico da Caatinga, mas também com ocorrência de diferentes tipos de vegetação e áreas de transição (Gonçalves *et al*., 2024; Nepomuceno *et al*., 2023; Silva *et al*., 2023).

A Caatinga caracteriza-se por vegetação predominantemente xerófita, composta por espécies arbóreas, arbustivas e herbáceas, muitas das quais apresentam adaptações à sazonalidade climática, como folhas reduzidas, presença de espinhos e caducifolia durante a estação seca (Sabino *et al*., 2016). O clima apresenta duas estações bem definidas, com uma estação seca prolongada, que pode durar até 10 meses, e uma estação chuvosa breve e irregular (Silva *et al*., 2017; Vieira *et al*., 2022). Apesar das condições climáticas restritivas, o semiárido brasileiro abriga cerca de 31 milhões de habitantes, aproximadamente 12% da população nacional, constituindo a região semiárida mais populosa do mundo (Alvalá *et al*., 2019; IBGE, 2024; Marengo, 2018).

Os recursos florestais no semiárido desempenham um papel fundamental na subsistência das populações locais. Além de representarem a principal fonte de energia da região, com a produção de lenha e carvão vegetal respondendo por cerca de 30% do abastecimento energético e uma extração anual de mais de 10 milhões de metros cúbicos (Gariglio *et al*., 2010; Faggin *et al*., 2017), esses recursos também se destacam pela oferta de

frutos comestíveis, forragem para animais e insumos de valor medicinal (Morais *et al*., 2023; Caetano *et al*., 2024). Muitas espécies nativas da Caatinga são amplamente utilizadas na alimentação humana e apresentam elevado potencial para geração de renda, especialmente por meio do extrativismo e do beneficiamento artesanal ou agroindustrial de frutos e derivados (Araújo *et al*., 2021; Medeiros *et al*., 2021; Caetano *et al*., 2023).

Entre as famílias botânicas relevantes para o semiárido brasileiro, destaca-se a Anacardiaceae. Pertencente à ordem Sapindales, essa família compreende cerca de 800 espécies distribuídas em 81 gêneros, sendo uma das mais diversas da ordem (Muellner-Riehl *et al*., 2016; Pell *et al*., 2011; Kubitzki, 2011; Pirani; Silva-Luz, 2018). Suas espécies são predominantemente encontradas em ambientes secos e planos, com ampla distribuição em regiões tropicais e subtropicais, alcançando também zonas temperadas (Pell *et al*., 2011; Muellner-Riehl *et al*., 2016).

No Brasil, a família é representada por 55 espécies distribuídas em 14 gêneros, sendo um gênero e 16 espécies endêmicas do país (Pirani; Silva-Luz, 2018; Silva-Luz *et al*., 2020). As espécies da família Anacardiaceae são, em sua maioria, plantas lenhosas produtoras de resinas, com aroma característico, especialmente em suas partes jovens, semelhante ao do fruto verde da manga (*Mangifera indica* L.). As folhas geralmente são alternas, simples ou compostas, imparipinadas. As flores, dialipétalas, com ovário súpero, unicarpelar ou tricarpelar e os frutos, secos ou carnosos, unisseminados (Santos *et al*., 2008; Pell *et al*., 2011; Hall; Gil, 2017).

Diversas espécies da família possuem relevância econômica, seja pelo fornecimento de frutos comestíveis, como *Anacardium occidentale* (caju), *Mangifera indica* (manga), *Schinus terebinthifolius* (pimenta-rosa), *Pistacia vera* (pistache) e espécies do gênero *Spondias* spp (cajá, seriguela, umbu) ou pelo uso ornamental, como *Schinus molle* (aroeira-mole) e *Tapirira guianensis* (pau-pombo). Já no semiárido brasileiro, a família Anacardiaceae se destaca por incluir espécies arbóreas com elevado potencial socioeconômico e ecológico, como *Spondias tuberosa* Arruda (umbuzeiro) e *Anacardium occidentale* L. (cajueiro), valorizadas por seus frutos, *Schinopsis brasiliensis* Engl. (baraúna) e *Astronium urundeuva* Allemão (aroeira-do-sertão), conhecidas pelo uso na medicina popular e na produção de madeira (Albuquerque *et al*., 2005; Santos *et al*., 2008).

Considerando a relevância ecológica e o potencial socioeconômico das espécies da família Anacardiaceae no semiárido brasileiro, em especial as de uso alimentar, medicinal e madeireiro, este estudo tem como objetivo caracterizar a diversidade dessa família na região, a partir de registros de herbários, observações de campo e revisão bibliográfica. Também buscamos organizar as principais formas de utilização relatadas, de modo a apoiar ações de conservação e promover o uso sustentável desses recursos no semiárido.

4.2. Métodos

4.2.1. Levantamento das espécies

Para a caracterização da diversidade da família Anacardiaceae no semiárido brasileiro, foi realizado um levantamento sistemático utilizando diferentes fontes de dados. Inicialmente, foram consultadas as bases eletrônicas *SpeciesLink* (Cria, 2026) e o Flora do Brasil 2020 (2020) em setembro de 2025, a fim de obter registros georreferenciados e dados taxonômicos das espécies com ocorrência confirmada na região.

A identificação botânica seguiu a nomenclatura validada pelo *International Plant Names Index* (IPNI) e o Flora do Brasil 2020, garantindo a padronização taxonômica e a conformidade com os sistemas botânicos atualmente aceitos.

4.2.2. Revisão sobre formas de utilização

Após o levantamento e validação das espécies de Anacardiaceae presentes no semiárido, foi conduzida uma revisão integrativa da literatura com o objetivo de identificar e sistematizar

as principais formas de utilização dessas espécies. A busca por publicações científicas e técnicas foi realizada em plataformas eletrônicas nacionais e internacionais, incluindo *Scientific Electronic Library Online* (SciELO), Google Acadêmico, Portal de Periódicos da CAPES, *Web of Science*, *ScienceDirect*, Scopus (Elsevier), *SpringerLink*. Foram utilizados descritores como Anacardiaceae, Caatinga, semiárido e uso das plantas (alimentar, medicinal e madeireiro). Os estudos selecionados incluíram artigos científicos, livros e documentos técnicos publicados até o ano de 2025.

As informações extraídas foram categorizadas de acordo com os tipos de uso atribuídos às espécies, incluindo alimentar, medicinal, madeireiro, ornamental, energético e outros usos tradicionais. Também foram consideradas informações sobre potencial de uso, ameaças e práticas de manejo ou conservação (Figura 1).

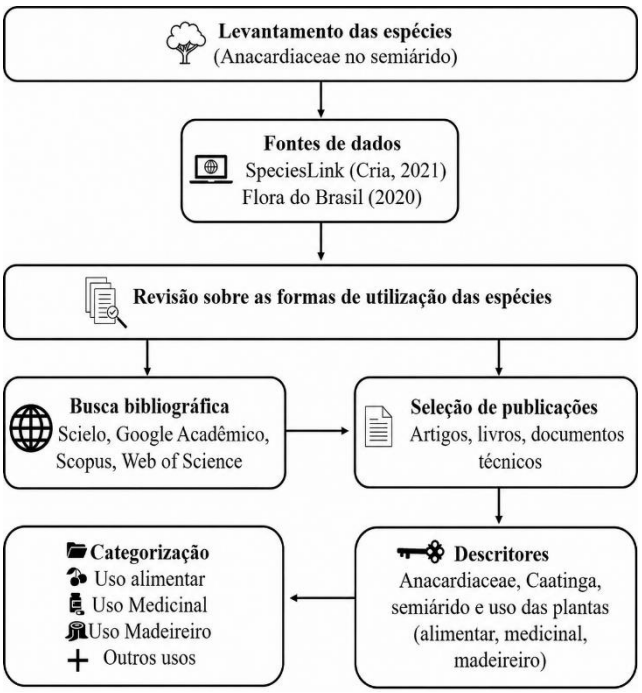


Figura 1. Fluxograma do processo metodológico.

4.3. Resultados e Discussão

4.3.1. Distribuição dos registros de coleta

A análise da distribuição das coletas de espécies da família Anacardiaceae no semiárido brasileiro, baseada em dados do *SpeciesLink*, revela um padrão desigual de amostragem botânica, tanto em termos espaciais quanto por unidade federativa (Figura 2). O mapa de densidade espacial mostra que áreas com maior número de registros concentram-se principalmente nos estados da Bahia, Pernambuco, Paraíba e Ceará, especialmente ao redor de cidades como Petrolina (PE), Juazeiro (BA), Vitória da Conquista (BA) e Feira de Santana (BA). Essas áreas são também aquelas onde há maior presença de instituições acadêmicas e centros de pesquisa botânica, o que pode ter influência sobre o esforço de coleta. Esse padrão, com registros concentrados próximos a centros urbanos e instituições de pesquisa, é consistente com vieses espaciais de coleta já descritos para o Brasil e em escala global (Oliveira *et al*., 2016; Meyer *et al*., 2016; Daru *et al*., 2018; Vargas *et al*., 2022).

Os dados quantitativos por estado confirmam esse padrão, sendo que a Bahia concentra o maior número de registros (2.536), seguida por Pernambuco (1.138), Paraíba (930) e Ceará (692). Em contrapartida, estados como Piauí (211), Alagoas (144), Sergipe (216) e Minas Gerais (258) apresentam uma quantidade significativamente menor de registros. Essas diferenças podem não refletir apenas o esforço de coleta, mas também lacunas no conhecimento

florístico, associadas a fatores como acessibilidade geográfica, financiamento à pesquisa e prioridades institucionais (Sousa-Baena *et al*., 2014; Oliveira *et al*., 2016).

Esse panorama reforça a necessidade de integração de dados adicionais (como registros de herbários regionais não digitalizados) e de estratégias coordenadas de coleta e monitoramento, com foco em regiões subamostradas. A utilização de ferramentas de modelagem de nicho ecológico também pode ser útil para prever áreas potencialmente adequadas para espécies pouco registradas e direcionar novas coletas (O'Dwyer; Green, 2010; Enquist *et al*., 2019; Bracho-Estévanez *et al*., 2024).

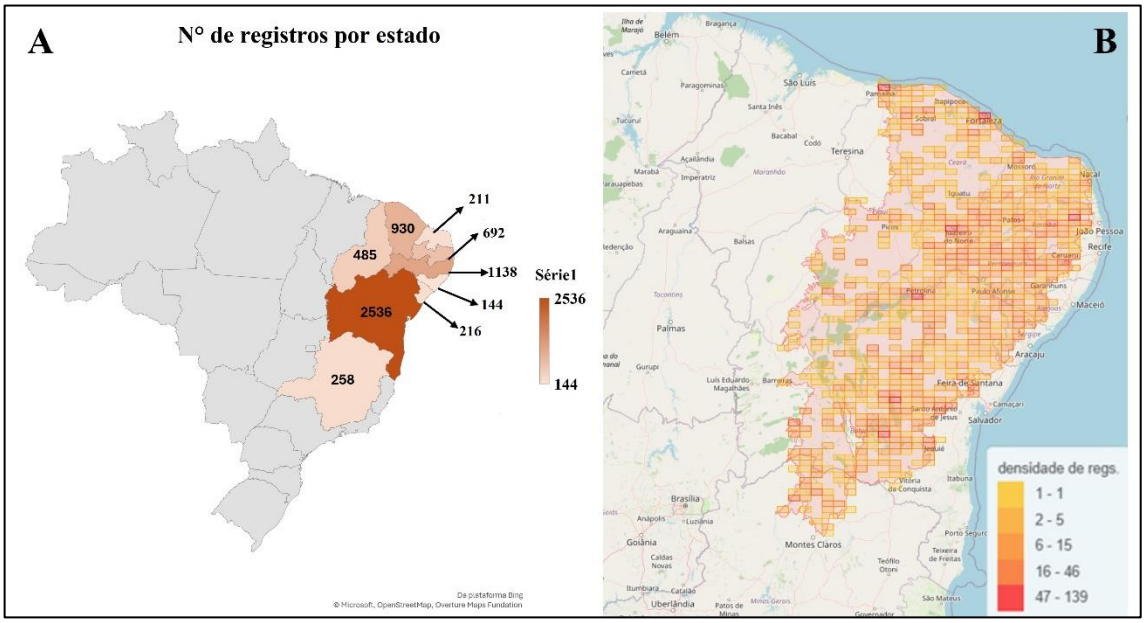


Figura 2. Distribuição dos registros de ocorrência da família Anacardiaceae na região semiárida brasileira. (A) Número total de registros por estado. (B) Densidade espacial de registros com base em quadrículas geográficas (grid), evidenciando áreas com maior esforço de coleta (em vermelho) e regiões subamostradas (em amarelo claro). Os dados foram obtidos na plataforma SpeciesLink, com recorte espacial sobre a Caatinga e o semiárido brasileiro.

4.3.2. Composição florística da família Anacardiaceae no semiárido brasileiro

A análise da composição florística da família Anacardiaceae no semiárido brasileiro através de registros de herbários no portal de dados SpeciesLink revelou um total de 31 espécies distribuídas em 11 gêneros, com predominância dos gêneros *Spondias* (9 spp.) e *Astronium* (6 spp.). Do total, 17 espécies (54,8%) apresentam ocorrência nativa no semiárido, enquanto as demais 14 espécies (45,1%) são exóticas ou nativas de outras regiões do Brasil, com registros associados a cultivos agrícolas ou introdução para ornamentação e paisagismo (Tabela 1).

No caso das espécies exóticas, observa-se a presença de táxons introduzidos no Brasil e amplamente cultivados para fins alimentares, como *Mangifera indica* L. (mangueira), *Spondias purpurea* L. (seriguela), *Spondias dulcis* Parkinson (cajá-manga) e *Spondias pinnata* (L.fil.) Kurz (ameixa-do-porco). Além disso, espécies nativas de outras regiões brasileiras, mas alóctones em relação ao semiárido, também podem ter sido introduzidas nessa região com finalidades agrícolas ou alimentícias. É o caso de *Spondias globosa* J.D.Mitch. & Daly, *Spondias macrocarpa* Engl., *Spondias venulosa* (Mart. ex Engl.) Engl. e *Anacardium giganteum* W.Hancock ex Engl., cujas ocorrências no semiárido estão provavelmente associadas ao cultivo doméstico ou comercial, e não à presença natural.

Outro grupo de interesse é composto por espécies nativas de outras regiões do Brasil, que devido ao seu potencial uso para ornamentação ou arborização urbana, foram introduzidas no semiárido, sendo registradas principalmente em áreas urbanas ou periurbanas do semiárido. Como é o caso de *Astronium glaziovii* Mattick, *Astronium nelson-rosae* Santin, *Lithraea brasiliensis* Marchand, *Schinus lentiscifolia* Marchand, *Schinus rhoifolia* Mart. e *Thyrsodium*

puberulum J.D.Mitch. & Daly. Embora não sejam naturais do semiárido, essas espécies apresentam atributos estéticos e funcionais, como copa ampla e resistência relativa à seca que favorecem seu uso paisagístico em praças e avenidas. Seus registros no semiárido, portanto, não refletem uma distribuição ecológica natural, mas sim um processo de introdução antrópica intencional, voltado à valorização paisagística de ambientes urbanos. Ainda assim, é importante considerar critérios ecológicos para o uso dessas espécies, evitando substituições indevidas da vegetação nativa, especialmente em áreas de transição ou de conservação.

Entre as espécies registradas no semiárido, é possível identificar diferentes padrões de distribuição fitogeográfica. Algumas apresentam ampla distribuição no território brasileiro, ocorrendo em múltiplos biomas e evidenciando elevada plasticidade ecológica. É o caso de *Astronium fraxinifolium* Schott*, Astronium graveolens* Jacq., *Schinus terebinthifolia* Raddi, *Tapirira guianensis* Aubl., *Tapirira obtusa* (Benth.) J.D.Mitch. e *Spondias mombin* L., todas com registros em formações vegetais de distintos domínios fitogeográficos como Amazônia, Cerrado, Mata Atlântica, Pantanal e Caatinga. Essas espécies tendem a ocorrer em ambientes naturais ou cultivados dentro do semiárido.

Por outro lado, outras espécies apresentam distribuição mais restrita, sendo endêmicas ou quase endêmicas do semiárido. Destacam-se *Apterokarpos gardneri* (Engl.) Rizzini, *Cyrtocarpa caatingae* J.D.Mitch. & Daly, *Spondias bahiensis* P. Carvalho, Van den Berg & M. Machado e *Spondias tuberosa* Arruda, cujas ocorrências estão fortemente associadas às condições abióticas de restrição hídrica, uma vez que apresentam adaptações morfológicas e fisiológicas que favorecem a sobrevivência em períodos prolongados de estiagem (Santos *et al*., 2008; Mertens *et al*., 2017).

A identificação desses padrões de distribuição é fundamental para embasar ações de conservação, manejo florestal e restauração ecológica, considerando tanto a proteção de táxons endêmicos quanto o aproveitamento sustentável das espécies amplamente distribuídas (Santos *et al*., 2023). A ocorrência localizada dessas espécies reforça a importância de áreas prioritárias para a conservação da flora nativa, sobretudo diante da crescente pressão antrópica sobre os remanescentes florestais da região (Leal *et al*., 2005; Silva *et al*., 2017).

Cabe destacar ainda a ocorrência de determinadas espécies em ambientes mais úmidos e microclimas específicos do semiárido, como matas ciliares, veredas e regiões de relevo elevado, a exemplo da Chapada Diamantina. Espécies como *Tapirira guianensis* Aubl., *Tapirira obtusa* (Benth.) J.D.Mitch., *Thyrsodium spruceanum* Benth., *Lithraea molleoides* (Vell.) Engl. e *Anacardium humile* A.St.-Hil. são registradas nessas áreas, onde a maior disponibilidade hídrica e a presença de solos mais profundos favorecem sua ocorrência. Essas áreas funcionam como refúgios ecológicos e contribuem para o aumento da diversidade florística regional, abrigando táxons típicos de formações florestais e savânicas de regiões adjacentes ao semiárido (Rodal *et al*., 2005; Santos *et al*., 2008; Ribeiro-Filho *et al*., 2009; Matos; Felfili, 2010; Funch *et al*., 2021).

Tabela 1. Lista de espécies da família Anacardiaceae com registros no semiárido brasileiro.

Espécie	Nome Popular	Bioma	NS	Observações
Anacardium giganteum W.Hancock ex Engl.	Cajuaçu-vermelho, cajuaçu, cajuí	Amazônia	Não	Espécie típica da Amazônia. Registros no semiárido podem ser equívocos de identificação, cultivo ou ocorrências fora de sua distribuição natural.
Anacardium humile A.St.-Hil.*	Cajuzinho-do-cerrado	Cerrado	Sim	Espécie tipicamente do Cerrado. Ocorrência no semiárido está associada a áreas de Cerrado, como na Chapada Diamantina.

...continua...

Tabela 1. Cont.

Anacardium occidentale L.	Cajueiro	Amazônia, Caatinga, Cerrado, Mata Atlântica	Sim	Espécie nativa, amplamente cultivada e com ocorrência natural em diversas formações vegetais no Brasil.
Apterokarpos gardneri (Engl.) Rizzini*	Aroeira-mole	Caatinga	Sim	Espécie nativa e endêmica do Brasil, com ocorrência restrita à Caatinga.
Astronium concinnum Schott*	Aroeira-rajada	Caatinga, Cerrado, Mata Atlântica	Sim	Espécie nativa. Ocorrência na Caatinga registrada em áreas mais preservadas.
Astronium fraxinifolium Schott	Gonçalo-alves	Amazônia, Cerrado, Mata Atlântica, Caatinga	Sim	Espécie nativa com ampla distribuição, incluindo áreas de Caatinga.
Astronium glaziovii Mattick	Gibatão	Cerrado, Mata Atlântica	Não	Espécie nativa do Sudeste. Registros no semiárido são improváveis para populações naturais e podem indicar equívocos de identificação ou registros isolados, como na arborização.
Astronium graveolens Jacq.	Guaritá	Amazônia, Caatinga, Cerrado, Mata Atlântica, Pampa	Sim	Espécie nativa com ampla distribuição. Presente também no semiárido.
Astronium nelson-rosae Santin	Gonçalo, Aroeira	Cerrado, Mata Atlântica	Não	Espécie nativa do Centro-Oeste e Sudeste. Registros no semiárido podem estar associados à arborização.
Astronium urundeuva (M.Allemão) Engl.*	Aroeira-do-sertão	Caatinga, Cerrado, Mata Atlântica, Pampa, Pantanal	Sim	Espécie nativa, madeira de lei e uso medicinal. Característica da Caatinga e Cerrado.
Cyrtocarpa caatingae J.D.Mitch. & Daly	Canjerana	Caatinga, Cerrado	Sim	Espécie nativa e endêmica do Brasil, ocorrente em Caatinga e Cerrado.
Lithraea brasiliensis Marchand	Aroeira-de-bugre, pau-de-bugre	Mata Atlântica e Pampa	Não	Espécie nativa do Sudeste e Sul. Registros no semiárido podem estar associados a ornamentação.
Lithraea molleoides (Vell.) Engl.	Bugreiro, aroeira-brava	Cerrado, Mata Atlântica, Pampa, Pantanal	Sim	Espécie nativa com ampla distribuição, presente no semiárido em áreas de campo-rupestre na Chapada Diamantina.
Mangifera indica L.	Mangueira	Cultivada (Origem Asiática)	Não	Espécie de origem asiática, amplamente cultivada para fins comerciais e domésticos no Brasil.
Schinopsis brasiliensis Engl.*	Braúna, Baraúna	Caatinga, Cerrado	Sim	Espécie nativa e característica da Caatinga e Cerrado. Madeira valorizada.
Schinus lentiscifolia Marchand	Aroeira-do-campo, caroba	Cerrado, Mata Atlântica, Pampa	Não	Espécie nativa do Sul e Sudeste. Registros no semiárido podem estar associados à arborização urbana.
Schinus rhoifolia Mart.*	Aroeira, Copaeirinha	Mata Atlântica	Não	Espécie com ampla distribuição. Seu domínio primário é a Mata Atlântica. No semiárido pode estar associada a ornamentação.
Schinus terebinthifolia Raddi*	Aroeira-vermelha	Caatinga, Cerrado, Mata Atlântica, Pampa	Sim	Espécie nativa amplamente distribuída no Brasil. Apesar de ocorrer no semiárido, registros na Caatinga provavelmente estão associados à introdução.

...continua...

Tabela 1. Cont.

Spondias bahiensis P. Carvalho, Van den Berg & M. Machado	Umbu-cajá	Caatinga	Sim	Espécie nativa e endêmica do Brasil. Ocorrência restrita à Caatinga, em cultivos.
Spondias dulcis Parkinson*	Cajá-manga, taperebá-açu	Cultivada (Origem Polinésia)	Não	Espécie de origem polinésia, cultivada no Brasil para consumo de frutos.
Spondias globosa J.D.Mitch. & Daly	Cajá-Açu-Redondo, taperebá	Amazônia	Não	Espécie nativa da Amazônia. Registros no semiárido podem estar associados ao cultivo.
Spondias macrocarpa Engl.	Cajá-redondo, cajá-mirim	Mata Atlântica	Não	Espécie nativa da Mata Atlântica. Registros no semiárido podem estar associados ao cultivo.
Spondias mombin L.*	Cajá	Caatinga, Amazônia, Cerrado, Mata Atlântica	Sim	Espécie nativa amplamente distribuída. Cultivada. Presente na Caatinga preservada.
Spondias pinnata (L.fil.) Kurz	Manga-da-China	Cultivada (Origem Ásia)	Não	Espécie de origem asiática, cultivada em diversas regiões tropicais.
Spondias purpurea L.	Ciriguela, seriguela	Cultivada (Origem América Central/México)	Não	Espécie de origem Neotropical, amplamente cultivada em regiões quentes.
Spondias tuberosa Arruda	Umbuzeiro	Caatinga	Sim	Espécie nativa e endêmica do Brasil. Importância cultural e econômica no semiárido e é endêmica da Caatinga.
Spondias venulosa (Mart. ex Engl.) Engl.	Acaipó-iba, cajá	Mata Atlântica	Não	Espécie nativa da Mata Atlântica. Registros no semiárido são muito improváveis para populações naturais e podem estar associados a cultivos.
Tapirira guianensis Aubl.	Pau-pombo	Amazônia, Caatinga, Cerrado, Mata Atlântica, Pantanal	Sim	Espécie nativa, presente em diversas formações. Presente em áreas úmidas do semiárido.
Tapirira obtusa (Benth.) J.D.Mitch.*	Pau-pombo	Amazônia, Cerrado, Mata Atlântica	Sim	Espécie nativa. Presente em florestas e cerrado. No semiárido, ocorre em matas ciliares e áreas mais úmidas.
Thyrsodium puberulum J.D.Mitch. & Daly	Cabatã-de-leite	Amazônia	Não	Espécie nativa da Amazônia. Registros no semiárido podem estar associados à arborização.
Thyrsodium spruceanum Benth.*	Amaparana; Manga-brava	Amazônia, Mata Atlântica	Sim	Espécie nativa amplamente distribuída. No semiárido, ocorre em áreas úmidas de relevo elevado.

NS = nativa do semiárido. *Sinônimos com registro: *Anacardium humile* A.St.-Hil. - *A. curatellaefolium* A.St.-Hil., *A. microcarpum* Ducke; *Apterokarpos gardneri* (Engl.) Rizzini - *Loxopterygium gardneri* Engl.; *Astronium concinnum* Schott - *A. macrocalyx* (Engl.) Engl.; *Astronium urundeuva* (M.Allemão) Engl. - *Myracrodruon urundeuva* M.Allemão, *A. gardneri* Mattick; *Schinopsis brasiliensis* Engl. - *S. brasiliensis* var. *glabra* Engl., *S. glabra* (Engl.) F.A.Barkley & T.Mey.; *Schinus rhoifolia* Mart. - *S. terebinthifolia* var. *rhoifolia* (Mart.) Engl., *S. terebinthifolius* var. *rhoifolius* (Mart.) Engl.; *Schinus terebinthifolia* Raddi - *S. terebinthifolia* var. *raddiana* Engl.; *Spondias dulcis* Parkinson - *S. cytherea* Sonn.; *Spondias mombin* L. - *S. lutea* L.; *Tapirira obtusa* (Benth.) J.D.Mitch. - *T. marchandii* Engl., *T. peckoltiana* Engl.; *Thyrsodium spruceanum* Benth. - *T. salzmannianum* Benth., *T. schomburgkianum* Benth.

4.3.3. Usos da família Anacardiaceae no semiárido

A análise dos usos das espécies da família Anacardiaceae nativas do semiárido brasileiro revela uma ampla gama de usos tradicionais, comerciais e potenciais formas de utilização. Entre as 17 espécies analisadas (Tabela 2), observa-se a presença de múltiplas formas de

aproveitamento, incluindo aplicações medicinais (M), alimentares (A), madeireiras (Ma) e outros usos diversos (O), como uso ornamental, produção de óleo essencial, taninos e aplicação em reflorestamento e recuperação de áreas degradadas.

Uma das formas de aproveitamento mais proeminentes das espécies da família Anacardiaceae nativas do semiárido é o uso medicinal (Oliveira *et al*., 2023). Propriedades como anti-inflamatórias, antioxidantes, gastroprotetoras, cicatrizantes e antimicrobianas são frequentemente relatadas para várias espécies, como *A. urundeuva*, *S. brasiliensis*, *A. occidentale*, *S. tuberosa*, *S. terebinthifolia* e *S. mombin* (Sameh *et al*., 2018; Salehi *et al*., 2020; Linhares *et al*., 2022; Nascimento *et al*., 2023; Ogunro *et al*., 2023). Tais propriedades estão geralmente associadas à presença de compostos fenólicos, flavonoides, taninos e óleos essenciais, o que evidencia o potencial farmacológico da flora nativa da Caatinga (Luna *et al*., 2022; Albuquerque-Silva *et al*., 2025). A diversidade de partes vegetais utilizadas, incluindo folhas, cascas, frutos e troncos, sugere o conhecimento tradicional profundo associado a essas espécies (Oliveira *et al*., 2022).

O uso alimentar é destacado principalmente por espécies do gênero *Spondias* e *Anacardium*, cujos frutos são amplamente consumidos. Espécies como *S. tuberosa* (umbu), *S. mombin* (cajá) e *A. occidentale* (caju) são exemplos de espécies que não só integram a dieta local, mas também formam cadeias produtivas importantes. Seus frutos são consumidos *in natura* ou processados em polpas, sucos, doces, licores e bebidas fermentadas, agregando valor nutricional e econômico às comunidades (Moura *et al*., 2011; Oliveira *et al*., 2024).

Com relação aos usos madeireiros, espécies como *A. fraxinifolium*, *A. concinnum*, *A. graveolens*, *A. urundeuva* e *S. brasiliensis* fornecem madeira com alta densidade e resistente a ambientes externos, sendo muito utilizadas na construção civil, naval, movelaria e produção de estacas e mourões (Paes *et al*., 2004; Paes *et al*., 2005; Paes *et al*., 2009; Keller *et al*., 2017). A qualidade da madeira e a disponibilidade regional justificam a utilização tradicional dessas espécies, embora a exploração desordenada represente uma ameaça à conservação de algumas dessas espécies (Barros *et al*., 2016).

Além dos usos diretos, várias espécies apresentam aplicações ecológicas e tecnológicas complementares, como recuperação de áreas degradadas e uso ornamental e paisagístico, a exemplo de *Schinus terebinthifolia*, *Tapirira guianensis* e *Thyrsodium spruceanum*. Outras espécies destacam-se pela produção de taninos, resinas, gomas e óleos essenciais. Tais usos reforçam a importância dessas espécies não apenas para comunidades tradicionais, mas também para o desenvolvimento de bioeconomias regionais sustentáveis.

Tabela 2. Espécies da família Anacardiaceae nativas do semiárido brasileiro, com respectivas partes utilizadas, principais usos registrados na literatura científica. (M: medicinal; A: alimentar; Ma: madeireiro; O: outros).

Espécie	Parte usada	Principais usos	Referências
Anacardium occidentale	Fruto, folhas, pseudofruto, sementes	**M:** anti-inflamatório, antioxidante, antimicrobiano; **A:** *in natura*, suco, castanha; **Ma:** construção, carvão; **O**: óleo, taninos, goma	Paes *et al*., 2006; Broinizi *et al*., 2007; Lafont *et al*., 2011; Meunier; Ferreira, 2015; Almeida *et al*., 2017; Agostine-Costa *et al*., 2018; Araújo *et al*., 2018a; Santos *et al*., 2024
Anacardium humile	Fruto, folhas, pseudofruto, sementes	**M:** antioxidante, antiulcerogênico; **A:** fruto, pseudofruto, sementes; **Ma:** lenha; **O:** óleo, meliponicultura	Carvalho, 2005; Luiz-Ferreira *et al*., 2012; Lima Júnior *et al*., 2021
Apterokarpos gardneri	Casca	**M:** anti-inflamatório	Borges *et al*., 2024

...continua...

Tabela 2. Cont.

Astronium concinnum	Tronco, planta inteira	**Ma:** construção civil, naval; **O:** arborização, paisagismo	Souza *et al*., 2012; Vieira *et al*., 2022
Astronium fraxinifolium	Casca, tronco, planta inteira	**M:** anti-inflamatório, cicatrizante; **Ma:** construção, dormentes; **O:** reflorestamento, paisagismo	Guarim Neto & Morais, 2003; Baptistel *et al*., 2014; Feitosa *et al*., 2011; Martins *et al*., 2018
Astronium graveolens	Casca, tronco, planta inteira	**M:** antibacteriana, antioxidante, antiangiogênica; **Ma:** embarcações, construção civil, lenha; **O:** reflorestamento, repelente, paisagismo	Chen *et al*., 1984; Santos *et al*., 2011; Hernández *et al*., 2013; Hernández *et al*., 2013; Araújo *et al*., 2014; Melo Júnior;Barros, 2017; Lutyński *et al*., 2023
Astronium urundeuva	Folhas, frutos, casca, tronco, árvore inteira	**M:** anti-inflamatório, cicatrizante, antiúlcera, antifúngica; **Ma:** construção civil, movelaria, estacas, mourões, lenha; **O:** madeira de lei, reflorestamento, arborização urbana	Lucena *et al*., 2011; Keller *et al*., 2017; Bonifácio *et al*., 2019; Oliveira *et al*., 2022; Longui *et al*., 2024
Cyrtocarpa caatingae	—	—	—
Lithraea molleoides	Parte aérea, folhas, frutos	**M:** gastroprotetor, antibacteriana, antiulcerogênica, antioxidante; **Ma:** postes, construção civil, marcenaria; **O:** taninos, bebidas, adoçante para mate	Shimizu *et al*., 2006; Carvalho *et al*., 2006a; Araujo *et al*., 2006; López *et al*., 2011; Garro *et al*., 2015; López *et al*., 2021
Schinopsis brasiliensis	Casca, folhas, tronco	**M:** anti-inflamatórias, antinociceptivas, antioxidantes; **Ma:** mourões, estacas, construção civil, naval, dormentes para ferrovias; **O:** reflorestamento	Carvalho, 2008; Nunes *et al*., 2015; Santos *et al*., 2017; Santos *et al*., 2018; Linhares *et al*., 2022
Schinus terebinthifolia	Frutos, sementes, folhas, casca, tronco	**M:** anti-inflamatórias, antioxidante, anticancerígena; **A:** condimento; **Ma:** mourões, lenha, carvão; O: reflorestamento, paisagismo, óleo essencial	Carvalho, 2003; José *et al*., 2005; Bendaoud *et al*., 2010; Rocha *et al*., 2018; Buturi *et al*., 2015; Barraqui *et al*., 2023
Spondias mombin	Frutos, folhas, casca, tronco	**M:** anti-inflamatório, antioxidante, cicatrizante, gastroprotetor; **A:** consumo in natura, polpa, licores; **Ma:** marcenaria, embarcações; **O:** farinha de sementes	Carvalho, 2006b; Tiburski *et al*., 2011; Cabral *et al*., 2016; Brito *et al*., 2018; Cristofoli *et al*., 2018; Souza *et al*., 2022; Ogunro *et al*., 2023; Oliveira *et al*., 2023
Spondias bahiensis	Fruto, folhas	**A**: consumo *in natura*, polpas, geleias, cerveja	Santos *et al*., 2010; Araújo *et al*., 2018b; Valentim *et al*., 2021; Nascimento *et al*., 2024
Spondias tuberosa	Fruto, sementes, folhas, casca, tronco	**M:** antifúngico, antidiabético, antioxidante, antibacteriano; **A:** polpas, sucos, doces, geleias, licores, sorvetes, umbuzada; **Ma**: lenha, móveis, caixotaria; **O:** reflorestamento	Carvalho, 2008; Mertens *et al*., 2015; Barbosa *et al*., 2018; Santos *et al*., 2023; Rodrigues *et al*., 2024
Tapirira guianensis	Folhas, casca, tronco, sementes, planta inteira	**M:** antioxidante, citoprotetora, antimicrobiana; **Ma:** movelaria, marcenaria, construção; **O:** reflorestamento, artesanato	Alvino *et al*., 2005; Carvalho, 2006c; Roumy *et al*., 2009; Costa *et al*., 2014; Silva *et al*., 2020; Patient *et al*., 2022; Crispim *et al*., 2025

...continua...

Tabela 2. Cont.

Tapirira obtusa	Folhas	**M:** citotóxica, antioxidante, antiproliferativa; **Ma:** lenha; **O:** alelopatia	Correia *et al*., 2001; Rodrigues *et al*., 2002; Matias *et al*., 2021; Vitorelli-Venâncio *et al*., 2025
Thyrsodium spruceanum	Tronco, planta inteira	**Ma:** lenha; **O:** paisagismo	Cruz *et al*., 2020; Silva; Moura, 2021; Almeida; Silva, 2024

4.3.4. Frequência de registros por espécie

O levantamento do número de registros depositados em herbários nacionais, com base em dados do *SpeciesLink*, revela um padrão desigual de representatividade entre as espécies da família Anacardiaceae com ocorrência no semiárido brasileiro. A espécie *A. urundeuva* destaca-se como a mais registrada, superando 1.100 coletas (Figura 3). Esta expressiva representatividade pode ser atribuída à sua ampla distribuição fitogeográfica, ocorrência em diferentes domínios fitogeográficos (Caatinga, Cerrado, Mata Atlântica e Pampa), além de sua relevância econômica como madeira de lei e seu reconhecido uso na medicina tradicional (Nascimento *et al*., 2022).

Em seguida, *S. brasiliensis*, *S. tuberosa* e *A. occidentale* também se destacam com muitos registros de coleta. A primeira é uma espécie lenhosa característica da Caatinga e do Cerrado, de valor madeireiro e ecológico, enquanto a segunda é endêmica da Caatinga e possui grande importância sociocultural e econômica para o semiárido, sendo amplamente cultivada e estudada (Lins Neto *et al*., 2010). No caso de *A. occidentale*, seu cultivo extensivo e a ocorrência em áreas nativas podem justificar a elevada frequência em coletas botânicas. O alto número de registros dessas espécies reforça não apenas seu valor ecológico, mas também o interesse científico e econômico que despertam (Figura 3).

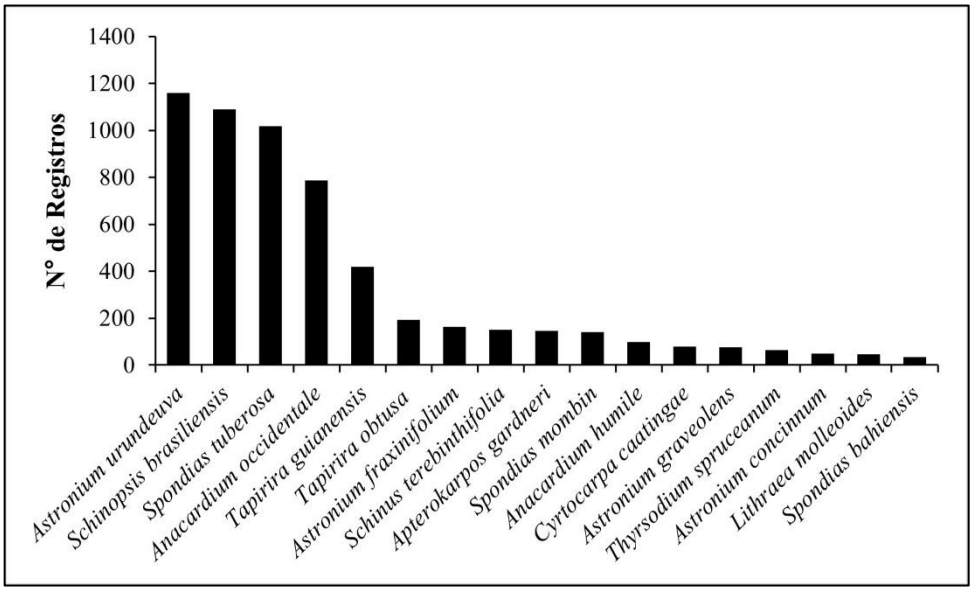


Figura 3. Número de registro por espécies da família Anacardiaceae no semiárido brasileiro. Fonte: *SpeciesLink*.

Diante da elevada frequência de registros em herbários nacionais e da reconhecida importância ecológica, econômica e sociocultural, essas quatro espécies destacam-se por sua relevância no contexto regional. Essas espécies estão entre as mais importantes da flora do semiárido e estão distribuídas amplamente por essa região. A seguir, cada uma das espécies mais representativas é apresentada individualmente, com ênfase em suas características taxonômicas, distribuição geográfica, usos tradicionais e potenciais aplicações, com o objetivo de fornecer subsídios para ações voltadas à conservação e ao uso sustentável desses recursos vegetais.

4.3.5. Caracterização e importância da espécie *Astronium urundeuva* (M. Allemão) Engl.

Astronium urundeuva (M. Allemão) Engl., que tem como basinômio *Myracrodruon urundeuva* Allemão (Mitchell; Daly, 2017; Silva-Luz *et al*., 2020), é uma espécie arbórea nativa do Brasil, conhecida por diversos nomes populares, como aroeira, aroeira-do-sertão, aroeira-do-campo, aroeira-preta e aroeira-verdadeira. A etimologia do nome "aroeira" remonta ao termo "araroeira", derivado da junção de "arara" e o sufixo "-eira", em referência ao hábito das araras de se abrigarem e se alimentarem nessa espécie (Maia, 2012). *A. urundeuva* apresenta ampla distribuição no território brasileiro, ocorrendo em diferentes domínios fitogeográficos, incluindo a Mata Atlântica, o Cerrado, o Pampa, o Pantanal e, sobretudo, a Caatinga (Pareyn *et al*., 2018; Silva-Luz *et al*., 2020).

A *A. urundeuva* é uma árvore de fuste geralmente alto e reto, com copa ampla, apresentando altura variável entre 5 e 20 metros nos biomas Caatinga e Cerrado, podendo atingir até 30 metros na Mata Atlântica (Pareyn *et al*., 2018; Lorenzi, 2020). As folhas são compostas, alternas, pilosas e imparipinadas, geralmente com cinco a nove folíolos. Trata-se de uma espécie dióica, decídua, heliófila e seletiva xerófita. As inflorescências são do tipo panícula, medindo de 12 a 20 cm de comprimento, com flores sésseis e unissexuais. O fruto é uma drupa arredondada, indeiscente, com 3 a 4 mm de diâmetro e coloração marrom-escura quando seca. As sépalas persistentes das flores permanecem aderidas ao fruto, formando estruturas aladas que auxiliam na dispersão (Maia, 2012; Lima, 2012; Lorenzi, 2020) (Figura 4).

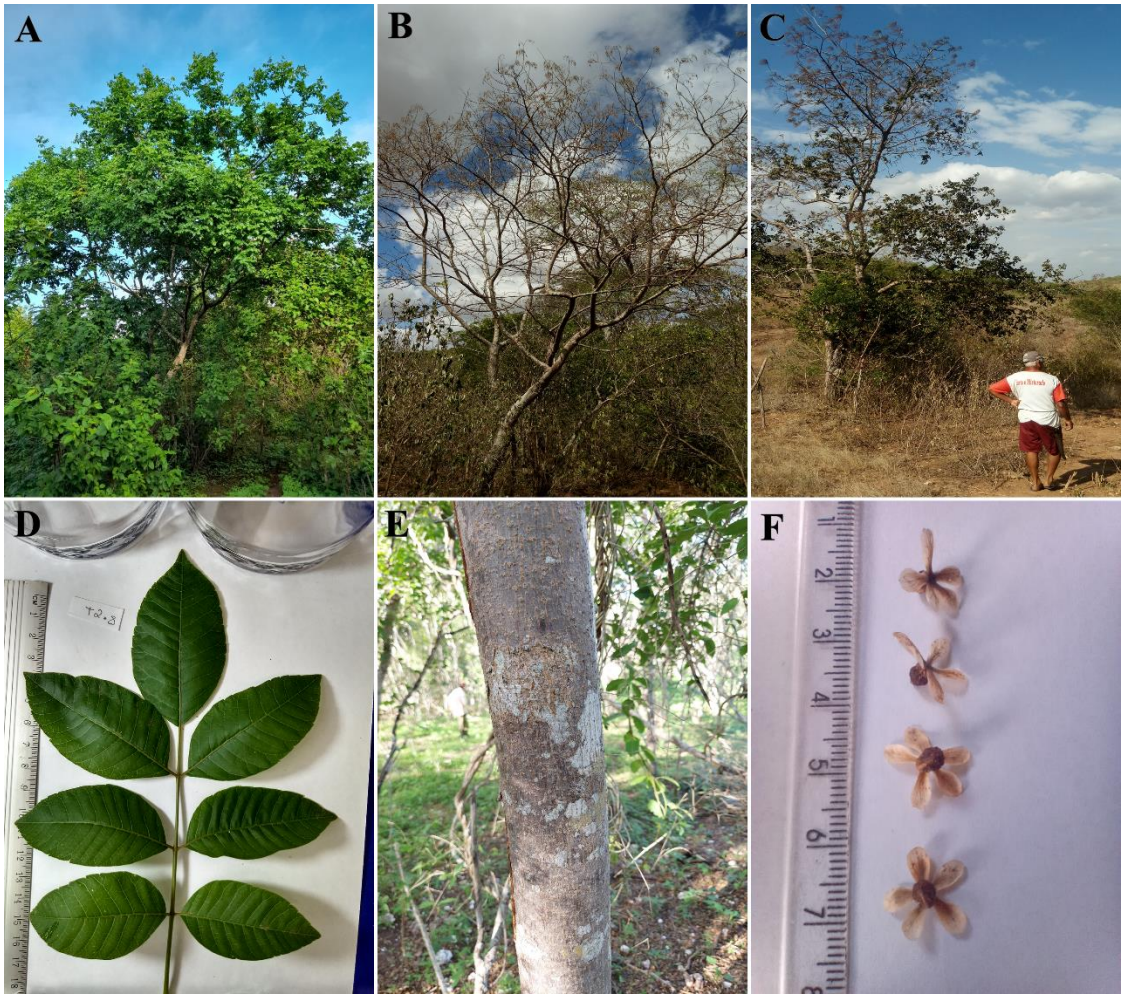


Figura 4. (A) aspecto geral de um indivíduo adulto de aroeira-do-sertão na época chuvosa, (B) e (C) aspecto geral de um indivíduo adulto na época seca em período de frutificação, (D) aspecto geral da folha, (E) aspecto geral do caule e (F) frutos/sementes com alas persistentes. Fonte: Augusto Nascimento.

A madeira da *A. urundeuva* é de excelente qualidade, destacando-se por sua alta densidade, resistência mecânica e durabilidade natural, sendo considerada praticamente imputrescível (Longui *et al*., 2024). Essas características fazem com que ela seja amplamente empregada em construções civis, tanto internas quanto externas, além da fabricação de estacas, mourões e outros implementos rurais (Lima, 2012; Maia, 2012; Pareyn *et al*., 2018; Lorenzi, 2020). Paralelamente ao seu valor madeireiro, a espécie desperta interesse da indústria farmacêutica em virtude de suas propriedades terapêuticas, incluindo ações cicatrizante, anti-inflamatória, analgésica, antifúngica e antimicrobiana (Viana *et al*., 2003; Souza *et al*., 2006; Galvão *et al.,* 2018; Matos *et al*., 2019).

Além de seu valor econômico, *A. urundeuva* apresenta significativa importância ecológica, especialmente na Caatinga, por florescer e frutificar durante a estação seca, período caracterizado pela escassez de recursos hídricos e alimentares. Suas flores constituem uma valiosa fonte de néctar e pólen para diversas espécies de abelhas nativas, como *Melipona mandacaia*, *Melipona asilvai*, *Trigona spinipes* e *Friesiomelita doederleini* (Kiill *et al*., 2010). Os frutos, por sua vez, constituem importante recurso alimentar para diferentes espécies de psitacídeos, incluindo o periquito-da-caatinga (*Aratinga cactorum*), o periquito-rei (*Aratinga aurea*) e o tuim (*Forpus xanthopterygius*), sobretudo durante a estação seca (Vasconcelos *et al*., 2006).

Diversos estudos etnobotânicos têm evidenciado o amplo uso tradicional de *A. urundeuva* em comunidades rurais do semiárido brasileiro. Foram identificadas múltiplas formas de uso da espécie, incluindo categorias como forragem, combustível (lenha e carvão), construção (estacas, linhas e mourões), medicina humana e veterinária, tecnologia (torno de parede, canga, ferramentas e móveis) e até uso como veneno ou abortivo (Lucena *et al.*, 2011).

O uso tradicional de *A. urundeuva* é amplamente difundido em comunidades rurais do Nordeste do Brasil, sendo utilizada na construção, como combustível e principalmente para fins medicinais (Lins Neto *et al*., 2008). Em cidades do interior do Maranhão e de Pernambuco, foi registrada entre as plantas medicinais mais utilizadas pelas populações locais (Silva; Albuquerque, 2005; Penido *et al*., 2016). No interior do Ceará, destacam-se o uso da entrecasca e do fruto cozido na produção de fitoterápicos, com aplicações como banhos de assento, sabonetes cicatrizantes, antialérgicos e bactericidas, além do preparo de chás e infusos empregados no tratamento de úlceras e gastrites (Pereira *et al*., 2014).

A popularidade e a diversidade de usos dessa espécie são apontadas como fatores de risco para a sua conservação, contribuindo para a pressão sobre populações naturais e possível extinção local (Lucena *et al*., 2011). Considerando sua importância econômica, tanto pela qualidade da madeira quanto pelas propriedades farmacológicas, *A. urundeuva* tem sido amplamente explorada de forma extrativista, o que resultou em reduções significativas das populações naturais e na consequente perda de variabilidade genética. Em função do elevado grau de ameaça, a espécie já foi incluída na lista de plantas ameaçadas de extinção no Brasil (Brasil, 2008), apesar de não figurar na última lista divulgada, suas populações continuam a ser reduzidas.

4.3.6. Caracterização e importância da espécie *Schinopsis brasiliensis* Engl.

Schinopsis brasiliensis Engl., pertencente à família Anacardiaceae, é popularmente conhecida como baraúna, braúna, braúna-do-sertão, maria-preta, braúna-parda, quebracho, entre outros nomes. Trata-se de uma árvore nativa do Brasil, característica da Caatinga, cuja distribuição abrange desde a região Nordeste até o norte de Minas Gerais (Lorenzi, 2020; Maia, 2012). O nome popular provavelmente deriva da língua tupi, a partir de *ibirá-una* (madeira preta) ou *muira-una* (muira = madeira + una = preto) (Maia, 2012).

A *S. brasiliensis* é considerada uma das maiores árvores com ocorrência na Caatinga, alcançando entre 10 e 15 metros de altura, com fuste reto de até 60 cm de diâmetro. Suas folhas são alternas, compostas, imparipinadas, com 7 a 17 folíolos oblongos. A inflorescência é do

tipo panícula, com até 12 cm de comprimento; as flores, pequenas (3 a 4 mm de diâmetro), são brancas e aromáticas. O fruto corresponde a uma drupa alada, de até 3,5 cm de comprimento, coloração castanho-clara e consistência esponjosa. As sementes são obovoides, tendendo à forma reniforme, com aproximadamente 1,4 cm de comprimento, 1 cm de largura e 0,5 cm de espessura, apresentando coloração amarelo-clara, superfície rugosa e envoltório lenhoso de difícil ruptura (Figura 5) (Maia, 2012; Miranda *et al*., 2018).



Figura 5. (A) aspecto geral da planta adulta, (B) aspecto geral do caule, (C) aspecto geral das folhas, (D) inflorescência, (E) frutos e (F) sementes de baraúna. Fonte: Augusto Nascimento.

A *S. brasiliensis* pode ser utilizada na arborização de praças e parques, além de sua madeira ser amplamente explorada para a produção de mourões, estacas, na construção civil e na indústria madeireira (Maia, 2012). Outro aspecto relevante da espécie é o seu potencial biotecnológico, decorrente dos compostos químicos isolados de seus órgãos vegetais. As folhas apresentam substâncias com atividade antimicrobiana, cuja eficácia foi comprovada por diversos autores em testes contra cepas fúngicas (Chaves *et al*., 2015; Saraiva *et al*., 2011; Saraiva *et al*., 2013).

Reconhecida por sua madeira densa e resistente, a *S. brasiliensis* destaca-se como uma das espécies mais valorizadas do semiárido, sendo amplamente utilizada em construções rurais e domésticas devido à durabilidade, resistência e disponibilidade de sua madeira. De modo geral, madeiras mais densas, como a da *S. brasiliensis*, são preferencialmente empregadas na construção de cercas e moradias. A espécie, contudo, está sujeita a níveis severos de exploração em razão de suas diversas formas de utilização, da preferência dos coletores e de sua ampla disponibilidade, sendo intensamente coletada ao longo de todo o ano (Lucena *et al*., 2007).

Assim como a *A. urundeuva*, a *S. brasiliensis* figura entre as árvores mais importantes da Caatinga, também sendo empregada como fonte de medicamentos tradicionais para o tratamento de diabetes, inflamações e distúrbios do sistema digestivo (Albuquerque *et al*., 2005). Além disso, é a planta lenhosa com o maior número de usos registrados no semiárido nordestino, incluindo madeira para construção, aplicação medicinal, combustível (lenha e carvão), ornamentação, apicultura e produção de taninos (Santos *et al*., 2008).

Devido a esse grande potencial de uso em diversas aplicações, tornam-se necessárias pesquisas com enfoque na sua conservação e propagação. Entre os entraves já caracterizados está a biologia reprodutiva da baraúna, pois trata-se de uma espécie dióica (Kiill, 2010), o que pode ser um agravante para sua conservação, pois o desaparecimento dos indivíduos de um dos sexos em um determinado local pode comprometer a sua reprodução. Outra característica dessa espécie que causa problemas na sua reprodução em viveiros é a presença de dormência nas sementes (Carvalho, 2008).

A reprodução da *S. brasiliensis* ocorre exclusivamente por sementes, mas apresenta baixa taxa de germinação, sendo recomendada a escarificação para a superação da dormência (Maia, 2012). Além dessa limitação, o uso indiscriminado da espécie reduziu drasticamente suas populações naturais, colocando-a sob risco de extinção (Maia, 2012). Por essa razão, foi incluída na lista oficial de espécies ameaçadas, publicada pelo Ministério do Meio Ambiente na Instrução Normativa nº 6, de 23 de setembro de 2008. Esse cenário evidencia a necessidade de intensificação dos estudos sobre a espécie, visando compreender melhor sua biologia e aprimorar os métodos de propagação e conservação.

4.3.7. Caracterização e importância da espécie *Spondias tuberosa* Arruda

Spondias tuberosa Arruda, conhecida popularmente como umbuzeiro ou imbuzeiro, é uma espécie frutífera nativa e endêmica do Brasil, amplamente distribuída nas formações vegetais da Caatinga no semiárido nordestino, com ocorrência também registrada no Norte do estado de Minas Gerais (Maia, 2012; Mitchell; Daly, 2015; Lorenzi, 2020). O nome popular "y-mb-ú" tem origem no tupi-guarani e significa "árvore que dá de beber", em referência aos xilopódios que armazenam água, consumidos tradicionalmente por povos indígenas que habitavam a região (Maia, 2012).

A *S. tuberosa* é uma árvore de porte médio, com altura variando entre 4 e 7 metros, tronco curto e copa arredondada (Maia, 2012; Mitchell; Daly, 2015). Suas folhas são alternas, compostas, imparipinadas, geralmente com 3 a 7 folíolos. As flores são brancas, pequenas, perfumadas e organizadas em panículas terminais. Os frutos, conhecidos como umbus, são drupas glabras ou levemente pilosas (Maia, 2012; Mitchell; Daly, 2015). Trata-se de uma espécie xerófila e caducifólia, que perde suas folhas durante o período seco. Uma de suas principais adaptações ao ambiente semiárido é a presença de xilopódios, estruturas que funcionam como órgãos de reserva de água. Estima-se que cada planta possa apresentar, em média, 978 xilopódios com massa total de até 1.700 kg, capazes de armazenar até 2.000 litros de água (Cavalcanti *et al*., 2002; Cavalcanti; Resende, 2006) (Figura 6).

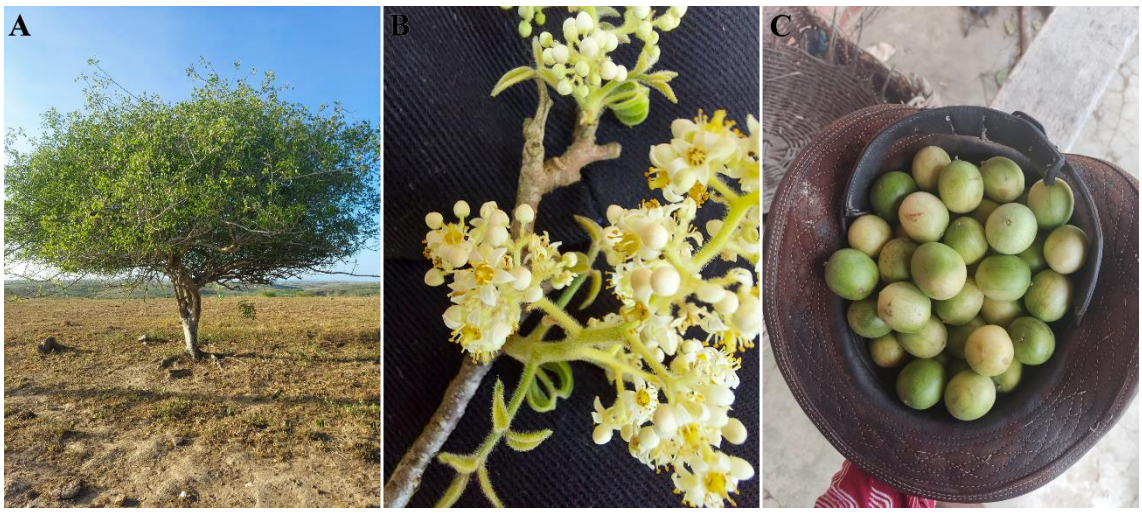


Figura 6. (A) Aspecto geral da planta adulta, (B) inflorescência e (C) frutos de umbuzeiro. Fonte: Augusto Nascimento.

O extrativismo vegetal é uma importante fonte de renda para pequenos agricultores do semiárido nordestino, e a *S. tuberosa* figura entre as espécies mais relevantes para essa atividade. A coleta extrativista do fruto ocorre praticamente em todos os estados do Nordeste brasileiro, bem como no semiárido mineiro, sendo a Bahia o principal estado produtor, com cerca de 5.831 toneladas colhidas em 2024 (IBGE, 2025) (Tabela 3).

O fruto é consumido *in natura*, ou serve de matéria-prima para a fabricação de sucos, doces, geleias, licores e outros produtos artesanais, que agregam valor à cadeia produtiva e contribuem significativamente para a economia local. Além disso, os xilopódios são utilizados na preparação de doces regionais (Anjos; Rybka, 2016). Essas múltiplas formas de uso refletem a importância socioeconômica e cultural do umbuzeiro no semiárido. Apesar disso, a espécie ainda se encontra em estágio incipiente de domesticação, com predomínio do uso extrativista e pouca adoção de sistemas de cultivo ou melhoramento genético (Lins Neto *et al*., 2012).

Tabela 3. Produção de umbu no Brasil em 2024. Fonte: IBGE, 2023.

Estado	**Maior Produtor do Estado**	**Quantidade Produzida (t)**	**Valor da Produção (R$ 1.000)**
Alagoas	Água Branca- AL	309	1508
Bahia	Mirante- BA	5831	11833
Ceará	Porteiras- CE	27	28
Minas Gerais	Espinosa-MG	5655	6580
Paraíba	Juazeirinho-PB	2143	2974
Pernambuco	Santa Cruz-PE	623	1243
Piauí	Acauã-PI	108	279
Rio Grande do Norte	São Miguel do Gostoso-RN	692	964
Total	-	15548	25409

Estudos realizados em comunidades do interior do Nordeste brasileiro revelam a diversidade de usos tradicionais da *S. tuberosa*. Em Pernambuco, foram registradas nove formas distintas de aproveitamento, com destaque para o consumo do fruto *in natura*, o preparo de sucos e doces a partir dos frutos e dos xilopódios (Lins Neto *et al*., 2010). De forma semelhante, em outras regiões do semiárido, os frutos são amplamente utilizados na alimentação, sendo transformados em sucos, doces, bolos e na tradicional umbuzada (Nunes *et al*., 2018).

Apesar de sua reconhecida importância socioeconômica e ambiental para o semiárido, a espécie continua sendo explorada majoritariamente de forma extrativista, o que tem contribuído para a redução das populações naturais e a perda de variabilidade genética (Mertens

et al., 2017). Esses impactos podem estar relacionados, em parte, à baixa taxa de germinação das sementes, que apresentam dormência física, principalmente devido à dureza do endocarpo (Lopes *et al*., 2009). Além disso, o processo de domesticação ainda é incipiente, limitando avanços em conservação e manejo sustentável (Mertens *et al*., 2017).

4.3.8. Caracterização e importância da espécie *Anacardium occidentale* L.

A espécie *Anacardium occidentale* L. é uma árvore frutífera nativa do Brasil, amplamente cultivada em várias regiões do mundo, principalmente em zonas tropicais, devido ao alto valor econômico do seu fruto e do seu pseudofruto (Oliveira *et al*., 2019). Conhecida popularmente como cajueiro ou caju, pode ocorrer em diferentes domínios fitogeográficos brasileiros, sendo frequentemente encontrada na Caatinga, no Cerrado e em áreas de transição (Gomes *et al*., 2024). Além de ser amplamente cultivada em diferentes regiões do Nordeste brasileiro, desempenhando papel relevante para a economia local e na subsistência de comunidades rurais do semiárido (Paiva *et al*., 2003).

A. occidentale é uma árvore de porte variável, com altura que pode alcançar entre 4 e 13 metros, apresentando tronco tortuoso e ramificado, copa ampla e irregular. Suas folhas são simples, alternas, coriáceas, obovadas a elípticas, com ápice arredondado e base atenuada, diferentemente das outras espécies abordadas que possuem folhas compostas e imparipinadas. As flores são pequenas, perfumadas, dispostas em panículas terminais, geralmente com coloração esbranquiçada a rósea (Morton, 2003) (Figura 7). A espécie é heliófila, xerófita e adaptada a solos pobres e arenosos (Farias *et al*., 2024).

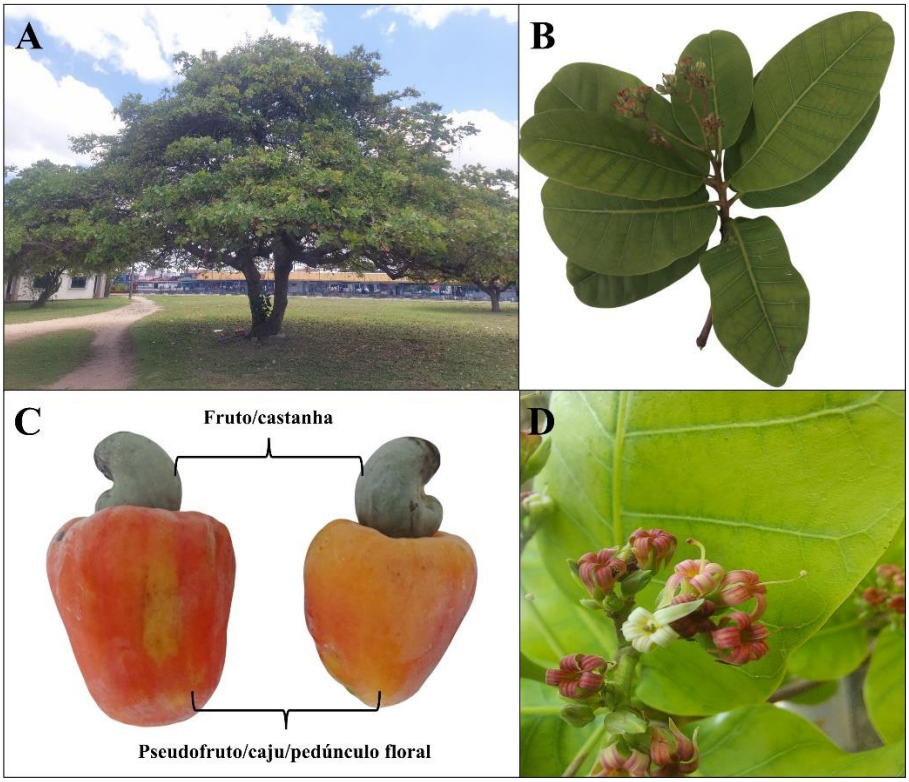


Figura 7. (A) aspecto geral de uma planta adulta, (B) folhas simples e coriáceas, (C) fruto (castanha) e pseudofruto em destaque e (D) flores dispostas em panículas terminais do cajueiro. Fonte: Augusto Nascimento.

A castanha de caju é o fruto verdadeiro, uma drupa reniforme, indeiscente, com pericarpo lenhoso que contém a amêndoa (semente) comestível e altamente nutritiva. O pedúnculo floral hipertrofiado e suculento forma o pseudofruto, conhecido como “caju”, amplamente consumido *in natura* ou processado na forma de sucos, polpas, doces, geleias e bebidas (Farias *et al*., 2024) (Figura 7C). Além disso, o líquido da casca da castanha (LCC) é

uma importante matéria-prima para a indústria química, com aplicações em tintas, vernizes, resinas e repelentes (Silveira *et al*., 2019).

A. occidentale possui grande importância socioeconômica para o semiárido brasileiro, destacando-se tanto pelo aproveitamento do pseudofruto quanto da castanha. Além de fornecer alimento para a fauna e contribuir para a recuperação de áreas degradadas, a espécie desempenha papel central na alimentação e na economia das comunidades locais. O pseudofruto e a castanha são amplamente utilizados no consumo doméstico e na comercialização, fortalecendo a segurança alimentar e gerando renda em diferentes regiões do Nordeste. Essa diversidade de usos consolida o cajueiro como um recurso-chave para a manutenção de práticas tradicionais e para a preservação de conhecimentos etnobotânicos no semiárido. Em 2023, a produção nacional de castanha de caju alcançou 127.391 toneladas, concentrando-se majoritariamente na região Nordeste, com destaque para o Ceará, principal estado produtor, responsável por 63.258 toneladas (IBGE, 2025) (Tabela 4).

Tabela 4. Produção de castanha de caju no Brasil em 2023. Fonte: IBGE.

Estado	**Maior produtor**	**Produção (t)**	**Área colhida (h)**	**Valor da produção (R$ 1.000)**
Tocantins	Esperantina	5	7	8
Rio Grande do Norte	Serra do Mel	32.072	58.309	131.317
Piauí	Pio IX	20.992	73.187	52.129
Pernambuco	Buíque	2.821	2.165	17.287
Paraíba	Cuité	591	2.466	2.204
Pará	Paragominas	718	1.056	1.983
Mato Grosso	Terra Nova do Norte	88	150	176
Maranhão	Santo Amaro do Maranhão	3173	8.796	8.890
Ceará	Beberibe	63.258	279.284	222.229
Bahia	Cícero Dantas	3.389	15.779	13.284
Alagoas	Igaci	824	702	3.587
Total	-	127.391	441.892	453.163

Além do uso alimentar, *A. occidentale* apresenta grande potencial na medicina tradicional nordestina. Estudos etnobotânicos realizados no semiárido brasileiro evidenciam a relevância alimentar, medicinal e cultural do cajueiro em comunidades tradicionais. A espécie figura entre as principais plantas medicinais da APA - Área de Proteção Ambiental da Serra da Ibiapaba, no Piauí (Chaves e Barros, 2012), e está entre as mais utilizadas na medicina tradicional do estado (Oliveira *et al*., 2022). Em Campina Grande (Paraíba) e em outras regiões do Brasil, o cajueiro destaca-se ainda pelas atividades antimicrobianas e antifúngicas atribuídas a suas diferentes partes, como casca, folhas e frutos (Fenner *et al*., 2006; Souza *et al*., 2013). No Território Indígena Kantaruré, em Glória-BA, é a principal espécie empregada por mulheres para a regulação do ciclo menstrual e no tratamento de doenças do aparelho reprodutor (Lima e Nunes, 2025). Em Caruaru (Pernambuco), figura como a espécie mais frequente nos quintais agroflorestais, devido ao seu alto potencial medicinal e alimentar (Florentino *et al*., 2007).

4.4. Conclusões

A família Anacardiaceae apresenta grande importância para o semiárido brasileiro, tanto pela diversidade de espécies quanto pela diversidade de usos alimentares, medicinais, madeireiros e culturais. Os resultados deste estudo evidenciam a forte presença de espécies de múltiplos usos da Caatinga, como *A. urundeuva*, *S. brasiliensis*, *S. tuberosa* e *A. occidentale*, que representam recursos para subsistência das populações locais e possuem potencial para o processamento de seus produtos, contribuindo para o desenvolvimento econômico regional.

Entretanto, a distribuição desigual dos registros de coleta, com concentração em áreas próximas a centros urbanos e instituições de pesquisa, revela lacunas significativas no conhecimento sobre a flora da família Anacardiaceae no semiárido brasileiro. Esse dado reforça a necessidade de ampliar o esforço de coleta em regiões subamostradas, associando dados de herbários regionais, literatura cinzenta e novas campanhas de campo.

Do ponto de vista socioeconômico, muitas espécies ainda são exploradas de forma extrativista, com baixo grau de domesticação e ausência de cadeias produtivas estruturadas. Essa situação, juntamente com a exploração madeireira desordenada, contribui para a redução das populações naturais e ameaça a conservação de espécies de grande valor ecológico. É importante desenvolver e aprimorar estratégias de propagação e manejo sustentável, que contemplem práticas de conservação *in situ* e *ex situ*, programas de melhoramento genético e incentivo ao processamento de produtos nativos para agregar valor.

Além disso, é fundamental reconhecer e valorizar o conhecimento tradicional associado ao uso dessas espécies, pois podem auxiliar políticas públicas de conservação e desenvolvimento territorial. A integração entre comunidades locais, universidades, órgãos ambientais e setor produtivo pode viabilizar modelos de bioeconomia de base florestal mais justos e sustentáveis. Por fim, o fortalecimento das pesquisas, aliado à criação de políticas que promovam o uso sustentável e a conservação, é condição essencial para assegurar que esses recursos continuem a beneficiar tanto as populações locais quanto o patrimônio natural do semiárido brasileiro.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

4.5. Referências Bibliográficas

AGOSTINI-COSTA, T. da S.; FARIA, J. P.; NAVES, R. V.; VIEIRA, R. F. *Anacardium* spp.: caju-do-cerrado. In: VIEIRA, R. F.; CAMILLO, J.; CORADIN, L. (org.). **Espécies nativas da flora brasileira de valor econômico atual ou potencial: Plantas para o futuro: Região Centro-Oeste**. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2018. p. 138–149. (Série Biodiversidade, 44).

ALBUQUERQUE-SILVA, M. M.; OLIVEIRA, M. T. de; OLIVEIRA, A. F. M. de; ALBUQUERQUE, U. P. Is there a relationship between the concentration of phenolic compounds and the versatility of medicinal plants in the Caatinga biome? **Ethnobotany Research and Applications**, v. 32, 2025.

ALBUQUERQUE, U. P.; ANDRADE, L. H. C.; SILVA, A. C. O. Use of plant resources in a seasonal dry forest (Northeastern Brazil). **Acta Botanica Brasilica**, v. 19, n. 1, p. 27–38, 2005.

ALBUQUERQUE-SILVA, M. M.; OLIVEIRA, M. T. de; OLIVEIRA, A. F. M. de; ALBUQUERQUE, U. P. Is there a relationship between the concentration of phenolic compounds and the versatility of medicinal plants in the Caatinga biome? **Ethnobotany Research and Applications**, v. 32, p. 1-11, 2025.

ALMEIDA, L. H. F. de; CORDEIRO, S. A.; PEREIRA, R. S.; COUTO, L. C.; LACERDA, K. W. de S. Viabilidade econômica da produção de caju (*Anacardium occidentale* L.). **Nativa**, v. 5, n. 1, 2017.

ALMEIDA, D. L. de; SILVA, J. M. da. Espécies nativas da mata atlântica pernambucana com potencial paisagístico. **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, v. 12, n. 2, p. 123–135, 2024.

ALVALÁ, R. C. S.; CUNHA, A. P. M. A.; BRITO, S. S. B.; SELUCHI, M. E.; MARENGO, J. A.; MORAES, O. L. L.; CARVALHO, M. A. Drought monitoring in the Brazilian Semiarid region. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 91, supl. 1, e20170209, 2019.

ALVINO, F. de O.; SILVA, M. F. F. da; RAYOL, B. P. Potencial de uso das espécies arbóreas de uma floresta secundária, na Zona Bragantina, Pará, Brasil. **Acta Amazonica**, v. 35, n. 4, p. 413–420, 2005.

ANJOS, J. B.; RYBKA, A. C. P. Processamento de produtos à base de umbu. In: DRUMOND, M. A.; AIDAR, S. T.; NASCIMENTO, C. E. S.; OLIVEIRA, V. R. (org.). **Umbuzeiro: Avanços e perspectivas**. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2016. p. 217–241.

ARAÚJO, C. E. P.; BELA, R. T.; BUENO, L. J. F.; RODRIGUES, R. F. O.; SHIMIZU, M. T. Anti-ulcerogenic activity of the aerial parts of *Lithraea molleoides*. **Fitoterapia**, v. 77, n. 5, p. 406–407, 2006.

ARAÚJO, D. F. S.; ALBUQUERQUE, U. P.; JACOB, M. C. M.; SILVA, A. R. O.; SILVA, T. L. B.; RAMOS, M. A. Plantas alimentícias na Caatinga. In: JACOB, M. C. M.; ALBUQUERQUE, U. P. (org.). **Plantas alimentícias locais do Brasil. Etnobiologia**. Cham: Springer, 2021. p. 257–275.

ARAÚJO, D.; SEBBENN, A. M.; ZANATTO, A. C. S.; ZANATA, M.; MORAIS, E.; MORAES, M. L. T. de; FREITAS, M. L. M. Variação genética para caracteres silviculturais em progênies de polinização aberta de *Astronium graveolens* Jacq. (Anacardiaceae). **CERNE**, v. 20, n. 1, p. 61–68, 2014.

ARAÚJO, S. de; SOUSA, I. J. O.; GONÇALVES, R. L. G.; FRANÇA, A. R. S.; NEGREIROS, P. S.; BRITO, A. K. S.; OLIVEIRA, A. P.; LIMA, E. B. S. Aplicações farmacológicas e tecnológicas da goma do cajueiro (*Anacardium occidentale* L.) – um produto obtido da flora brasileira. **Revista Gestão Inovação e Tecnologias**, v. 8, n. 1, p. 4292–4305, 2018a.

ARAÚJO, R. R. de; SANTOS, E. D.; FARIAS, D. B. S.; LEMOS, E. E. P.; ALVES, R. E. *Spondias bahiensis*: umbu-cajá. In: CORADIN, L.; CAMILLO, J.; PAREYN, F. G. C. (org.). **Espécies nativas da flora brasileira de valor econômico atual ou potencial: Plantas para o futuro: Região Nordeste**. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2018b. p. 279–286.

BARRAQUI, N. S. G.; VENTURA, J. A.; RUAS, F. G.; GOMES, R. B. A.; LOVATTI, B. P. O.; SILVA, S. R. C.; FILGUEIRAS, P. R.; KUSTER, R. M. Physical and chemical characteristics of *Schinus terebinthifolia* Raddi (Brazilian peppertree) fruits at different stages of maturation. **Biochemical Systematics and Ecology**, v. 110, 104704, 2023.

BAPTISTEL, A. C.; COUTINHO, J. M. C. P.; LINS NETO, E. M. F.; MONTEIRO, J. M. Plantas medicinais utilizadas na Comunidade Santo Antônio, Currais, Sul do Piauí: um enfoque etnobotânico. **Revista Brasileira de Plantas Medicinais**, v. 16, n. 2, supl. 1, p. 406–425, 2014.

BARBOSA, H. de M.; AMARAL, D.; NASCIMENTO, J. N. do; MACHADO, D. C.; ARAÚJO, T. A. de S.; ALBUQUERQUE, U. P. de; ALMEIDA, J. R. G. da S.; ROLIM, L. A.; LOPES, N. P.; GOMES, D. A.; LIRA, E. C. *Spondias tuberosa* inner bark extract exert antidiabetic effects in streptozotocin-induced diabetic rats. **Journal of Ethnopharmacology**, v. 227, p. 248–257, 2018.

BARROS, F. N.; NASCIMENTO, V. T.; MEDEIROS, P. M. Ethnobotany and population status of *Myracrodruon urundeuva* Allemão in rural Northeastern Brazil. **Economic Botany**, v. 70, n. 1, p. 79–84, 2016.

BENDAOUD, H.; ROMDHANE, M.; SOUCHARD, J. P.; CAZAUX, S.; BOUAJILA, J. Chemical composition and anticancer and antioxidant activities of *Schinus molle* L. and *Schinus terebinthifolius* Raddi berries essential oils. **Journal of Food Science**, v. 75, n. 6, p. C466-C472, 2010.

BORGES, A. L. O.; NASCIMENTO, A. A.; SOUSA, M. M.; BRITO, K. M. S.; VILAR, F. C. R.; PEIXOTO, R. M. Traditional knowledge of medicinal plants used to treat livestock in shared pasture communities in some areas of the semiarid region of Bahia, northeastern Brazil. **Revista Brasileira de Plantas Medicinais**, v. 26, n. 1, p. 63-74, 2024.

BONIFÁCIO, B. V.; VILA, T. V. M.; MASIERO, I. F.; SILVA, P. B. da; SILVA, I. C. da; OLIVEIRA LOPES, É. de; SANTOS RAMOS, M. A. dos; SOUZA, L. P. de; VILEGAS, W.; PAVAN, F. R.; CHORILLI, M.; LOPEZ-RIBOT, J. L.; BAUAB, T. M. Antifungal Activity of a Hydroethanolic Extract From *Astronium urundeuva* Leaves Against Candida albicans and Candida glabrata. **Frontiers in Microbiology**, v. 10, 2019.

BRACHO-ESTÉVANEZ, C. A.; ARENAS-CASTRO, S.; GONZÁLEZ-VARO, J. P.; GONZÁLEZ-MORENO, P. Spatially explicit metrics improve the evaluation of species distribution models facing sampling biases. **Ecological Informatics**, v. 84, p. 102916, 2024.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Instrução Normativa n. 6, de 23 de setembro de 2008**. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2008.

BRITO, S. A.; BARBOSA, I. S.; ALMEIDA, C. L. F. de; MEDEIROS, J. W. de; SILVA NETO, J. C.; ROLIM, L. A.; SILVA, T. G. da; XIMENES, R. M.; MENEZES, I. R. A. de; CALDAS, G. F. R.; WANDERLEY, A. G. Evaluation of gastroprotective and ulcer healing activities of yellow mombin juice from *Spondias mombin* L. **PLOS ONE**, v. 13, n. 11, e0201561, 2018.

BROINIZI, P. R. B.; ANDRADE-WARTHA, E. R. S. de; SILVA, A. M. de O. e; NOVOA, A. J. V.; TORRES, R. P.; AZEREDO, H. M. C.; ALVES, R. E.; MANCINI-FILHO, J. Avaliação da atividade antioxidante dos compostos fenólicos naturalmente presentes em subprodutos do pseudofruto de caju (*Anacardium occidentale* L.). **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 27, n. 4, p. 902–908, 2007.

BUTURI, C. V.; MENDONÇA, L. C. de; CASSOL, F.; MARCON, T.; FORTES, A. M. T. Potencial da *Schinus terebinthifolius* Raddi na recuperação de áreas degradadas: interações aleloquímicas. **Revista Cultivando o Saber**, v. 8, n. 1, p. 49–58, 2015.

CABRAL, B.; SIQUEIRA, E. M. S.; BITENCOURT, M. A. O.; LIMA, M. C. J. S.; LIMA, A. K.; ORTMANN, C. F.; CHAVES, V. C.; FERNANDES-PEDROSA, M. F.; ROCHA, H. A. O.; SCORTECCI, K. C.; REGINATTO, F. H.; GIORDANI, R. B.; ZUCOLOTTO, S. M.

Phytochemical study and anti-inflammatory and antioxidant potential of *Spondias mombin* leaves. **Revista Brasileira de Farmacognosia**, v. 26, n. 3, p. 304–311, 2016.

CAETANO, R. de A.; SILVA, J. G.; COSTA SANTOS, É. M. da; SILVA, H. C. H. da. The role of local experts in the selection and use of fodder crop species: a case study in the Brazilian dry forest. **Ethnobotany Research and Applications**, v. 29, esp., p. 1–13, 2024.

CAETANO, R.; SANTOS, É. M. da C.; POIAN, R. Z.; CARVALHO, A. R.; DA SILVA, R. R. V.; DE MEDEIROS, P. M. Wild food plants with the potential to improve food and nutrition security may be threatened by timber extraction: A systematic review of the Brazilian context. **Ethnobiology and Conservation**, v. 12, 2023.

CARVALHO, P. E. R. Aroeira-pimenteira: *Schinus terebinthifolius*. In: CARVALHO, P. E. R. **Espécies arbóreas brasileiras**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Colombo: Embrapa Florestas, 2003. v. 1, p. 159–168.

CARVALHO, M. P.; SANTANA, D. G.; RANAL, M. A. Emergência de plântulas de *Anacardium humile* A. St.-Hil. (Anacardiaceae) avaliada por meio de amostras pequenas. **Revista Brasileira de Botânica**, v. 28, n. 3, p. 627–633, 2005.
CARVALHO, P. E. R. Bugreiro: *Lithrea molleoides*. In: CARVALHO, P. E. R. **Espécies arbóreas brasileiras**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Colombo: Embrapa Florestas, 2006a. v. 2, p. 97–104.

CARVALHO, P. E. R. Cajá-da-mata: *Spondias mombin*. In: CARVALHO, P. E. R. **Espécies arbóreas brasileiras**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Colombo: Embrapa Florestas, 2006b. v. 2, p. 125–132.

CARVALHO, P. E. R. Cupiúva: *Tapirira guianensis*. In: CARVALHO, P. E. R. **Espécies arbóreas brasileiras**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Colombo: Embrapa Florestas, 2006c. v. 2, p. 189–198.

CARVALHO, P. E. R. Braúna-do-sertão: *Schinopsis brasiliensis*. In: CARVALHO, P. E. R. **Espécies arbóreas brasileiras**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Colombo: Embrapa Florestas, 2008. v. 3, p. 81–88.

CAVALCANTI, N. B.; RESENDE, J. M. Ocorrência de xilopódio em plantas nativas de imbuzeiro. **Caatinga (Mossoró, Brasil)**, v. 19, n. 3, p. 287–293, 2006.

CAVALCANTI, N. B.; RESENDE, J. M.; BRITO, L. T. L. Levantamento da produção de xilopódio e os efeitos de sua retirada sobre a frutificação e persistência de plantas nativas de imbuzeiro (*Spondias tuberosa* Arr. Cam.). **Ciência e Agrotecnologia**, v. 26, n. 5, p. 927–942, 2002.

CENTRO DE REFERÊNCIA E INFORMAÇÃO AMBIENTAL (CRIA). **speciesLink network**. 2025.

CHAVES, E. M. F.; BARROS, R. F. M. Diversidade e uso de recursos medicinais do carrasco na APA da Serra da Ibiapaba, Piauí, Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Plantas Medicinais**, v. 14, n. 3, p. 476–486, 2012.

CHAVES, T. P.; BARBOSA, A. S.; NUNES, L. E.; SILVA, K. M. A.; SIMÕES, M. O. S.; SANTOS, R. L.; CATÃO, R. M. R.; SANTOS, V. L.; MEDEIROS, A. C. D. Evaluation of

the potential modulator of bacterial resistance, acute toxicity and chemical composition of *Schinopsis brasiliensis* Engl. **African Journal of Pharmacy and Pharmacology**, v. 9, n. 33, p. 843–849, 2015.

CHEN, T. K.; WIEMER, D. F.; HOWARD, J. J. A volatile leafcutter ant repellent from Astronium graveolens. **Naturwissenschaften**, v. 71, n. 2, p. 97–98, 1984.

COSTA, C. C. da; GURGEL, E. S. C.; GOMES, J. I.; LUZ, C. L. da S.; CARVALHO, L. T. de; MARGALHO, L. F.; MARTINS-DA-SILVA, R. C. V.; MACIEIRA, A. P.; SOUZA, A. S. de. **Conhecendo espécies de plantas da Amazônia: tatapiririca (*Tapirira guianensis* Aubl. – Anacardiaceae)**. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2014. (Comunicado técnico, 253).

CORREIA, S. J.; DAVID, J. M.; DAVID, J. P.; CHAI, H. B.; PEZZUTO, J. M.; CORDELL, G. A. Alkyl phenols and derivatives from *Tapirira obtusa*. **Phytochemistry**, v. 56, n. 7, p. 781-784, 2001.

CRIA – CENTRO DE REFERÊNCIA EM INFORMAÇÃO AMBIENTAL. **speciesLink: Sistema de Informação Distribuído para Coleções Biológicas**. Campinas, SP: CRIA, 2026. Disponível em: https://specieslink.net/. Acesso em: 21 set. 2026.

CRISPIM, M.; SILVA, T. C.; LIMA, A. dos S.; CRUZ, L. da S.; BENTO, N. A.; CRUZ, T. M.; STELLE, Y.; MAR, J. M.; ROCHA, D. de Q.; BEZERRA, J. de A.; AZEVEDO, L. From Traditional Amazon Use to Food Applications: *Tapirira guianensis* Seed Extracts as a Triad of Antiproliferative Effect, Oxidative Defense, and Antimalarial Activity. **Foods**, v. 14, n. 3, p. 467, 2025.

CRISTOFOLI, N. L.; LIMA, C. A. R.; VIEIRA, M. M. C.; ANDRADE, K. S.; FERREIRA, S. R. S. Antioxidant and antimicrobial potential of cajazeira leaves (*Spondias mombin*) extracts. **Separation Science and Technology**, v. 54, n. 4, p. 580-590, 2019.

CRUZ, R. S.; MEDEIROS, P. M. de; FERREIRA JÚNIOR, W. S.; SILVA, R. R. V. da. Factors that influence human behavior in biofuel use and their implications for biocultural conservation. **Ethnobiology and Conservation**, v. 9, p. 1–13, 2020.

DARU, B. H.; PARK, D. S.; PRIMACK, R. B.; WILLIS, C. G.; BARRINGTON, D. S.; WHITFELD, T. J. S.; SEIDLER, T. G.; SWEENEY, P. W.; FOSTER, D. R.; ELLISON, A. M.; DAVIS, C. C. Widespread sampling biases in herbaria revealed from large-scale digitization. **New Phytologist**, v. 217, n. 2, p. 939–955, 2018.

ENQUIST, B. J.; FENG, X.; BOYLE, B.; MAITNER, B.; NEWMAN, E. A.; JØRGENSEN, P. M.; ROEHRDANZ, P. R.; THIERS, B. M.; BURGER, J. R.; CORLETT, R. T.; COUVREUR, T. L. P.; DAUBY, G.; DONOGHUE, J. C.; FODEN, W.; LOVETT, J. C.; MARQUET, P. A.; MEROW, C.; MIDGLEY, G.; MORUETA-HOLME, N.; NEVES, D. M.; OLIVEIRA-FILHO, A. T.; KRAFT, N. J. B.; PARK, D. S.; PEET, R. K.; PILLET, M.; SERRA-DIAZ, J. M.; SANDEL, B.; SCHILDHAUER, M.; ŠÍMOVÁ, I.; VIOLLE, C.; WIERINGA, J. J.; WISER, S. K.; HANNAH, L.; SVENNING, J.-C.; MCGILL, B. J. The commonness of rarity: Global and future distribution of rarity across land plants. **Science Advances**, v. 5, n. 11, 2019.

FAGGIN, J. M.; BEHAGEL, J. H.; ARTS, B. Sustainable forest management and social-ecological systems: An institutional analysis of Caatinga, Brazil. **Forests**, v. 8, n. 11, p. 454, 2017.

FARIAS, J. C.; MAYO, S. J.; VIEIRA, I. R.; ANDRADE, I. M. de. Using morphometrics to distinguish the restinga and cerrado ecotypes of wild *Anacardium occidentale* (Anacardiaceae): a preliminary study in northeastern Brazil. **Plant Systematics and Evolution**, v. 310, n. 1, p. 3, 2024.

FEITOSA, D. G.; MALTONI, K. L.; CASSIOLATO, A. M. R.; PAIANO, M. O. Crescimento de mudas de Gonçalo-Alves (*Astronium fraxinifolium*) sob diferentes fontes e doses de nitrogênio. **Revista Árvore**, v. 35, n. 3, p. 401-411, 2011.

FENNER, R.; BETTI, A. H.; MENTZ, L. A.; RATES, S. M. K. Plantas utilizadas na medicina popular brasileira com potencial atividade antifúngica. **Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas**, v. 42, n. 3, p. 369–394, 2006.

FLORA DO BRASIL 2020. **Flora do Brasil 2020**. Jardim Botânico do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. Disponível em: https://floradobrasil.jbrj.gov.br/. Acesso em: 21 set. 2026.

FLORENTINO, A. T. N.; ARAÚJO, E. de L.; ALBUQUERQUE, U. P. de. Contribuição de quintais agroflorestais na conservação de plantas da Caatinga, Município de Caruaru, PE, Brasil. **Acta Botanica Brasilica**, v. 21, n. 1, p. 37–47, 2007.

FUNCH, L. S.; FUNCH, R. R.; ROCHA, F. F.; COUTO-SANTOS, A. P. L. do; BRANCO, M. S.; MORO, M. F. Floristics, phytosociology and biogeography of capitinga vegetation in a white sand habitat in the Chapada Diamantina Mountains, Brazil. **Rodriguésia**, v. 72, e01382020, 2021.

GALVÃO, W. R. A.; BRAZ FILHO, R.; CANUTO, K. M.; RIBEIRO, P. R. V.; CAMPOS, A. R.; MOREIRA, A. C. O. M.; SILVA, S. O.; MESQUITA FILHO, F. A.; SANTOS, S. A. A. R.; MELO JÚNIOR, J. M. A.; GONÇALVES, N. G. G.; FONSECA, S. G. C.; BANDEIRA, M. A. M. Gastroprotective and anti-inflammatory activities integrated to chemical composition of *Myracrodruon urundeuva* Allemão - A conservationist proposal for the species. **Journal of Ethnopharmacology**, v. 222, p. 177–189, 2018.

GARIGLIO, M. A.; SAMPAIO, E. V. S. B.; CESTARO, L. A.; KAGEYAMA, P. Y. **Uso sustentável e conservação dos recursos florestais da caatinga**. Brasília, DF: Serviço Florestal Brasileiro, 2010.

GARRO, M. F.; SALINAS, A. G. S.; VEGA, A. E.; SOSA, A. C. A.; PELZER, L.; SAAD, J. R.; MARIA, A. O. Gastroprotective effects and antimicrobial activity of *Lithraea* molleoides and isolated compounds against Helicobacter pylori. **Journal of Ethnopharmacology**, v. 176, p. 469–474, 2015.

GOMES, M. T. D.; JACOBINA, H. P.; ALVES, G. M.; FILHO, E. J. da C. L.; REIS, H. da S.; MORAIS, R. F. de; FUNCH, L. S. Revealing floristic and structural variation in regenerating areas in the Cerrado-Caatinga transition: an analysis across seres. **Rodriguésia**, v. 75, 2024.

GONÇALVES, B. L. M.; CRUZ, G. V.; LISBOA, M. A. N.; SILVA, L. V. A. da; QUEIROZ, M. G. dos S.; SILVA, A. de O.; TEIXEIRA, M. R. A.; SILVA, M. A. P. da; SAMPAIO, V.

da S.; ROCHA, L. S. G.; CALIXTO JÚNIOR, J. T. Flora and biological spectrum of a savanna enclave within the semiarid Caatinga Dominion in Ceará state, Northeastern Brazil. **South African Journal of Botany**, v. 175, p. 587–599, 2024.

GUARIM NETO, G.; MORAIS, R. G. de. Plantas medicinais com potencial ornamental: um estudo no cerrado de Mato Grosso. **Revista Brasileira de Horticultura Ornamental**, v. 9, n. 1, p. 89–97, 2003.

HALL, C. F.; GIL, A. S. B. Flora das cangas da Serra dos Carajás, Pará, Brasil: Anacardiaceae. **Rodriguésia**, v. 68, n. 3, esp., p. 911–916, 2017.

HERNÁNDEZ, V.; MORA, F.; ARAQUE, B.; DE MONTIJO, S.; MELÉNDEZ, P. Chemical composition and antibacterial activity of *Astronium graveolens* Jacq. essential oil. **Revista Latinoamericana de Química**, v. 41, n. 2, p. 89–94, 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Semiárido Brasileiro**. Rio de Janeiro: IBGE, 2024. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/mapas-regionais/15974-semiarido-brasileiro.html. Acesso em: 22 set. 2026.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Tabela 289: quantidade produzida e valor da produção na extração vegetal, por tipo de produto extrativo. Sistema IBGE de Recuperação Automática – SIDRA. Rio de Janeiro: IBGE, 2025.

JOSÉ, A. C.; DAVIDE, A. C.; OLIVEIRA, S. L. de. Produção de mudas de aroeira (*Schinus terebinthifolius* Raddi) para recuperação de áreas degradadas pela mineração de bauxita. **Cerne**, v. 11, n. 2, p. 187–196, 2005.

KELLER, A.; BALLARIN, A. W.; FREITAS, M. L. M.; ZANATTO, A. C. S.; LONGUI, E. L. Physical-mechanical wood properties of *Myracrodruon urundeuva* in homogeneous planting. **Revista do Instituto Florestal**, v. 29, n. 2, p. 239–251, 2017.

KIILL, L. H. P.; MARTINS, C. T. V. D.; SILVA, P. P. Biologia reprodutiva de duas espécies de Anacardiaceae da Caatinga ameaçadas de extinção. In: ALBUQUERQUE, U. P.; MOURA, A. N.; ARAÚJO, E. L. (org.). **Biodiversidade, potencial econômico e processos eco-fisiológicos em ecossistemas nordestinos**. Canal6, 2010. p. 305–332.

KUBITZKI, K. Introduction to Sapindales. In: KUBITZKI, K. (org.). **Flowering plants. Eudicots. The families and genera of vascular plants**. Berlin; Heidelberg: Springer, 2011. v. 10.

LAFONT, J. J.; PÁEZ, M. S.; PORTACIO, A. A. Extracción y caracterización fisicoquímica del aceite de la semilla (almendra) del marañón (*Anacardium occidentale* L.). **Información Tecnológica**, v. 22, n. 1, p. 51–58, 2011.

LEAL, I. R.; SILVA, J. M. C. da; TABARELLI, M.; LACHER JR., T. E. Changing the course of biodiversity conservation in the Caatinga of Northeastern Brazil. **Conservation Biology**, v. 19, n. 3, p. 701-706, 2005.

LIMA JÚNIOR, J. P. de; FRANCO, R. R.; SARAIVA, A. L.; MORAES, I. B.; ESPINDOLA, F. S. *Anacardium humile* St. Hil as a novel source of antioxidant, antiglycation and α-amylase

inhibitors molecules with potential for management of oxidative stress and diabetes. **Journal of Ethnopharmacology**, v. 268, p. 113667, 2021.

LIMA, B. G. **Caatinga: espécies lenhosas e herbáceas**. Mossoró: Editora Universitária da UFERSA, 2012.

LIMA, K. V. dos S.; NUNES, E. dos S. Saberes da medicina ancestral no semiárido: ferramentas promotoras de conservação e de saúde para mulher indígena Kantaruré. **Revista Foco**, v. 18, n. 7, e9217, 2025.

LINHARES, L. P. M. B.; PEREIRA, B. V. N.; DANTAS, M. K. G.; BEZERRA, W. M. da S.; VIANA-MARQUES, D. de A.; LIMA, L. R. A. de; SETTE-DE-SOUZA, P. H. *Schinopsis brasiliensis* Engler—Phytochemical Properties, Biological Activities, and Ethnomedicinal Use: A Scoping Review. **Pharmaceuticals**, v. 15, n. 8, p. 1028, 2022.

LINS NETO, E. M. F.; PERONI, N.; MARANHÃO, C. M. C.; MACIEL, M. I. S.; ALBUQUERQUE, U. P. Analysis of umbu (*Spondias tuberosa* Arruda (Anacardiaceae)) in different landscape management regimes. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 184, n. 7, p. 4489–4499, 2012.

LINS NETO, E. M.; PERONI, N.; ALBUQUERQUE, U. P. Traditional knowledge and management of umbu (*Spondias tuberosa, Anacardiaceae*): An endemic species from the semi–arid region of Northeastern Brazil. **Economic Botany**, v. 64, n. 1, p. 11–21, 2010.

LINS NETO, E. M.; RAMOS, M. A.; OLIVEIRA, R. L. C.; ALBUQUERQUE, U. P. The knowledge and harvesting of *Myracrodruon urundeuva* Allemão by two rural communities in NE Brazil. **Functional Ecosystems and Communities**, v. 2, esp. 1, p. 66–71, 2008.

LONGUI, E. L.; CUSTÓDIO, G. H.; RANZINI, M.; SILVA, A. M. da; FREITAS, M. L. M.; CAMBUIM, J.; MORAES, M. L. T. de; LIMA, I. L. de. Wood properties of three south american species planted in consortium. **Revista Árvore**, v. 48, n. 1, p. 1–14, 2024.

LOPES, P. S. N.; MAGALHÃES, H. M.; GOMES, J. G.; BRANDÃO JÚNIOR, D. S.; ARAÚJO, V. D. Superação da dormência de sementes de umbuzeiro (*Spondias tuberosa*, Arr. Câm.) utilizando diferentes métodos. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 31, n. 3, p. 872–880, 2009.

LÓPEZ, P.; FERRARO, G.; ANESINI, C. Comparative antioxidant activity of an extract of *Lithraea molleoides* and an isolated 5-alkyl resorcinol derivative. Effects on the proliferation of normal and tumoral lymphocytes. **Phytotherapy Research**, v. 25, n. 2, p. 271–276, 2011.

LÓPEZ, P. G.; BASILE, P.; WALLACE, F.; OLIVARO, C.; MINTEGUIAGA, M.; FERREIRA, F. *Lithraea molleoides* (Vell.) Engler. In: MÁTHÉ, Á.; BANDONI, A. (ed.). **Medicinal and Aromatic Plants of South America: Argentina, Chile and Uruguay**. Cham: Springer, 2021. v. 2, p. 339-356.

LORENZI, H. **Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil**. 8. ed. Nova Odessa: Instituto Plantarum de Estudos da Flora, 2020. v. 1.

LUCENA, R. F. P.; ALBUQUERQUE, U. P.; MONTEIRO, J. M.; ALMEIDA, C. F. C. B. R.; FLORENTINO, A. T. N.; FERRAZ, J. S. F. Useful plants of the semi-arid Northeastern

region of Brazil – A look at their conservation and sustainable use. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 125, p. 281–290, 2007.

LUCENA, R. F. P.; FARIAS, D. C.; CARVALHO, T. K. N.; LUCENA, C. M.; NETO, C. F. A. V.; ALBUQUERQUE, U. P. Uso e conhecimento da aroeira (*Myracrodruon urundeuva*) por comunidades tradicionais no Semiárido brasileiro. **Sitientibus Série Ciências Biológicas**, v. 11, n. 2, p. 255–264, 2011.

LUIZ-FERREIRA, A.; COLA, M.; BARBASTEFANO, V.; HIRUMA-LIMA, C. A.; SANTOS, L. C.; VILEGAS, W.; BRITO, A. R. M. S. Antiulcerogenic activity of the aqueous fraction of *Anacardium humile* St. Hil (Anacardiaceae). **Journal of Medicinal Plants Research**, v. 6, n. 40, p. 5337-5343, 2012.

LUNA, E. M.; LOPES, H. T. O.; RODRIGUES, F. A. Á.; COUTINHO, H. D. M.; OLIVEIRA, L. C. C. de. Antioxidant potential of the Caatinga flora. **Phytomedicine Plus**, v. 2, n. 2, p. 100240, 2022.

LUTYŃSKI, P.; PIECZONKA, J.; PIESTRZYNSKI, A.; MOSQUERA-PALACIOS, M.; DEL CASTILLO-LONDOÑO, A. C. *Astronium graveolens* tree – mineral exploration guide in search for copper and potential use of this plant for reforestation of mining waste. **Geology, Geophysics and Environment**, v. 49, n. 3, p. 299–306, 2023.

MAIA, G. N. **Caatinga: árvores e arbustos e suas utilidades**. 2. ed. Fortaleza: Printcolor Gráfica e Editora, 2012.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; ALVALA, R. C. S.; CUNHA, A. P.; BRITO, S.; MORAES, O. L. L. Climatic characteristics of the 2010-2016 drought in the semiarid Northeast Brazil region. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 90, n. 2, supl. 1, p. 1973–1985, 2018.

MARTINS, A. O. B. P. B.; SIEBRA, A. L. A.; OLIVEIRA, C. D. M.; LEITE, G. O.; COUTINHO, H. D. M.; ATHAYDE, M. L.; BOLIGNON, A. A.; ANDRADE, J. C.; OLIVEIRA, L. R.; KERNTOPF, M. R.; BARBOSA, R.; CESARIO, F. R. A. S.; COUTINHO, T. S.; QUINTANS-JUNIOR, L. J.; MENEZES, I. R. A. Antimicrobial, gastroprotective and healing effect of the hydroalcoholic extract of *Astronium fraxinifolium*. **Letters in Drug Design & Discovery**, v. 15, n. 3, p. 325-334, 2018.

MATIAS, R.; PAULIQUEVIS, C. F.; OJEDA, P. T. A.; PINA, J. C.; OLIVEIRA, A. K. M. de. Potencial alelopático de extratos etanólicos e pó de folhas de *Tapirira obtusa* na germinação e formação de plântulas de diferentes espécies-alvo. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 4, e25210413841, 2021.

MATOS, M. Q.; FELFILI, J. M. Florística, fitossociologia e diversidade da vegetação arbórea nas matas de galeria do Parque Nacional de Sete Cidades (PNSC), Piauí, Brasil. **Acta Botanica Brasilica**, v. 24, n. 2, p. 483-496, 2010.

MATOS, A. A.; OLIVEIRA, F. A.; MACHADO, A. C.; SALDANHA, L. L.; TOKUHARA, C. K.; SOUZA, L. P.; VILEGAS, W.; DIONÍSIO, T. J.; SANTOS, C.; PERES-BUZALAF, C.; DOKKEDAL, A. L.; OLIVEIRA, R. An extract from *Myracrodruon urundeuva* inhibits matrix mineralization in human osteoblasts. **Journal of Ethnopharmacology**, v. 237, p. 192–201, 2019.

MEDEIROS, P. M. de; FIGUEIREDO, K. F.; GONÇALVES, P. H. S.; CAETANO, R. de A.; SANTOS, É. M. da C.; SANTOS, G. M. C. dos; BARBOSA, D. M.; PAULA, M. de; MAPELI, A. M. Wild plants and the food-medicine continuum—an ethnobotanical survey in Chapada Diamantina (Northeastern Brazil). **Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine**, v. 17, n. 1, p. 37, 2021.

MELO JÚNIOR, J. C. F. de; BARROS, C. F. de. Madeiras históricas em embarcações tradicionais do baixo rio São Francisco. **Revista do Museu de Arqueologia e Etnologia**, v. 28, n. 28, p. 109–123, 2017.

MERTENS, J.; ALMEIDA-CORTEZ, J. S. de; GERMER, J.; SAUERBORN, J. Umbuzeiro (*Spondias tuberosa*): a systematic review. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, v. 36, p. 179–197, 2015.

MERTENS, J.; GERMER, J.; SIQUEIRA FILHO, J. A.; SAUERBORN, J. *Spondias tuberosa* Arruda (Anacardiaceae), a threatened tree of the Brazilian Caatinga? **Brazilian Journal of Biology**, v. 77, n. 3, p. 542–552, 2017.

MEUNIER, I. M. J.; FERREIRA, R. L. C. Uso de espécies produtoras de taninos para curtimento de peles no Nordeste do Brasil. **Biodiversidade**, v. 14, n. 1, p. 98–104, 2015.

MEYER, C.; WEIGELT, P.; KREFT, H. Multidimensional biases, gaps and uncertainties in global plant occurrence information. **Ecology Letters**, v. 19, n. 8, p. 992–1006, 2016.

MIRANDA, M. J. A. C.; SOUZA, C. A.; SILVA, A. P. S.; BRAZOLIN, S.; MARQUES, K. K. M. *Schinopsis brasiliensis* – Baraúna. In: CORADIN, L.; CAMILLO, J.; PAREYN, F. G. C. (org.). **Espécies Nativas da Flora Brasileira de Valor Econômico Atual ou Potencial - Plantas para o Futuro: Região Nordeste**. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2018. p. 773–778.

MITCHELL, D. J.; DALY, D. C. Notes on *Astronium* Jacq. (Anacardiaceae), including a dwarf new species from the Brazilian Shield. **Brittonia**, v. 69, n. 4, p. 457–464, 2017.

MITCHELL, J. D.; DALY, D. C. A revision of *Spondias* L. (Anacardiaceae) in the Neotropics. **PhytoKeys**, v. 55, p. 1–92, 2015.

MORAIS, J. P. G. de; CAMPANA, M.; GREGORINI, P.; GARCIA, T. M.; MINUSSI, J. F. de A.; PEREIRA, S. N.; PEREIRA, F. C.; DEL VALLE, T. A. In Vitro Evaluation of Potentially Edible Brazilian Trees and Shrubs in Ruminant Nutrition. **Animals**, v. 13, n. 23, p. 3703, 2023.

MORTON, J. F. Cashew nuts and cashew apples. In: CABALLERO, B.; TRUGO, L. C.; FINGLAS, P. M. (org.). **Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition**. 2. ed. Amsterdam: Academic Press, 2003. v. 4, p. 958-964.

MOURA, C. L. A. de; PINTO, G. A. S.; FIGUEIREDO, R. W. de. Processamento e utilização da polpa de cajá (*Spondias mombin* L.). **Boletim do Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos**, v. 29, n. 2, p. 237–252, 2011.

MUELLNER-RIEHL, A. N.; WEEKS, A.; CLAYTON, J. W.; BUERKI, S.; NAUHEIMER, L.; CHIANG, Y.-C.; CODY, S.; PELL, S. K. Molecular phylogenetics and molecular clock

dating of Sapindales based on plastid rbcL, atpB and trnL-trnF DNA sequences. **Taxon**, v. 65, n. 5, p. 1019–1036, 2016.

NASCIMENTO, A. V. de S.; MENDONÇA, A. M. das C.; SANTOS, P. A. A.; SANTANA, M. C. de. O que Sabemos sobre as Sementes de *Astronium urundeuva* (M. Allemão) Engl. (Anacardiaceae)? Revisão sobre uma Espécie Ameaçada e com Importância Socioeconômica. **Biodiversidade Brasileira - BioBrasil**, v. 12, n. 4, 2022.

NASCIMENTO, M. S.; SANTOS, P. H. dos; ABREU, F. F. de; SHAN, A. Y. K. V.; AMARAL, R. G.; ANDRADE, L. N.; SOUTO, E. B.; SANTOS, M. I. S.; GRAÇA, A. de S.; SOUZA, J. B.; SILVA, J. P. R. e; TAVARES, J. F.; SILVA, A. M. de O. e; CORREA, C. B.; MONTALVÃO, M. M.; PIACENTE, S.; PIZZA, C.; CAMARGO, E. A.; ESTEVAM, C. dos S. *Schinus terebinthifolius* Raddi (Brazilian pepper) leaves extract: in vitro and in vivo evidence of anti-inflammatory and antioxidant properties. **Inflammopharmacology**, v. 31, n. 5, p. 2505-2519, 2023.

NASCIMENTO, M. R. P. do; COSTA, M. A. P. de C.; SOUZA, E. H. de; MOTA, S. dos S.; FARO, I. A. M. de; CARVALHO, C. A. L. de. Reproductive biology of *Spondias bahiensis* P.Carvalho, Van den Berg & M.Machado (Anacardiaceae) in Recôncavo da Bahia. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 48, 2024.

NEPOMUCENO, Á.; NEPOMUCENO, I. V.; SANTOS, D.; ARAÚJO, F. F.; FIGUEIREDO, M. F.; PEREIRA, M.; MORO, M. F.; SOUZA, E. B. de. Does the carnauba-palm riverine vegetation constitute a different type of plant community in the Brazilian semiarid? An analysis of the floristic composition. **Rodriguésia**, v. 74, e00702022, 2023.

NUNES, E. N.; GUERRA, N. M.; ARÉVALO-MARÍN, E.; ALVES, C. A. B.; NASCIMENTO, V. T.; CRUZ, D. D.; LADIO, A. H.; SILVA, S. M.; OLIVEIRA, R. S.; LUCENA, R. F. P. Local botanical knowledge of native food plants in the semiarid region of Brazil. **Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine**, v. 14, art. 49, 2018.

NUNES, Y. R. F.; FAGUNDES, N. C. A.; VELOSO, M. das D. M.; GONZAGA, A. P. D.; DOMINGUES, E. B. S.; ALMEIDA, H. de S.; CASTRO, G. C. de; SANTOS, R. M. Sobrevivência e crescimento de sete espécies arbóreas nativas em uma área degradada de floresta estacional decidual, norte de Minas Gerais. **Revista Árvore**, v. 39, n. 5, p. 801–810, 2015.

O'DWYER, J. P.; GREEN, J. L. Field theory for biogeography: A spatially explicit model for predicting patterns of biodiversity. **Ecology Letters**, v. 13, n. 1, p. 87–95, 2010.

OGUNRO, O. B.; OYEYINKA, B. O.; GYEBI, G. A.; BATIHA, G. E.-S. Nutritional benefits, ethnomedicinal uses, phytochemistry, pharmacological properties and toxicity of *Spondias mombin* Linn: a comprehensive review. **Journal of Pharmacy and Pharmacology**, v. 75, n. 2, p. 162–226, 2023.

OLIVEIRA, A. V. M. de; SOUSA, A. M. de; ROLIM, P. M. Potencialidades do umbu (*Spondias tuberosa* Arr.) e cajá (*Spondias mombin* L.): evidências para promoção da biodiversidade alimentar. **Nutrição Brasil**, v. 23, n. 2, p. 888–911, 2024.

OLIVEIRA, U.; PAGLIA, A. P.; BRESCOVIT, A. D.; CARVALHO, C. J. B. de; SILVA, D. P.; REZENDE, D. T.; LEITE, F. S. F.; BATISTA, J. A. N.; BARBOSA, J. P. P. P.;

STEHMANN, J. R.; ASCHER, J. S.; VASCONCELOS, M. F. de; MARCO JR., P. de; LÖWENBERG-NETO, P.; DIAS, P. G.; FERRO, V. G.; SANTOS, A. J. The strong influence of collection bias on biodiversity knowledge shortfalls of Brazilian terrestrial biodiversity. **Diversity and Distributions**, v. 22, n. 12, p. 1232–1244, 2016.

OLIVEIRA, U.; SOARES-FILHO, B.; NUNES, F. Controlling the effects of sampling bias in biodiversity models. **Journal of Biogeography**, v. 51, n. 9, p. 1755–1766, 2024.

OLIVEIRA, Y. R.; SOUSA, W. G. M. de; SILVA, P. H. da; PACHECO, A. C. L.; FERREIRA, P. M. P.; ABREU, M. C. de. Ethnopharmacology of Anacardiaceae R. Br. from Northeast Brazil. **Scientia Naturalis**, v. 5, n. 1, p. 432-472, 2023.

OLIVEIRA, Y. R.; SOUSA, W. G. M. de; SILVA, P. H. da; PACHECO, A. C. L.; ABREU, M. C. de. Anacardiaceae na Medicina Tradicional de Comunidades Rurais do Piauí, Nordeste do Brasil. **Ensaios e Ciência: Ciências Biológicas, Agrárias e da Saúde**, v. 26, n. 1, p. 32–42, 2022.

PAES, J. B..; DINIZ, C. E. F.; MARINHO, I. V.; LIMA, C. R de. Avaliação do potencial tanífero de seis espécies florestais de ocorrência no semi-árido brasileiro. **Cerne**, v. 12, n. 3, p. 232–238, 2006.

PAES, J. B.; MORAIS, V. de M.; LIMA, C. R. de. Resistência natural de nove madeiras do semi-árido brasileiro a fungos xilófagos em condições de laboratório. **Revista Árvore**, v. 28, n. 2, p. 275–282, 2004.

PAES, J. B.; MORAIS, V. de M.; LIMA, C. R. de. Resistência natural de nove madeiras do semi-árido brasileiro a fungos causadores da podridão-mole. **Revista Árvore**, v. 29, n. 3, p. 365–371, 2005.

PAES, J. B.; MORAIS, V. de M.; LIMA, C. R. de; SANTOS, G. J. C. dos. Resistência natural de nove madeiras do semiárido brasileiro a fungos xilófagos em simulares de campo. **Revista Árvore**, v. 33, n. 3, p. 511–520, 2009.

PAIVA, J. R. de; CRISÓSTOMO, J. R.; BARROS, L. de M. **Recursos genéticos do cajueiro: Coleta, conservação, caracterização e utilização**. Embrapa Agroindústria Tropical, 2003.

PAREYN, F. G. C.; CAMILLO, J.; CORADIN, L. *Myracrodruon urundeuva*: aroeira. In: CORADIN, L.; CAMILLO, J.; PAREYN, F. G. C. (org.). **Espécies nativas da flora brasileira de valor econômico atual ou potencial: plantas para o futuro: Região Nordeste**. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2018. p. 766–772.

PATIENT, A.; JEAN-MARIE, E.; ROBINSON, J.-C.; MARTIAL, K.; MEUDEC, E.; LEVALOIS-GRÜTZMACHER, J.; CLOSS, B.; BEREAU, D. Polyphenol Composition and Antioxidant Activity of *Tapirira guianensis* Aubl. (Anarcadiaceae) Leaves. **Plants**, v. 11, n. 3, p. 326, 2022.

PELL, S. K.; MITCHELL, J. D.; MILLER, A. J.; LOBOVA, T. A. Anacardiaceae. In: KUBITZKI, K. (org.). **The families and genera of vascular plants. X. Flowering plants. Eudicots. Sapindales, Cucurbitales, Myrtales**. Berlin: Springer, 2011. p. 7–50.

PENIDO, A. B.; MORAIS, S. M.; RIBEIRO, A. B.; SILVA, A. Z. Ethnobotanical study of medicinal plants in Imperatriz, State of Maranhão, Northeastern Brazil. **Acta Amazonica**, v. 46, n. 4, p. 345–354, 2016.

PEREIRA, P. S.; BARROS, L. M.; BRITO, A. M.; DUARTE, A. E.; MAIA, A. S. Uso da Myracroduon urundeuva Allemão (aroeira do sertão) pelos agricultores no tratamento de doenças. **Revista Cubana de Plantas Medicinales**, v. 19, n. 1, p. 51–60, 2014.

PIRANI, J. B.; SILVA-LUZ, C. L. Check-list de Picramniales e Sapindales (exceto Sapindaceae) do estado de Mato Grosso do Sul. **Iheringia, Série Botânica**, v. 73, supl., p. 301–307, 2018.

RIBEIRO-FILHO, A. A.; FUNCH, L. S.; RODAL, M. J. N. Composição florística da floresta ciliar do rio Mandassaia, Parque Nacional da Chapada Diamantina, Bahia, Brasil. **Rodriguésia**, v. 60, n. 2, p. 265–276, 2009.

RITO, K. F.; ARROYO-RODRÍGUEZ, V.; QUEIROZ, R. T.; LEAL, I. R.; TABARELLI, M. Precipitation mediates the effect of human disturbance on the Brazilian Caatinga vegetation. **Journal of Ecology**, v. 105, n. 3, p. 828–838, 2017.

ROCHA, P. S.; CAMPOS, J. F.; NUNES-SOUZA, V.; VIEIRA, M. C.; BOLETI, A. P. A.; RABELO, L. A.; SANTOS, E. L.; SOUZA, K. P. Antioxidant and protective effects of *Schinus terebinthifolius* Raddi against doxorubicin-induced toxicity. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, v. 184, n. 3, p. 869-884, 2018.

RODAL, M. J. N.; SALES, M. F.; SILVA, M. J. da; SILVA, A. G. da. Flora de um brejo de altitude na escarpa oriental do planalto da Borborema, PE, Brasil. **Acta Botanica Brasilica**, v. 19, n. 4, p. 843-858, 2005.

RODRIGUES, L. A.; CARVALHO, D. D.; GOMES, L. J.; BOTREL, R. T. Espécies vegetais nativas usadas pela população local em Luminárias, MG. **Boletim Agropecuário**, v. 52, p. 1–34, 2002.

RODRIGUES, N. L.; COSTA SOUZA, A. L. da; OLIVEIRA, C. C. de; CARVALHO, M. G. de; LIMA, B. R. de; ALMEIDA AKUTSU, R. de C. C. de; LANA, V. S. de; RAPOSO, A.; SARAIVA, A.; HAN, H.; CARVALHO, I. M. M de. Nutritional and biological attributes of *Spondias tuberosa* (Umbu) fruit: An integrative review with a systematic approach. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 130, p. 106196, 2024.

ROUMY, V.; FABRE, N.; PORTET, B.; BOURDY, G.; ACEBEY, L.; VIGOR, C.; VALENTIN, A.; MOULIS, C. Four anti-protozoal and anti-bacterial compounds from *Tapirira guianensis*. **Phytochemistry**, v. 70, n. 2, p. 305-311, 2009.

SABINO, F. G. da S.; CUNHA, M. do C. L.; SANTANA, G. M. Estrutura da Vegetação em Dois Fragmentos de Caatinga Antropizada na Paraíba. **Floresta e Ambiente**, v. 23, n. 4, p. 487–497, 2016.

SALEHI, B.; GÜLTEKIN-ÖZGÜVEN, M.; KIRKIN, C.; ÖZÇELIK, B.; MORAIS-BRAGA, M. F. B.; CARNEIRO, J. N. P.; BEZERRA, C. F.; SILVA, T. G. da; COUTINHO, H. D. M.; AMINA, B.; ARMSTRONG, L.; SELAMOGLU, Z.; SEVINDIK, M.; YOUSAF, Z.; SHARIFI-RAD, J.; MUDDATHIR, A. M.; DEVKOTA, H. P.; MARTORELL, M.; JUGRAN, A. K.; CHO, W. C.; MARTINS, N. Antioxidant, Antimicrobial, and Anticancer

Effects of Anacardium Plants: An Ethnopharmacological Perspective. **Frontiers in Endocrinology**, v. 11, 2020.

SAMEH, S.; AL-SAYED, E.; LABIB, R. M.; SINGAB, A. N. Genus *Spondias*: A Phytochemical and Pharmacological Review. **Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine**, v. 2018, n. 1, 2018.

SANTOS, R. M.; VIEIRA, F. A.; SANTOS, P. F.; MORAIS, V. M.; MEDEIROS, M. A. Estrutura e florística de um remanescente florestal na Fazenda Ribeirão, município de Juvenília, MG, Brasil. **Revista Caatinga**, v. 21, n. 4, p. 154-162, 2008a.

SANTOS, J. P.; ARAÚJO, E. L.; ALBUQUERQUE, U. P. Richness and distribution of useful woody plants in the semi-arid region of northeastern Brazil. **Journal of Arid Environments**, v. 72, n. 4, p. 652–663, 2008b.

SANTOS, M. B. dos; CARDOSO, R. L.; FONSECA, A. A. de O.; CONCEIÇÃO, M. do N. Caracterização e qualidade de frutos de umbu-cajá (*Spondias tuberosa* X S. mombin) provenientes do Recôncavo Sul da Bahia. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 32, n. 4, p. 1089–1097, 2010.

SANTOS, C. C. de S.; GUILHON, C. C.; MORENO, D. S. A.; ALVIANO, C. S.; ESTEVAM, C. dos S.; BLANK, A. F.; FERNANDES, P. D. Anti-inflammatory, antinociceptive and antioxidant properties of *Schinopsis brasiliensis* bark. **Journal of Ethnopharmacology**, v. 213, p. 176–182, 2018.

SANTOS, A. F. C.; PAULA, A. de; BARRETO-GARCI, P. A. A. B.; CORRÊA, M. M.; BOMBONATTI, J. R. Natural regeneration dynamics in Caatinga tree submitted to forest management. **Floresta**, v. 53, n. 2, p. 232–241, 2023.

SANTOS, A. T. L. dos; CARNEIRO, J. N. P.; CRUZ, R. P. da; SALES, D. L.; ANDRADE-PINHEIRO, J. C.; FREITAS, M. A. de; KERNTOPF, M. R.; DELMONDES, G. de A.; RIBEIRO, P. R. V.; BRITO, E. S. de; BATISTA, F. L. A.; MAGALHÃES, F. E. A.; PITA NETO, I. C.; MORAIS-BRAGA, M. F. B.; KOWALSKI, R.; KOWALSKA, G.; SZOPA, A.; BAJ, T.; COUTINHO, H. D. M. UPLC-MS-ESI-QTOF analysis and antifungal activity of aqueous extracts of *Spondias tuberosa*. **Molecules**, v. 28, n. 1, art. 305, 2023.

SANTOS, T. M. dos; SANTOS, T. M. dos; COSTA, D. L.; AGUIAR, B. G. de; DIAS, J. M. S.; GONÇALVES, W. de C.; CARVALHO, N. P. de. Caracterização anatômica de *Anacardium occidentale* L. visando a geração de energia e produção de celulose. **Caderno Pedagógico**, v. 21, n. 13, e12272, 2024.

SARAIVA, A. M.; CASTRO, R. H. A.; CORDEIRO, R. P.; SOBRINHO, T. J. S. P.; CASTRO, V. T. N. A.; AMORIM, E. L. C.; XAVIER, H. S.; PISCIOTTANO, M. N. C. In vitro evaluation of antioxidant, antimicrobial and toxicity properties of extracts of *Schinopsis brasiliensis* Engl. (Anacardiaceae). **African Journal of Pharmacy and Pharmacology**, v. 5, n. 14, p. 1724–1731, 2011.

SARAIVA, A. M.; SARAIVA, C. L.; CORDEIRO, R. P.; SOARES, R. R.; XAVIER, H. S.; CAETANO, N. Atividade antimicrobiana e sinérgica das frações das folhas de *Schinopsis brasiliensis* Engl. frente a clones multirresistentes de Staphylococcus aureus. **Revista Brasileira de Plantas Medicinais**, v. 15, n. 2, p. 199–207, 2013.

SHIMIZU, M. T.; BUENO, L. J. F.; RODRIGUES, R. F. O.; SALLOWICZ, F. A.; SAWAYA, A. C. H. F.; MARQUES, M. O. M. Essential oil of *Lithraea molleoides* (Vell.): chemical composition and antimicrobial activity. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 37, n. 4, p. 556-560, 2006.

SILVA NASCIMENTO, M. da; SANTOS, P. H. dos; ABREU, F. F. de; SHAN, A. Y. K. V.; AMARAL, R. G.; ANDRADE, L. N.; SOUTO, E. B.; SANTOS, M. I. S.; SOUZA GRAÇA, A. de; SOUZA, J. B.; RAIMUNDO E SILVA, J. P.; TAVARES, J. F.; OLIVEIRA E SILVA, A. M. de; CORREA, C. B.; MONTALVÃO, M. M.; PIACENTE, S.; PIZZA, C.; CAMARGO, E. A.; SANTOS ESTEVAM, C dos. *Schinus terebinthifolius* Raddi (Brazilian pepper) leaves extract: in vitro and in vivo evidence of anti-inflammatory and antioxidant properties. **Inflammopharmacology**, v. 31, n. 5, p. 2505–2519, 2023.

SILVA-LUZ, C. L.; PIRANI, J. R.; PELL, S. K.; MITCHELL, J. D. Anacardiaceae. In: **Flora do Brasil 2020**. Rio de Janeiro: Jardim Botânico do Rio de Janeiro, 2020.

SILVA, A. C. O.; ALBUQUERQUE, U. P. Woody medicinal plants of the caatinga in the state of Pernambuco (Northeast Brazil). **Acta Botanica Brasilica**, v. 19, n. 1, p. 17–26, 2005.

SILVA, E.; DAVID, J.; DAVID, J. P.; GARCIA, G.; SILVA, M. Chemical composition of biological active extracts of *Tapirira guianensis* (Anacardiaceae). **Química Nova**, v. 43, n. 9, p. 1216–1219, 2020.

SILVA, J. M. C.; LEAL, I. R.; TABARELLI, M. Caatinga: The largest tropical dry forest region in South America. In: SILVA, J. M. C.; LEAL, I. R.; TABARELLI, M. (org.). **Caatinga: The largest tropical dry forest region in South America**. Springer International Publishing, 2017. p. 3–23.

SILVA, J. M. da; MOURA, C. H. R. Análise da vegetação de um remanescente de Floresta Atlântica: subsídios para o projeto paisagístico. **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, v. 9, n. 1, p. 2–24, 2021.

SILVA, R. C.; CORRÊA, G. R.; ARRUDA, D. M.; VELOSO, G. V.; FERNANDES-FILHO, E. I.; CÂNDIDO, H. G.; OLIVEIRA, F. S. de; ROSA, G. P.; BEHLING, H.; SCHAEFER, C. E. G. R. The Brazilian semiarid region over the past 21,000 years: Vegetation dynamics in small pulses of higher humidity. **Ecological Informatics**, v. 77, e102259, 2023.

SILVEIRA, E. S. da; MACHADO, A. A.; FAVERO, S.; ROEL, A. R.; CEREDA, M. P. Cashew nut shell líquid (LCC) as bamboo bambusa vulgaris borer repellent. **Ciencia Florestal**, v. 29, n. 3, p. 1389–1397, 2019.

SOUSA-BAENA, M. S.; GARCIA, L. C.; PETERSON, A. T. Completeness of digital accessible knowledge of the plants of Brazil and priorities for survey and inventory. **Diversity and Distributions**, v. 20, n. 4, p. 369–381, 2014.

SOUZA, C. M. P.; BRANDÃO, D. O.; SILVA, M. S. P.; PALMEIRA, A. C.; SIMÕES, M. O. S.; MEDEIROS, A. C. D. Utilização de plantas medicinais com atividade antimicrobiana por usuários do serviço público de saúde em Campina Grande - Paraíba. **Revista Brasileira de Plantas Medicinais**, v. 15, n. 2, p. 188–193, 2013.

SOUZA, F. B.; MENGARDA, L. H.; SPADETO, C.; LOPES, J. C. Substratos e temperaturas na germinação de sementes de gonçalo-alves (*Astronium concinnum* Schott). **Revista Tropica: Ciências Agrárias e Biológicas**, v. 6, n. 3, p. 76–86, 2012.

SOUZA, F. X. de; NASCIMENTO, W. M. O. do; MENDES, N. V. B. *Spondias mombin*: taperebá. In: CORADIN, L.; CAMILLO, J.; VIEIRA, I. C. G. (org.). **Espécies nativas da flora brasileira de valor econômico atual ou potencial: Plantas para o futuro: Região Norte**. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2022. p. 492–506. (Série Biodiversidade, 53).

SOUZA, S. M. C.; AQUINO, L. C. M.; MILACH JR, A. C.; BANDEIRA, M. A. M.; NOBRE, M. E. P.; VIANA, G. S. B. Antiinflammatory and antiulcer properties of tannins from *Myracrodruon urundeuva* Allemão (Anacardiaceae) in rodents. **Phytotherapy Research**, v. 20, n. 12, p. 1109–1114, 2006.

TIBURSKI, J. H.; ROSENTHAL, A.; DELIZA, R.; OLIVEIRA GODOY, R. L. de; PACHECO, S. Nutritional properties of yellow mombin (*Spondias mombin* L.) pulp. **Food Research International**, v. 44, n. 7, p. 2326–2331, 2011.

VALENTIM, S. dos S.; FONSECA, A. A. O.; SILVA, S. M. P. C. da. Elaboração e avaliação da estabilidade de cerveja artesanal utilizando o umbu-cajá (*Spondias bahiensis*) e canela na maturação. **Diversitas Journal**, v. 6, n. 1, p. 114–136, 2021.

VARGAS, C. A.; BOTTIN, M.; SÄRKINEN, T.; RICHARDSON, J. E.; RAZ, L.; GARZON-LOPEZ, C. X.; SANCHEZ, A. Environmental and geographical biases in plant specimen data from the Colombian Andes. **Botanical Journal of the Linnean Society**, v. 200, n. 4, p. 451–464, 2022.

VASCONCELOS, M. F.; D'ANGELO NETO, S.; HOFFMANN, D.; GOMES, H. B. Natural history notes on parrots feeding on fruits of *Myracrodruon urundeuva* (Anacardiaceae) in three South American dry forest regions. **Cotinga**, v. 26, p. 15-19, 2006.

VIANA, G. S. B.; BANDEIRA, M. A. M.; MATOS, F. J. A. Analgesic and antiinflammatory effects of chalcones isolated from *Myracrodruon urundeuva* Allemão. **Phytomedicine**, v. 10, n. 3–4, p. 189–195, 2003.

VIEIRA, L. C. de S.; SILVA FILHO, V. de P.; DANTAS, V. de A.; SATYAMURTY, P.; SÁ, A. S. de. Sazonalidade do sequestro e estoque de carbono na Caatinga, durante as estações seca e chuvosa. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 31, p. 539–564, 2022.

VITORELLI-VENANCIO, D. C.; MATIAS, R.; GANASSIN, A. R.; VENANCIO, F. A.; PERDOMO, R. T.; GOMES, G. B.; KWIATKOWSKI, A.; ANDRADE DOS SANTOS, J. V. de; CHANG, M. R. Bioactives derived from Brazilian native flora with antimicrobial and anticancer activity. **BMC Complementary Medicine and Therapies**, v. 25, n. 1, p. 102, 2025.

5. ARTIGO 2
THE PROPAGATION OF UMBUZEIRO (*Spondias tuberosa* Arruda), A NATIVE FRUIT TREE OF GROWING IMPORTANCE FOR THE BRAZILIAN SEMI-ARID REGION

Artigo publicado no periódico Forests, Trees and Livelihoods.

NASCIMENTO, A. V. de S.; SANTOS, P. A. A.; SILVA, A. V. C.; LÉDO, A. da S. The propagation of umbuzeiro (*Spondias tuberosa* Arruda), a native fruit tree of growing importance for the Brazilian semi-arid region. **Forests, Trees and Livelihoods**, v. 35, n. 3, p. 1-25, 2026. https://doi.org/10.1080/14728028.2026.2626995

ABSTRACT

Spondias tuberosa Arruda, commonly known as umbuzeiro, is a symbolic species native and endemic to the Brazilian Caatinga biome. It holds significant socioeconomic importance in Brazil's semi-arid region. The umbu fruit is consumed fresh and processed by small-scale agro-industries, providing income for family farmers in the Northeast. Although propagation is still predominantly carried out by seeds, vegetative propagation techniques such as cutting, grafting, and air layering have also been successfully explored. Furthermore, micropropagation has emerged as a promising alternative to conven-tional methods. Thus, this study aimed to conduct a bibliometric analysis followed by a systematic literature review on umbuzeiro propagation, presenting the current landscape and research trends on the topic. A total of 56 articles were included, covering various propagation techniques, advances in seedling production, and chal-lenges in cultivating the species under different environmental condi-tions. The results reveal a growing interest in asexual propagation methods, particularly grafting and cutting. Seed technology research has also advanced in overcoming dormancy. However, significant gaps remain, especially in efficient rooting of cuttings, micropropagation, and field transplantation of seedlings. Addressing these challenges is essential to ensure the propagation, conservation, and sustainable use of umbuzeiro and to promote its integration into commercial produc-tion systems.

Keywords: Caatinga biome; dormancy; fruit tree; germination; osmotic stress; seedling production; vegetative propagation.

5.1. Introduction

Umbuzeiro (*Spondias tuberosa* Arruda) is a fruit-bearing tree species of the Anacardiaceae family, native and endemic to the Brazilian Caatinga biome (Maia 2012). As a xerophyte, it is well adapted to semiarid conditions, capable of surviving and fruiting even during prolonged dry seasons. This adaptability stems from physiological mechanisms and the presence of xylopodia,[1] which store water, minerals, and organic solutes (Silva et al. 2009b). Although specific studies on the role of this structure in post-disturbance regrowth of umbuzeiro are still lacking, research in other fire-prone savanna systems indicates that xylopodia function as major reserve organs, allowing the mobilization of stored resources after disturbances such as fire or severe mechanical damage, thereby contributing to plant resilience and persistence (Chiminazzo et al. 2023; Leal et al. 2024, 2026).

Its fruit, commonly known as umbu or imbu, is an important food and income source for local communities and is also processed into pulp, juices, jams, liqueurs, and a traditional drink called umbuzada by small-scale agro-industries (Anjos and Rybka 2016). Wild harvesting of umbu is one of the most traditional practices in Brazil's semiarid Northeast, serving for self-

consumption, sale in fresh markets or for the production of processed goods. This activity adds value to the fruit and represents a significant source of income for rural communities during the harvest season (Batista et al. 2015; Matta et al. 2019). Additionally, the xylopodium is used to prepare a traditional sweet in the interior of the Northeast (de Souza and Costa Neto 2025). Despite its cultural and economic importance, the species remains in the early stages of domestication (Lins Neto et al. 2012).

Although widely used, umbuzeiro is threatened by unsustainable harvesting, the shrinking of its natural distribution area and low natural regeneration capacity (Mertens J, Germer J, et al. 2017a; Almeida and Fabricante 2021). Furthermore, its seeds exhibit low germina-tion rates, at least partially due to physical dormancy caused by the hard endocarp, which results in slow and uneven germination (Lopes et al. 2009).

Currently, the umbuzeiro market is primarily supplied through extractive practices, with few cultivated orchards established for rational fruit production. According to data from the Brazilian Institute of Geography and Statistics (IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística 2023), national production in 2023 was 15,287 tons, with the highest yields reported in the states of Bahia (5,890 t), Minas Gerais (5,503 t), and Paraíba (2,143 t), generating over US$ 1.15 million annually.[2] Therefore, expansion into new markets depends on the commercial production of umbu, as the current supply does not meet domestic consumer demand.

The propagation of umbuzeiro faces several challenges related to harsh environmental conditions and management practices. Seed propagation remains the primary method for seedling production; however, it is hindered by slow field growth and uneven fruit yield among progenies, limiting the expansion of commercial orchards (dos Reis et al. 2010; Rocha et al. 2019). The main advantage of seed-propagated plants is the maintenance of genetic variability and the early development of xylopodia shortly after germination, which supports initial growth and environmental adaptation.

Asexual propagation techniques, such as cutting and grafting, are more promising for establishing commercial orchards, as they enable the selection of desirable traits without genetic variation. The main limitation of cutting, however, is the difficulty in forming xylopodia (Fonseca 2010). Grafting has been successfully applied in propagating the species, but it still faces limitations. Besides requiring skilled labor, the technique is constrained by the lack of well-characterized cultivars for both rootstock and scion. Limited research on genotype compatibility and adaptability to different soil and climate conditions also hinders the large-scale application of this technique (Franzon et al. 2010; Awazade and Verma 2024).

Given the relevance of the species and the need to consolidate existing scientific knowledge, it is essential to gather, analyze, and synthesize the literature on umbuzeiro propagation. A previous systematic review by Mertens et al. (2015) provided a broad synthesis of ecological, socioeconomic, and management aspects of umbuzeiro in the Brazilian semiarid region, while other reviews have predominantly focused on nutritional, biological, and chemical aspects of the species (de Freitas et al. 2024; Rodrigues NL et al. 2024; de Oliveira et al. 2025). However, propagation-related studies were not the primary focus of these reviews and received limited attention. Therefore, despite their relevance, a comprehensive and structured synthesis dedicated specifically to umbuzeiro propagation is still lacking. In this context, bibliometric analysis combined with a systematic literature review constitutes a robust methodological approach to map scientific production, identify research gaps, and highlight emerging trends in propaga-tion research (Oliveira MC and Silva TC 2019).

Thus, this study aimed to conduct a bibliometric analysis followed by a systematic literature review on umbuzeiro propagation. This review compiled studies on various aspects of propagation, ranging from germination and responses to abiotic stresses to the influence of substrates and fertilization on seedling development, culminating in observa-tions on the role of xylopodium in post-transplant establishment. A combined analysis of these findings allows for the identification of significant advances in understanding the species' physiology and developmental needs in its early stages, while also highlighting knowledge gaps. This study is

expected to provide a comprehensive overview of the scientific literature on the subject, contributing to guiding future research and strategies for the conservation and management of the species.

5.2. Methods

This study was conducted through a bibliometric analysis followed by a systematic literature review (Araújo et al. 2020), in accordance with the PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) guidelines (Moher et al. 2009; Page et al. 2021). The bibliographic search was performed in the Scopus (https://www.scopus.com) and Web of Science (https://www.webofknowledge.com) scientific databases between January and February 2025. The search strategy applied the following keyword combination: '*Spondias tuberosa*' OR 'umbuzeiro' OR 'imbuzeiro' OR 'umbu,' with the 'all fields' option selected. No time restrictions were imposed to ensure the broadest possible coverage. Only articles published in English, Spanish, and Portuguese were included.

The review consisted of five stages: (i) identification of articles in the Web of Science and Scopus databases using the specified search terms, along with additional sources (Scielo and Google Scholar); (ii) screening (exclusion of duplicates, review articles, and unavailable or out-of-scope publications); (iii) full-text assessment, including the exclusion of articles that did not provide relevant information on umbuzeiro propagation; (iv) data extraction and tabulation in Microsoft Excel to organize articles by topic and synthesize findings; and (v) analysis using VOSviewer software.

The keyword search yielded 967 results: 381 from Scopus and 586 from Web of Science. The titles and abstracts of all documents were screened to exclude those unrelated to umbuzeiro propagation. From this initial pool, 39 articles from Scopus and 34 from Web of Science were selected, totaling 73. After removing duplicates ($n = 28$), 11 additional articles identified from other platforms were included, resulting in 56 studies incorporated into the review (Figure 1). Quantitative analyses of bibliometric indicators were compiled in a Microsoft Office Excel® 365 spreadsheet. Finally, VOSviewer (Van Eck and Waltman 2010) was used to map keyword-based cooperation networks.

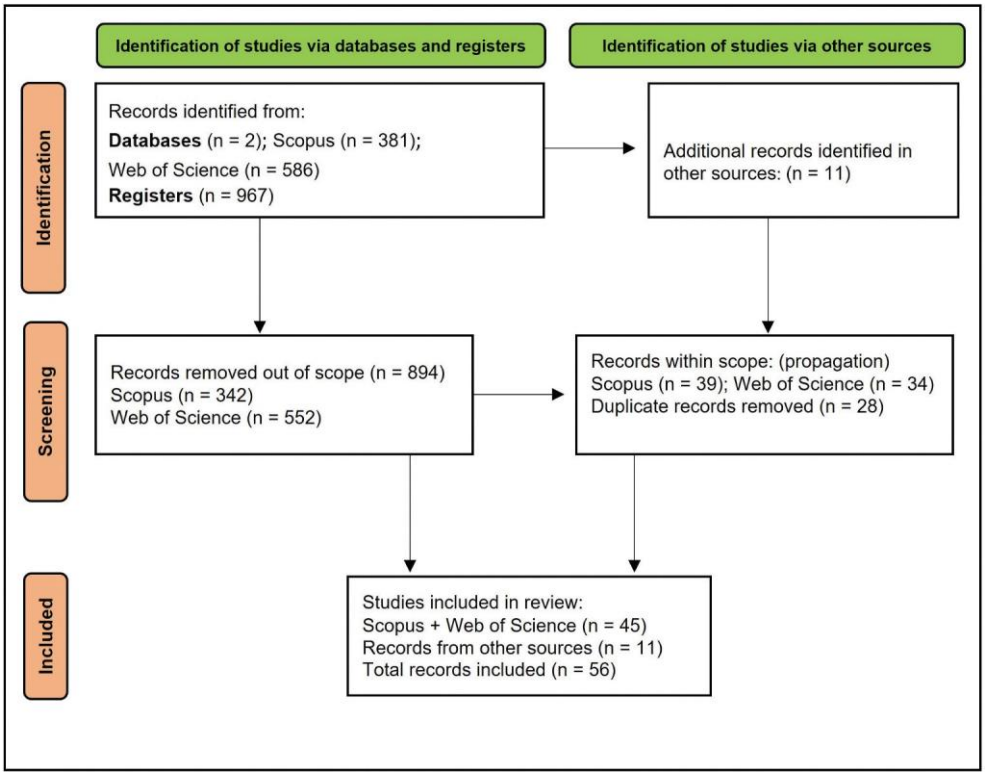


Figure 1. PRISMA 2020 flow diagram in this systematic review.

5.3. Results and Discussion

5.3.1. Species description

The species *Spondias tuberosa* Arruda, commonly known as 'umbuzeiro' or 'imbuzeiro', derives its name from the Tupi-Guarani term 'y-mb-ú', meaning 'tree that provides drink'. This designation refers to its water-rich xylopodium used as a hydration source by Indigenous peoples inhabiting the Caatinga biome (Maia 2012; Kiill et al. 2016). This species is native and endemic to Brazil, characteristic of the northeastern semiarid Caatinga region (Maia 2012; Mitchell and Daly 2015; Lorenzi 2020).

The umbuzeiro is a medium-sized tree, typically reaching 4–7 m in height, with a short trunk and a broad, rounded canopy. Its leaves are alternate, compound, and imparipinnate, with three to seven leaflets. The flowers are small, white, fragrant, and arranged in terminal panicles (Maia 2012; Mitchell and Daly 2015). Its fruits, known as 'umbus', are glabrous or slightly pubescent drupes (Figure 2).

This xerophytic species is adapted to semiarid conditions and exhibits deciduous behavior during the dry season. One of its most distinctive features is the presence of xylopodia, underground structures that store water. On average, a mature plant can have about 978 xylopodia, totaling approximately 1700 kg, with a water storage capacity of up to 2000 L (Cavalcanti et al. 2002, 2010; Kiill et al. 2016).

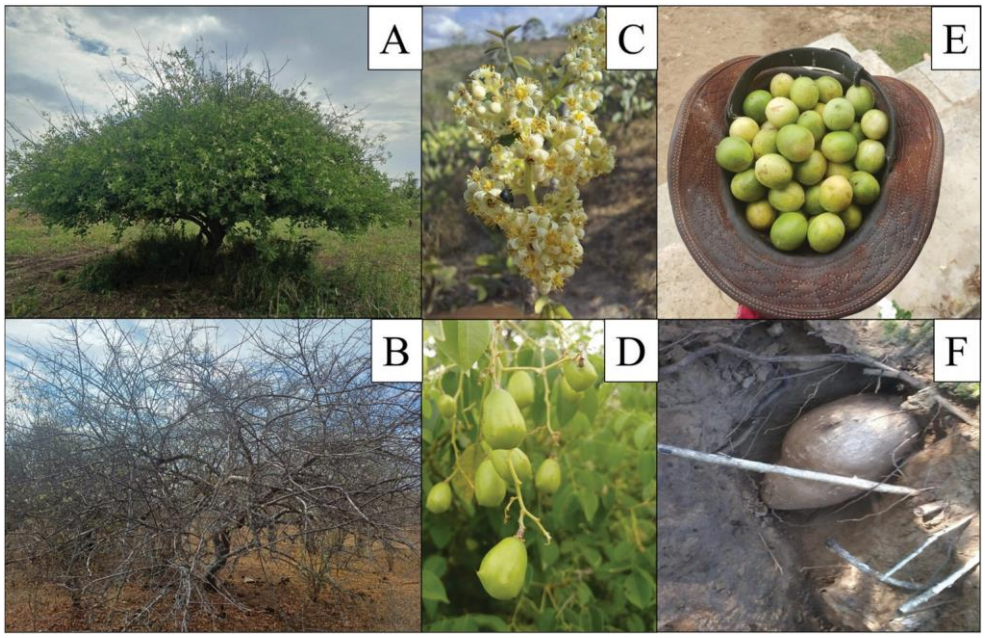


Figure 2. (A and B) Umbuzeiro in the rainy and dry seasons; (C) inflorescence; (D and E) green fruits attached to the plant, and ripe fruits; (F) xylopodium of the umbuzeiro. Source: (A, B and D) James Cardoso; (C) Augusto Nascimento; (E) Clesio Nascimento; (F) Vitor Nascimento.

5.3.2. Publication years and research areas

A quantitative analysis of scientific publications on umbuzeiro propagation spans the period from 1991 to February 2025, showing a noticeable increase over time, with peaks in 2007, 2009, 2018, and 2023. Publications have been recorded annually since 2015. There is a heterogeneous distribution of articles across different research areas (Figure 3).

The areas of Seed Technology and Mineral Nutrition stand out, with 14 and 13 articles, respectively. These findings indicate a primary focus on substrate testing and fertilization, as well as improving seed handling techniques aimed at enhancing germination and seedling production.

In contrast, areas such as micropropagation (2 articles) and transplanting (1 article) show limited research output. Despite the potential of micropropagation for large-scale propaga-tion and germplasm conservation, the low number of studies may indicate technical challenges or insufficient investment in this field. Similarly, the scarcity of transplanting-related studies suggests that the techniques and assessments for transferring seedlings to the field have not been fully explored, despite being crucial for reforestation and land restora-tion programs.

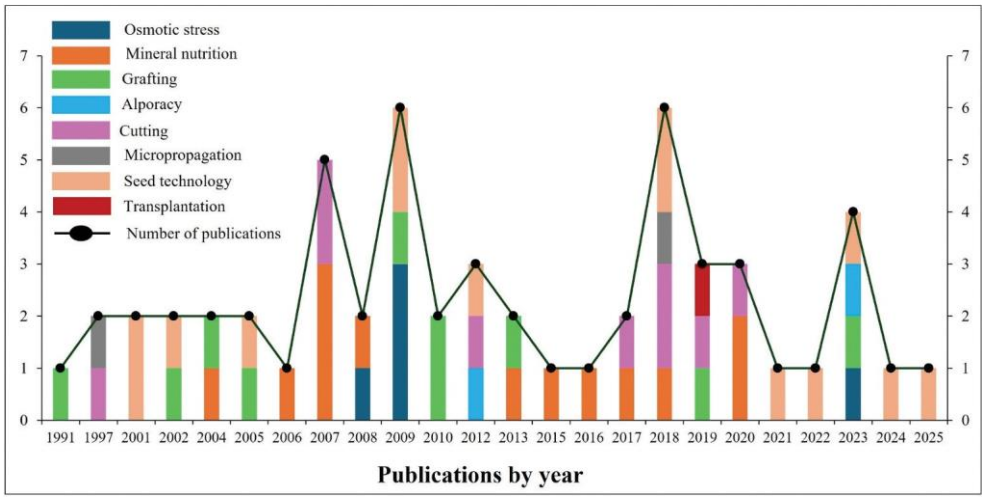


Figure 3. Annual progression of published studies by research area on umbuzeiro propagation. 1 – osmotic stress (water and salt stress); 2 – mineral nutrition (substrate testing and

fertilization); 3 – grafting (rootstock production and grafting methods); 4 – air layering (substrates and plant growth regulators); 5 – cutting propagation (growth regulators, timing, and cutting origin); 6 – micropropagation (growth regulators); 7 – seed technology (germination, storage, dormancy).

5.3.3. Most relevant journals

The distribution of studies by journal reveals a higher concentration in Revista Caatinga (10 articles) and Revista Brasileira de Fruticultura (8 articles). This pattern may indicate a greater regional interest in umbuzeiro propagation, likely due to its ecological and economic significance in the Caatinga biome, as well as its role in national fruit production systems.

Although these journals do not have high impact factors (IF = 0.9 for both, according to Journal Citation Reports), they are recognized for their national and regional relevance, supported by complementary metrics such as CiteScore (CS), SJR, and SNIP. For example, Revista Caatinga stands out with a CiteScore of 2.1 and a SNIP of 0.744, indicating a strong relative impact within its thematic area, particularly in studies focused on the Brazilian semiarid region.

Despite the dominance of these two journals, the distribution of publications across other journals is heterogeneous. Six journals – Ciência Rural, Research, Society and Development, DELOS: Desarrollo Local Sostenible, Ciência Florestal, Ciência e Agrotecnologia, Brazilian Journal of Plant Physiology, Revista Brasileira de Ciências Agrárias, and Acta Horticulturae – each published two articles. Additionally, 21 other journals published only one article each. Notably, 24 of the 31 identified journals are Brazilian.

5.3.4. Keyword network analysis

The keyword co-occurrence network provides an overview of studies on umbuzeiro, highlighting several aspects related to its propagation (Figure 4). Keywords are organized into clusters, indicating interconnected research areas. Central keywords include:

- *Spondias tuberosa* – the most frequent keyword (23 occurrences), reflecting the core focus of the research;
- Caatinga – the second most frequent term (8 occurrences), referencing the umbuzeiro's native biome;
- Umbuzeiro and umbu – other key terms reinforcing the emphasis on the species' common name and fruit;
- Propagation – a central research theme, also among the most frequent keywords.

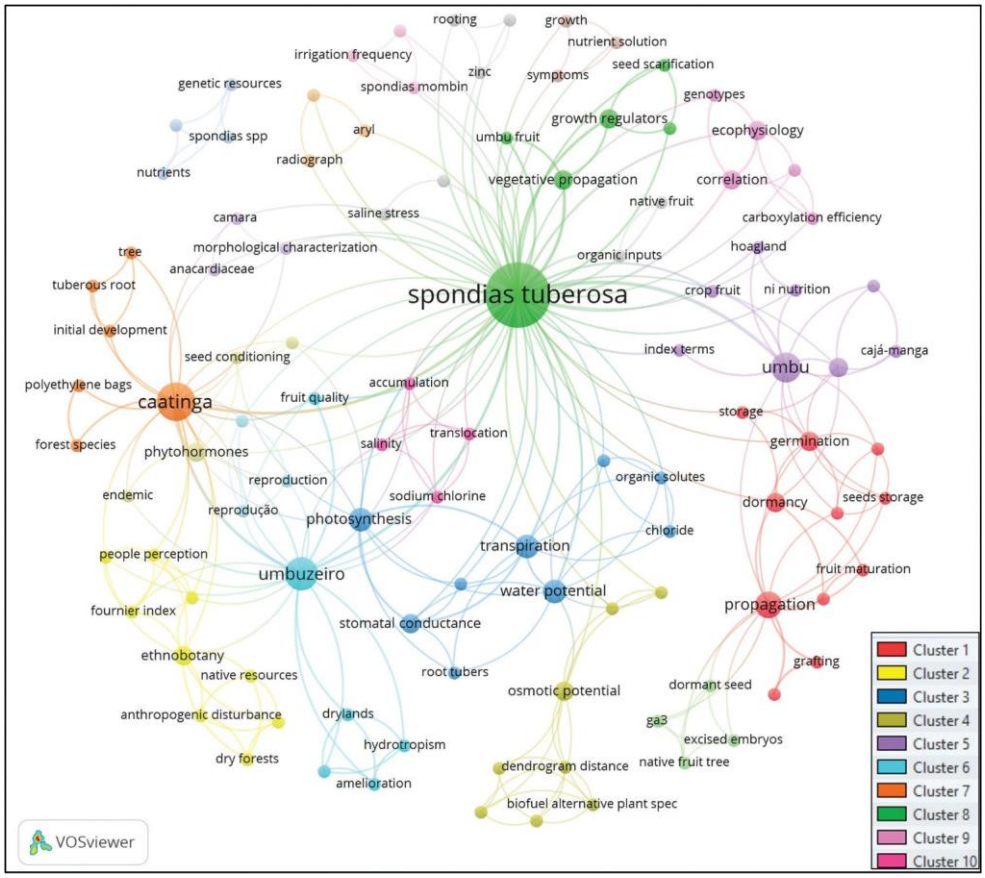


Figure 4. Trends in umbuzeiro research based on authors' keywords in studies on its propagation. Ranking: 1st – Spondias tuberosa (23 occurrences); 2nd – Caatinga (8); 3rd – umbuzeiro (6); 4th – umbu (5); 5th – propagation (4); 6th – photosynthesis (3); 7th – transpiration (3); 8th – water potential (3); 9th – dormancy (2); 10th – vegetative propagation (2).

The analysis of clusters, shown in different colors, highlights major research trends and focal points. The closer and more connected the nodes (circles) in the map, the more often the terms co-occur in articles. Node colors represent clusters of related keywords, suggest-ing distinct research subfields within the broader topic of umbuzeiro propagation. In this context, the main clusters refer to those characterized by a higher number of keywords and stronger link strength, indicating greater relevance and connectivity within the network. The main clusters are summarized below:

- Cluster 1 (Red): Propagation and seed technology

This cluster emphasizes propagation, seed germination, and dormancy. Terms such as germination, dormancy, seed storage, grafting, and propagation reflect the effort to under-stand and optimize propagation processes for umbuzeiro.

- Cluster 2 (Yellow): Ethnobotany and human impacts

This cluster focuses on native resources, ethnobotany, and human impacts on umbuzeiro populations. Terms like native resources, ethnobotany, people perception, and anthropo-genic disturbance highlight human-environment relationships, traditional uses, and threats to the species.

- Cluster 3 (Blue): Physiology and osmotic stress

This cluster addresses plant physiology, particularly in relation to osmotic stress. Keywords such as photosynthesis, transpiration, stomatal conductance, water potential, chloride, organic solutes, and saline stress reflect concerns about umbuzeiro's adaptation to drought and salinity, typical of its natural habitat. The term root tubers also stands out as a key morphological adaptation for water and nutrient storage, which may contribute to plant

resilience under multiple stressors, including drought and, potentially, fire-related distur-bances in seasonally dry environments.

5.3.5. Seed technology

The fruit of the umbuzeiro is a drupe with juicy, aromatic pulp, containing a single seed surrounded by a hard, woody endocarp, known as the pyrene (Lima Filho 2011). At its distal end, the pyrene contains openings known as opercula, filled with a fibrous-textured aril (Rodrigues AMB et al. 2024). Together, these structures comprise the dispersal unit (Figure 5). These units exhibit physical dormancy, attributed to the hardness of the endocarp, which prevents embryo growth and expansion and restricts water and oxygen uptake by the seed. As a result, germination is typically slow and uneven (Lopes et al. 2009).

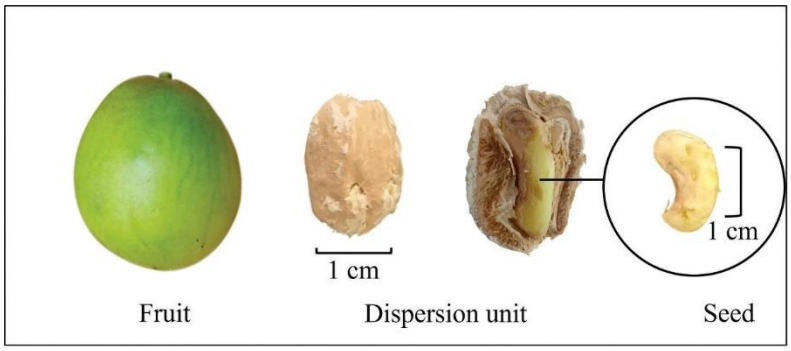


Figure 5. Detail of the fruit, dispersal unit, and seed of umbuzeiro. Source: Augusto Nascimento.

From an evolutionary perspective, slow and uneven germination is an important trait for the species, as it reduces the risk of simultaneous seedling emergence and enhances the chances of survival during prolonged droughts (Willis et al. 2014). However, for large-scale seedling production in forest nurseries, this trait becomes a limiting factor due to the difficulty in obtaining uniform seedling batches (Soltani et al. 2021). Consequently, much of the literature on umbuzeiro dispersal units has focused on understanding the germination process, particularly seed maturation, dormancy, and storage.

5.3.5.1. Germination

Umbuzeiro exhibits epigeal phanerocotylar germination, meaning the cotyledons are raised above the soil surface, fully emerge from the seed coat, and remain green and photosynthe-tically active for a period, while the primary root deepens and the xylopodium develops. The embryo is axial, with a clearly differentiated radicle and plumule (Figure 6). The dispersal units reach Phase III of germination within 168 h and require approximately 0.46 g of water to initiate germination (Rodrigues et al. 2025). A soil-cattle manure substrate is recom-mended, as it favors seedling emergence and early development (Cavalcanti et al. 2002).

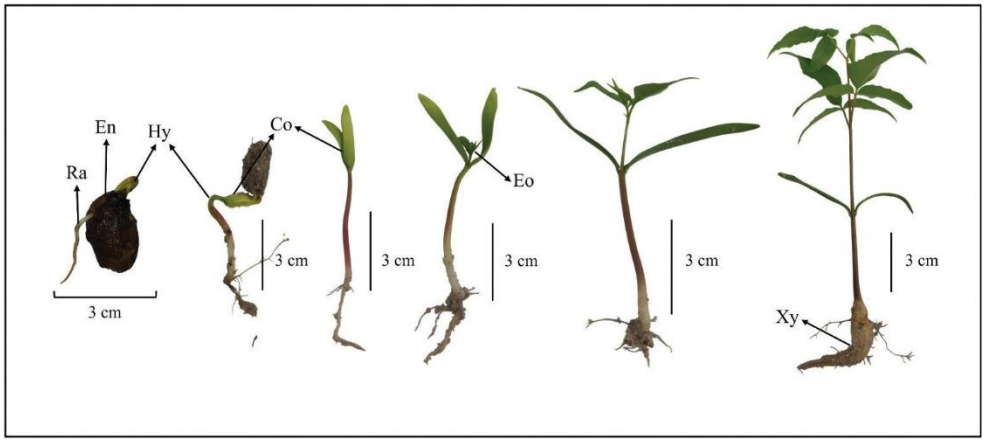


Figure 6. Germination of umbuzeiro. Ra – radicle; en – endocarp; Hy – hypocotyl; Co – cotyledon; eo – eophyll; xy – xylopodium. Source: Augusto Nascimento.

The germination behavior of umbuzeiro is variable, with the seedling emergence occurring between 9 and 16 days (de Araújo et al. 2001; de Melo et al. 2012; Alves and Rocha 2023) and sometimes extending over several months (de Brito Neto et al. 2009). This variability reinforces the species' uneven germination pattern, which is likely linked to the hard endocarp (Table 1).

Table 1. Scientific studies related to umbuzeiro seed biology.

Study Area	Main Result/Conclusion	Reference
Germination	• The highest germination percentage was observed between 30 and 45 days, reaching 90% at 120 days after sowing.	(Brito Neto et al. 2009)
	• Seeds from mature and over-ripe fruits exhibit higher germination rates, and water imbibition does not influence germination.	(da Costa et al. 2001)
	• A substrate composed of soil and manure promotes the emergence and initial growth of umbuzeiro seedlings.	(Cavalcanti et al. 2002)
Dormancy	• Pre-germination treatments (e.g., cutting, bovine gastrointestinal tract passage, and 24-hour water immersion) do not increase germination.	(Nobre et al. 2018)
	• Salicylic acid conditioning for 32 hours (120 mg L^{-1}) is effective for overcoming seed dormancy.	(Correia et al. 2024)
	• Mechanical scarification is the most promising method for breaking dormancy.	(Leite et al. 2021)
	• Immersion in gibberellic acid (1000 mg L^{-1}) for 48 hours maximizes germination and vigor.	(de Souza et al. 2022)
	• Mechanical scarification was the most efficient treatment for breaking dormancy, and seed storage between 120 and 210 days improves germination uniformity.	(Lopes et al. 2009)
	• Ethrel imbibition at 100 ppm increases emergence speed and root system development.	(de Melo et al. 2012)
	• Pre-germination treatments, such as hydro-priming and osmopriming, did not influence germination.	(Rodrigues et al. 2025)
Storage	• Seed storage in cardboard boxes or plastic bags is efficient for up to 12 months.	(Alves and Rocha 2023)
	• Conditioning in a laboratory or oven (40 °C) increases germination from 31% to up to 84% after 6 months of storage.	(Barros et al. 2018)
	• Seeds stored for 24 months showed higher germination (73.6%) compared to those stored for 12 months (27.7%) and freshly harvested seeds (22.8%).	(de Araújo et al. 2001)
	• Storage for eight months under laboratory conditions and using mature/over-ripe fruits optimize germination and vigor.	(de Souza et al. 2005)

5.3.5.2. Maturation

The dispersal units of umbuzeiro possess complex morphological and physiological traits that directly influence germination, affecting both nursery seedling production and natural establishment in the Caatinga biome. Fruit maturation is a key factor impacting germination. Studies have shown that dispersal units from fully mature fruits tend to exhibit higher germination rates (da Costa et al. 2001; de Souza et al. 2005) (Table 1). These findings highlight the importance of proper fruit collection timing to ensure germination success, suggesting that full embryo development and fruit chemical composition are crucial for seed viability. Accordingly, fruit collection for seed production should be performed directly from the ground, following natural fruit dispersal from the mother plant (autochory of the barochory type).

5.3.5.3. Dormancy

Dormancy is a major limiting factor in the germination of umbuzeiro and represents one of the main obstacles to its propagation. Several methods have been tested to establish a protocol for overcoming seed dormancy. Mechanical scarification stands out as a promising technique, likely due to its ability to damage the endocarp, thereby facilitating water and oxygen entry and enhancing germination rates and synchrony (Lopes et al. 2009; Leite et al. 2021). These results reinforce the hypothesis that dormancy is largely imposed by the rigid, lignified endocarp, which restricts embryo expansion, imbibition, and gas exchange – processes essential for germination.

Plant growth regulators have also proven effective in breaking dormancy in umbuzeiro seeds. Pre-treatment with salicylic acid (120 mg L^{-1}) for 32 h and immersion in gibberellic acid (1000 mg L^{-1}) for 48 h significantly increased germination rates (de Souza et al. 2022; Correia et al. 2024). However, simple water soaking for 24 h had no significant effect, indicating that dormancy may not be primarily related to initial water availability (da Costa et al. 2001; Nobre et al. 2018; Rodrigues et al. 2025) (Table 1). The effectiveness of gibberellic acid, known for its role in dormancy release, also suggests the presence of physiological dormancy components in umbuzeiro seeds, beyond the physical barrier.

5.3.5.4. Storage

Seed storage is another key factor influencing germination and vigor of umbuzeiro dispersal units, and it is critical for developing propagation strategies for the species. Studies have shown that seeds can be stored in cardboard boxes or plastic bags for up to 12 months (Alves and Rocha 2023). Interestingly, some reports noted an increase in germination percentage during storage (de Araújo et al. 2001; de Souza et al. 2005; Lopes et al. 2009; Barros et al. 2018), indicating that post-maturation processes may gradually reduce dor-mancy over time (Table 1).

5.3.6. Seedling production

Umbuzeiro propagation involves physiological, nutritional, and environmental aspects, ranging from responses to abiotic stresses to the influence of substrates and fertilization on seedling development. All these factors directly affect the formation of vigorous seed-lings adapted to semiarid conditions, making their understanding essential for successful field establishment.

5.3.6.1. Osmotic stress

During early development, seedlings are susceptible to adverse environmental conditions, with osmotic stress (caused by salinity and/or water deficit) posing a major limiting factor for growth and survival in the field (Taiz et al. 2017). Such stress impairs root water and nutrient uptake, directly affecting essential physiological processes including photosynth-esis, respiration, and cell expansion (Acosta-Motos et al. 2017).

In saline conditions, salt accumulation in the soil reduces the medium's water potential, hindering water absorption by plant roots and potentially causing ionic toxicity, especially from Na^+ and Cl^- (Munns and Tester 2008). Water deficit, common in semiarid regions, limits water availability, requiring adaptive mechanisms such as stomatal closure, accumu-lation of compatible solutes, and the use of specialized storage structures like xylopodia (Chaves et al. 2003; Taiz et al. 2017; Gupta et al. 2020).

In natural umbuzeiro areas, high soil salinity often hinders seedling establishment. Young plants show an initial tolerance to salt stress (up to 50 mM NaCl) without significant physiomorphological changes (da Silva et al. 2008), suggesting effective osmoregulation mechanisms at early stages. Although salinity affects shoot dry mass, seedling roots maintain a certain degree of adaptation (Pereira et al. 2023) (Table 3). Furthermore, association with arbuscular mycorrhizal fungi has proven effective in mitigating the effects of salt stress, enhancing the uptake of essential nutrients such as phosphorus, nitrogen, and potassium (Silva MG and Amorim SM 2009). This opens avenues for management strategies incorporating mycorrhizal inoculation to increase seedling resilience in saline soils.

With respect to the water deficit, umbuzeiro exhibits rapid stomatal closure as an initial defense mechanism and isohydric behavior while maintaining leaf water potential (Silva RJ FH FPD, et al. 2009a). Water storage in the xylopodia is also a determining factor for maintaining leaf turgor (Silva RJ FH NFD, et al. 2009b), demonstrating that the species' water reserve capacity is essential for survival under intermittent drought (Table 2).

Table 2. Scientific studies related to umbuzeiro seedling production.

Study area	Main Result/Conclusion	Reference
Salt stress	• Young umbuzeiro plants tolerate up to 50 mM NaCl without significant physiomorphological changes.	(da Silva et al. 2008)
	• Arbuscular mycorrhizal fungi help overcome salt stress by improving the absorption of N, P, and K.	(Silva and Amorim 2009)
	• Salinity reduces shoot dry mass, but seedling roots demonstrate adaptation to salinity.	(Pereira et al. 2023)
Water stress	• Stomatal closure is the primary initial response of umbuzeiro seedlings to water deficit, acting as a defense against water loss.	(Silva et al. 2009a)
	• Umbuzeiro seedlings exhibited isohydric behavior during drought, maintaining leaf water potential. Water storage in the xylopodia and stomatal closure helped conserve turgor.	(Silva et al. 2009b)
Substrate	• Combining up to 58% organic compost with organic foliar fertilizer promotes good growth of umbuzeiro seedlings.	(Cavalcante et al. 2018)
	• Goat manure has a positive effect on xylopodia growth, even while negatively impacting fine roots.	(Mertens et al. 2017)
	• A substrate composed of 45% subsoil, 15% washed sand, and 40% cattle manure provides the best height-to-collar diameter ratio in umbuzeiro seedlings.	(Cruz et al. 2016)
Mineral nutrition	• Nickel (Ni) at low doses (1.7 mg L^{-1}) in nutrient solution stimulates the growth of umbuzeiro seedlings.	(Neves et al. 2007a)
	• Sodium chloride (NaCl) in the nutrient solution reduces umbuzeiro seedling growth.	(Neves et al. 2004)
	• Maximum dry matter production in umbuzeiro seedling leaves and roots occurred at potassium (K) doses of 137 mg dm^{-3} and 229 mg dm^{-3}, respectively. Higher K doses impaired growth.	(Neves et al. 2007b)
	• An estimated dose of 286 mg dm^{-3} of N resulted in the highest dry matter production in umbuzeiro seedlings.	(Neves et al. 2007c)
	• During initial growth, umbuzeiro seedlings require higher amounts of N, K, Ca, and Mg, and the reduction in total dry mass due to nutrient deficiency occurs in the following order: Ca > N > K > Mg > S > P.	(Gonçalves et al. 2006)
	• Gibberellin (415 mg L^{-1}) application stimulates umbuzeiro vegetative growth, promoting seedlings with more developed roots, xylopodia, and shoots.	(Matos et al. 2020)

	• A dose of 281 mg dm^{-3} of P is recommended for umbuzeiro seedling production in dystrophic Red Latosol. • Gibberellin stimulated the vegetative growth of umbuzeiro seedlings, promoting vigorous roots, a larger stem diameter, and increased leaf area. The highest biomass accumulation occurred at a GA_3 concentration of 337 mg L^{-1}.	(Neves et al. 2008) (Pires et al. 2020)
Transplant	• Tuberous roots function as reserves for water and nutrients, influencing the initial growth of seedlings in the field.	(de Oliveira et al. 2019b)

5.3.6.2. Substrate and mineral nutrition

Substrate and mineral nutrition are also key factors for developing vigorous umbuzeiro seedlings. Studies show that combining up to 58% organic compost with organic foliar fertilizer promotes satisfactory seedling growth (Cavalcante et al. 2018). Animal manure has been successfully used in seedling production, with goat manure favoring greater xylopodia growth (Mertens J, Germer S, et al. 2017b) (Figure 7), while up to 40% cattle manure in the substrate composition improves the height-to-stem diameter ratio, contributing to more uniform and robust seedlings (Cruz et al. 2016) (Table 2).

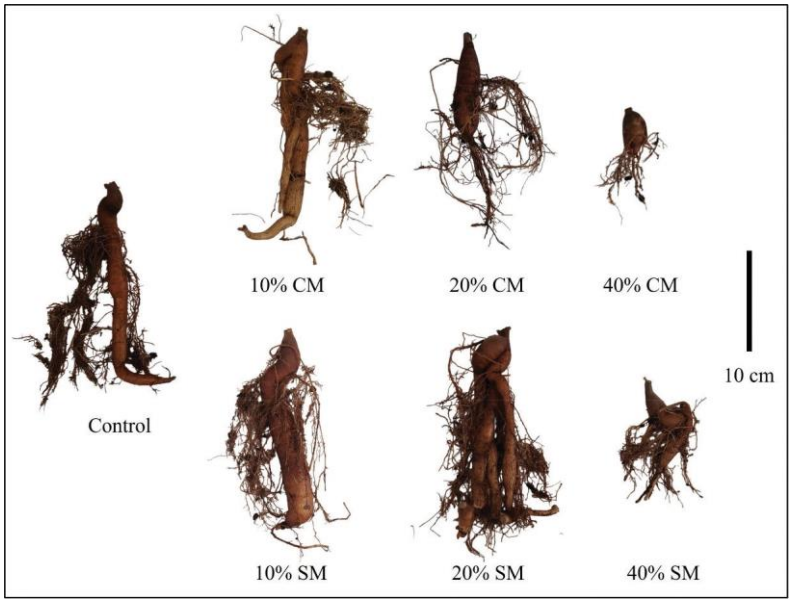


Figure 7. Xylopodia of umbuzeiro seedlings at 120 days old grown in different concentrations of animal manure. CM – Cattle manure; SM – Sheep manure. Source: Augusto Nascimento.

Proper fertilization is a determining factor for successful umbuzeiro seedling production, especially considering the species' specific nutritional requirements during early develop-ment. Several nutrients, such as N, P, K, and Ni, have been evaluated to optimize fertiliza-tion protocols. Fertilization with 286 mg/dm^3 of N provided the highest dry matter production in umbuzeiro seedlings, highlighting nitrogen's essential role in plant growth (Neves OS et al. 2007c). Nitrogen is directly involved in the synthesis of amino acids, proteins, chlorophyll, nucleic acids, and regulatory enzymes. Its deficiency can seriously compromise plant growth, productivity, and quality, reinforcing the importance of proper nutrient management (Wang et al. 2024). Potassium fertilization was also assessed, with maximum dry matter production in leaves and roots observed at 137 mg/dm^3 and 229 mg/ dm^3, respectively (Table 2). Higher doses impaired growth (Neves OSC et al. 2007b), indicating that although potassium is important for osmotic regulation and enzymatic activation, its excess may cause nutritional imbalances or toxicity (Marschner 2012).

For phosphorus, the recommended dose for umbuzeiro seedling production in dys-trophic Red Latosol is 281 mg/dm^3 (Neves et al. 2008). Phosphorus plays a fundamental role in

root development and ATP synthesis, making it crucial for establishing vigorous seed-lings, especially in soils with naturally low phosphorus availability (Novais et al. 2007). Supplementation with Ni in nutrient solution showed that low doses (1.7 mg/L) stimulate seedling growth (Neves OSC et al. 2007a) (Table 2). Although classified as a micronutrient, its function as a urease activator in nitrogen metabolism may explain the observed stimula-tion. However, excessive Ni, as with other heavy metals, can be toxic, reinforcing the need for precise fertilization management (Marschner 2012).

Nutritional demand during the initial growth of umbuzeiro seedlings indicates that the most required nutrients are N, K, Ca, and Mg. Conversely, the reduction in total dry mass caused by nutrient deficiency occurs in the following order: Ca > N > K > Mg > S > P, emphasizing the relative importance of these elements (Gonçalves et al. 2006) (Table 2). Among them, calcium stands out due to its critical role in cell wall formation and stability, root development, and the integrity of meristematic tissues (Epstein and Bloom 2005).

The application of plant growth regulators, such as gibberellin (GA_3), has also been evaluated in umbuzeiro seedling production and proved effective in stimulating vegetative growth. Concentrations of 337 mg/L and 415 mg/L promoted the development of vigorous roots with more developed xylopodia, greater stem diameter, increased leaf area, and higher biomass accumulation (Matos et al. 2020; Pires et al. 2020). Gibberellin action is associated with cell elongation, tissue differentiation, and secondary metabolism stimulation, which explains these results (Taiz et al. 2017). Well-developed xylopodia are directly related to seedling survival and initial field adaptation after transplanting, as they function as storage structures for water and nutrients. This underscores the importance of practices that encourage their growth during the nursery stage (de Oliveira MMD et al. 2019).

5.3.7. Vegetative propagation

The vegetative propagation of umbuzeiro has been extensively studied through techniques such as air layering, cuttings, and grafting. These methods aim to overcome limitations associated with seed propagation, including genetic heterogeneity of seedlings and the difficulty in selecting desirable agronomic traits for commercial cultivation. Each technique has specific advantages and constraints, reflected in rooting efficiency, seedling formation rate, and field adaptability.

5.3.7.1. Air layering

Air layering is a vegetative propagation technique that induces root formation on a branch still attached to the mother plant (Esselen 1930). For umbuzeiro, air layering has proven effective, especially when combined with plant growth regulators. Studies have shown that applying indole-3-butyric acid (IBA) at 6000 mg L^{-1} significantly promotes root system development in air layers (Dutra et al. 2023). Furthermore, combining IBA with alternative substrates, such as sugarcane bagasse, enhances rooting (Dutra et al. 2012), providing a sustainable and low-cost option for semiarid regions (Table 3). However, air layering does not induce xylopodia formation, which limits seedling establishment in the field.

Table 3. Scientific studies related to vegetative propagation of umbuzeiro (air layering, grafting, and cuttings).

Study area	Main Result/Conclusion	Reference
Air layering	• The use of IBA (6,000 mg L^{-1}) promotes the growth of the root system in umbuzeiro air layers.	(Dutra et al. 2023)
	• The use of IBA (6,000 mg L^{-1}) combined with sugarcane bagasse as a substrate promoted the growth of the root system in umbuzeiro air layers.	(Dutra et al. 2012)
Grafting	• Simple whip grafting with scion and rootstock diameters of 7–9 mm is the most suitable method for umbuzeiro.	(Espíndola et al. 2004)
	• Adding earthworm humus or goat manure to commercial substrates improves umbuzeiro rootstock production.	(de Medeiros et al. 2015)

	• Fertilization with 98.71 kg ha^{-1} of N and 150 kg ha^{-1} of P_2O_5 favors the initial development and shoot dry mass accumulation of umbuzeiro rootstocks.	(de Melo et al. 2005)
	• The tested doses of both N and K were detrimental to the development of umbuzeiro rootstocks.	(de Andrade et al. 2013)
	• Seedlings approximately six months after transplanting are suitable for top wedge grafting.	(dos Reis et al. 2010)
	• Simple whip grafting achieved higher success rates than top wedge grafting in umbuzeiro. Thicker rootstocks led to greater take rates.	(Gomes et al. 2010)
	• Top wedge grafting and simple whip grafting exhibit high take rates (97.1% and 92.4%, respectively), with no influence from scion type or collection time.	(de Araújo and Castro Neto 2002)
	• Watering every three days maintains photosynthetic efficiency and initial growth of umbuzeiro rootstocks.	(Silva et al. 2023)
	• Patch budding using an open window resulted in a higher graft take rate in umbuzeiro (78%).	(Pedrosa et al. 1991)
	• Umbuzeiro, *Spondias mombin*, and *S. venulosa* (cajazeiras) exhibit higher graft take rates as rootstocks.	(Souza 2019)
	• Umbuzeiro shows no incompatibility as a rootstock for other *Spondias* species even after five years.	(Lima Filho and Santos 2009)
Cuttings	• IBA (6,000 mg L^{-1}) application improves cutting rooting but reduces shoot growth.	(Véras et al. 2018a)
	• The highest rooting percentage is obtained from 20 cm cuttings treated with IBA (6,000 mg L^{-1}) and planted in March.	(Rios et al. 2012)
	• Cutting position on the mother plant does not influence rooting or sprouting after 199 days of cultivation.	(Alencar & Oliveira 1997)
	• The use of IAA (10 g L^{-1}) and 16-second immersion in hardwood cuttings promotes greater sprouting and rooting of umbuzeiro cuttings.	(Rocha et al. 2019)
	• Hardwood cuttings exhibited higher survival rates than herbaceous cuttings. For rooting, herbaceous cuttings showed better performance when treated with 500 mg L^{-1} of IBA, achieving 33.33% rooting.	(de Paula et al. 2007)
	• A sand substrate with IBA (9,000 mg L^{-1}) improves rooting and sprouting of umbuzeiro cuttings.	(Ataíde et al. 2017)
	• High concentrations of IBA (9,000 mg L^{-1}) did not promote the development of dormant umbuzeiro cuttings.	(Ataíde et al. 2020)
	• Umbuzeiro plants propagated from seeds exhibit better water performance under drought conditions than those from cuttings.	(Lima Filho 2007)
	• Ethephon (100 mg L^{-1}) combined with IBA (6,000 mg L^{-1}) increases rooting and shoot emergence (47.2%) in umbuzeiro cuttings.	(Véras et al. 2018b)

5.3.7.2. Grafting

Grafting is a propagation technique in which two vegetative parts (the scion and the rootstock) from different plants are joined to establish vascular continuity, allowing the composite organism to grow as a single plant (Mudge 2008). Typically, the scion, obtained from a plant with desirable agronomic traits, forms the canopy and performs essential functions such as photosynthesis, flowering, and fruiting. The rootstock, in turn, provides root system support and facilitates water and nutrient uptake (Ribeiro et al. 2005; Tedesco et al. 2022) (Table 3).

Grafting has emerged as a promising technique for umbuzeiro propagation, ensuring greater genetic uniformity, earlier fruiting, and the use of superior genotypes. Although effective for clonal propagation, grafting requires skilled labor since success heavily depends on precise cuts and the correct alignment of the cambial tissues (Hartmann et al. 2011).

Selecting vigorous rootstocks positively influences grafting success, resulting in higher survival rates and better initial seedling development. The substrate and fertilization used for rootstock production are also crucial: incorporating earthworm humus or goat manure into commercial substrates enhances growth conditions, improving graft success (de Medeiros et al. 2015). Fertilization with 98 kg ha^{-1} of nitrogen and 150 kg ha^{-1} of P_2O_5 also favors initial development and shoot dry mass accumulation of umbuzeiro rootstocks (de Melo et al. 2005).

However, excessive N, P, and K concentrations may hinder seedling development (de Melo et al. 2005; de Andrade et al. 2013) (Table 3).

Irrigation frequency also affects rootstock production; watering every 3 days is recommended to maintain photosynthetic efficiency and promote adequate early growth (Silva et al. 2023). Seedling age directly influences grafting success, with studies indicating that six-month-old seedlings are the most suitable for top-wedge grafting (dos Reis et al. 2010).

Regarding grafting methods, both top-wedge and simple whip grafting have shown high success rates, exceeding 90%, with minimal influence from scion collection time or rootstock type (de Araujo and de Castro Neto 2002) (Figure 8). Some studies report that simple whip grafting achieves higher success rates than top-wedge grafting, particularly when using root-stocks with larger diameters (Espíndola et al. 2004; Gomes et al. 2010). Patch budding with an open window has also shown satisfactory results, with a take rate of about 78%, representing a viable alternative under certain conditions (Pedrosa et al. 1991) (Table 3).

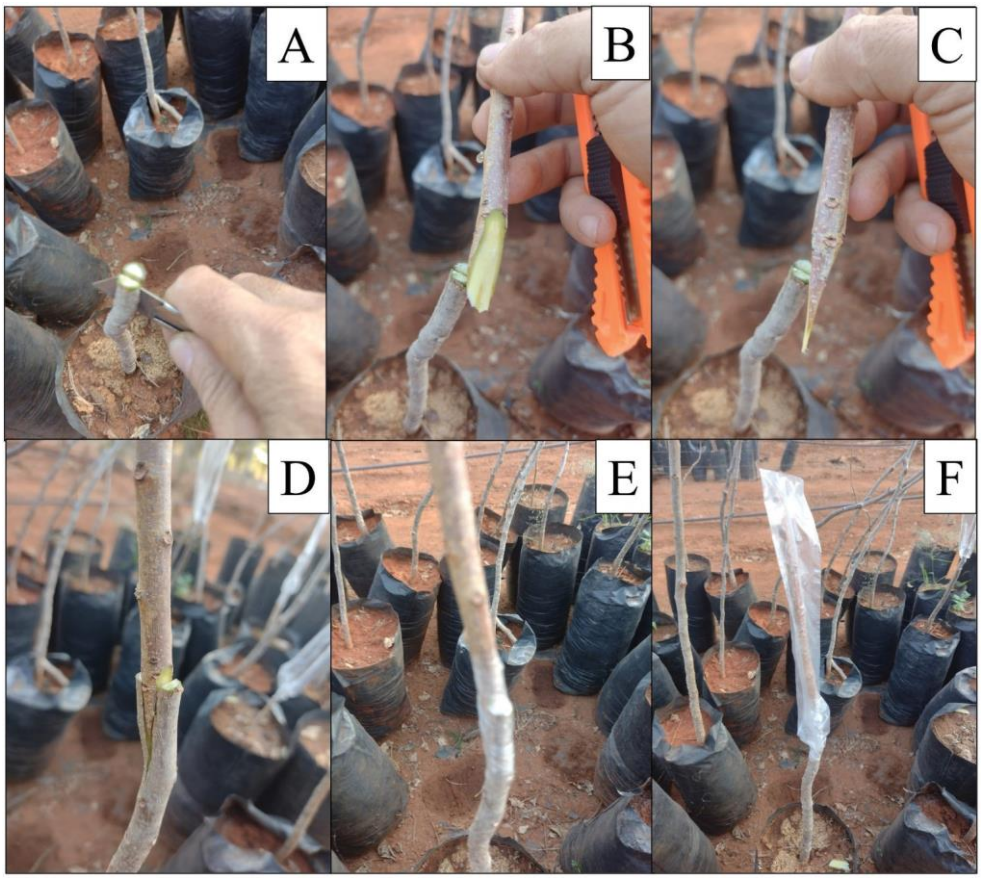


Figure 8. Grafting process of umbuzeiro by top wedge grafting: (A) preparation of the rootstock with a cut in the stem; (B and C) preparation of the scion (wedge cut); (D) insertion of the scion into the rootstock slit; (E) tying with tape to secure the graft; (F) sealing with protective plastic. Source: Escola Técnica da Família Agrícola da Bahia – Paulo Laranjeira.

Furthermore, umbuzeiro exhibits good graft compatibility with other *Spondias* species, such as *S. mombin* and *S. venulosa*, both as scion and rootstock (Table 3). This compatibility broadens the propagation and breeding possibilities. The absence of incompatibility symp-toms even after 5 years supports the potential use of umbuzeiro in interspecific grafting programs (Lima Filho and Santos 2009; Souza 2019).

5.3.7.3. Cuttings

Cuttings are a widely used vegetative propagation technique for clonal multiplication, especially for tropical and native fruit trees. This method involves rooting segments from the mother plant, usually stem or root cuttings, and its success is influenced by factors such as

cutting type, growth regulator use, rooting substrate, and environmental conditions, including cutting collection time (Franzon et al. 2010). For umbuzeiro, cuttings represent a promising alternative for seedling production due to their operational simplicity and the ability to produce genetically identical plants with desirable traits. However, challenges include rooting efficiency and field establishment, as xylopodia formation – essential for survival in semiarid environments – generally does not occur in cuttings (dos Reis et al. 2010) (Table 3).

The use of growth regulators, especially auxins, is directly related to the success of umbuzeiro propagation by cuttings. IBA is the most effective auxin for this species. Application of IBA at 6000 mg L^{-1} promoted greater rooting, although it reduced shoot growth, suggesting a possible redistribution of photoassimilates and hormones toward root formation at the expense of vegetative development (Véras MLM et al. 2018). Similarly, 20 cm-long cuttings treated with IBA (6,000 mg L^{-1}) planted in March resulted in higher rooting rates, highlighting the influence of collection time on technical efficiency (Rios et al. 2012).

IBA (6,000 mg L^{-1}) combined with ethephon (100 mg L^{-1}) increased rooting and sprouting, reaching 47.2% rooted cuttings, demonstrating the potential of combining growth regulators to overcome species-specific physiological limitations (Véras ML et al. 2018). Indole-3-acetic acid (IAA) was also tested; at 10 g L^{-1} with a 16-s immersion, it induced more sprouts and higher rooting percentages in hardwood cuttings, providing an effective alternative to IBA (Rocha et al. 2019).

Cutting type is another determinant of success. Hardwood cuttings have higher survival rates, while herbaceous cuttings show better rooting performance when treated with 500 mg L^{-1} IBA (de Paula et al. 2007). However, cutting position on the mother plant did not affect rooting or sprouting, even after nearly 200 days of cultivation (Alencar and de Oliveira 1997).

Regarding rooting substrates, the use of sand combined with immersion in IBA (9,000 mg L^{-1}) favored rooting and sprouting (Ataíde et al. 2017). However, when cuttings were collected during the plant's dormancy period, even high IBA concentrations (9,000 mg L^{-1}) did not yield satisfactory results, indicating that the physiological stage plays a decisive role in the regulator response (Ataíde et al. 2020).

Although cuttings are a feasible propagation technique for umbuzeiro, studies indicate that seedlings derived from seeds perform better under drought conditions, which may limit the commercial use of cuttings in severely water-stressed environments (Lima Filho 2007). This highlights the importance of xylopodia formation for adaptation and survival in the field.

5.3.8. Micropropagation

Despite increasing interest in plant biotechnology, studies focused on *in vitro* propagation of umbuzeiro remain limited, revealing a significant gap in the technical-scientific knowl-edge about this species. The scarcity of publications indicates that umbuzeiro micropropa-gation is still at an early stage, lacking well-defined protocols for all phases, from establishment and multiplication to rooting and acclimatization.

Among the few available studies, one demonstrated the potential of gibberellic acid (GA_3) at 2.88 μM to stimulate germination and stem elongation, and the effectiveness of using sodium hypochlorite at half concentration (1.25%) for 10 min for disinfestation and establishment of zygotic embryos (Santos et al. 2018). Another study found that 0.1 mg L^{-1} BAP was effective in inducing *in vitro* shoot formation, contributing to the early develop-ment of propagation techniques for the species (Melo et al. 1997).

5.4. Conclusions and future perspectives

This research mapped the main advances and gaps related to umbuzeiro propagation. It became evident that research on umbuzeiro propagation has gained prominence in recent years, reflecting the growing scientific interest in this species due to its significant socio-economic importance in Brazil's semiarid region.

Seed propagation, although representing the natural pathway for species regeneration, has limitations such as slow and uneven germination and low viability under nursery conditions, hindering large-scale seedling production. On the other hand, it maintains genetic variability and promotes early xylopodia formation, an essential structure for plant survival in water-deficit environments, especially when seedlings are intended for forest restoration and/or the rehabilitation of degraded areas.

The analyzed data indicate that umbuzeiro's germination success is strongly related to factors such as fruit physiological maturity, pre-germination treatments using different dormancy-breaking methods, and environmental conditions. Regarding substrate and mineral nutrition, the use of organic compost, animal manure, and balanced fertilization with essential nutrients such as N, P, and K proved effective for seedling growth. The application of growth regulators, such as gibberellic acid (GA_3), also stimulated vegetative development and storage structure formation.

For asexual propagation, grafting is an efficient method for producing seedlings intended for commercial orchards; however, it requires skilled labor, which may limit its adoption. Moreover, a significant gap remains in developing standardized protocols for cuttings, primarily due to the lack of xylopodia formation and a scarcity of studies on micropropagation, which restricts the adoption of efficient strategies for species conservation and sustainable use. Another critical issue is the scarcity of data on the survival and growth of nursery-grown seedlings after transplanting to the field.

The results also highlight the need for greater investment in micropropagation, which could contribute to large-scale propagation and species conservation. Furthermore, con-tinued research on mineral nutrition, seed technology, and traditional propagation techni-ques is essential to improve management practices and promote the sustainable cultivation of umbuzeiro.

Acknowledgements
This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Finance Code 001. The authors would also like to thank Professor Paulo Laranjeira from Escola Técnica da Família Agrícola da Bahia for the images of the umbuzeiro grafting process, James Cardoso for the images of the umbuzeiro, Clesio Nascimento for the images of the fruit, and Vitor Nascimento for the image of the xylopodium.

Disclosure statement
No potential conflict of interest was reported by the author(s).

ORCID
Augusto Vinicius de Souza Nascimento http://orcid.org/0000-0002-7905-2641 Paulo Augusto Almeida Santos http://orcid.org/0000-0002-0790-7663
Ana Veruska Cruz da Silva Muniz http://orcid.org/0000-0002-4177-9335 Ana da Silva Lédo http://orcid.org/0000-0002-4353-4788

Declaration of generative AI and AI-assisted technologies in the writing process
Statement: During the preparation of this work, the author (Nascimento, A) used GPT Chat version 4 to improve the articulation, fluency, and grammatical accuracy of this manuscript. After using this tool/service, the author reviewed and edited the content as needed and assumes full responsibility for the content of the publication.

5.5. References

Acosta-Motos JR et al. 2017. Plant responses to salt stress: adaptive mechanisms. Agronomy. 7(1):18. https://doi.org/10.3390/agronomy7010018

Alencar RD, de Oliveira OF. 1997. Influência da localização dos ramos na planta-matriz no enrai-zamento de estacas de umbuzeiro (*Spondias tuberosa* Arr. Cam Rev Caatinga. 10(1/2):85–90. [accessed 2026 Feb 08]. https://periodicos.ufersa.edu.br/index.php/caatinga/article/view/2498/

4956.

Almeida TS, Fabricante JR. 2021. Modelagem de nicho climático atual e futuro do umbuzeiro. Revista de Biologia e Ciências da Terra. 21(1): [accessed 2026 Jan 28]. https://revistabioterra.blogspot. com/p/bioterra_15.html

Alves GPE, Rocha A. 2023. Emergência de plântulas de umbuzeiro após armazenamento das sementes em diferentes embalagens. Rev Semiárido De Visu. 11(1):20–30. https://doi.org/10. 31416/rsdv.v11i1.383

Anjos JB, Rybka ACP. 2016. Processamento de produtos a base de umbu. In: Drumond MA, Aidar ST, Nascimento CES, Oliveira VR, editors. Umbuzeiro: avanços e perspectivas. Embrapa Semiárido; pp 217–241. [accessed 2026 Feb 08]. https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/ bitstream/doc/1046431/1/UMBUZEIRO-avancos-perspectivas-ed01-2016.pdf

Araújo AG, Carneiro AMP, Palha RP. 2020. Sustainable construction management: a systematic review of the literature with meta-analysis. J Clean Prod. 256:120350. https://doi.org/10.1016/j. jclepro.2020.120350

Ataíde EM, Silva MDS, Souza JMA, Bastos DC. 2017. Ácido indolbutírico e substratos no desenvolvimento de estacas de umbuzeiro em três estádios fenológicos. Agrarian Acad. 4(8):8–15. https:// doi.org/10.18677/Agrarian_Academy_2017b3

Ataíde EM, Souza JMA, Bastos DC, Jardim ADR, Costa RS. 2020. Ácido indolbutírico no enraizamento de estacas de umbuzeiro no estádio de repouso vegetativo. Enciclop Biosfera. 17(34):15. https://doi.org/10.18677/EnciBio_2020D

Awazade AS, Verma D. 2024. Advancing vegetable grafting: a comprehensive review of techniques, challenges, and the future of automated solutions. J Sci Res Rep. 30(11):517–530. https://doi.org/ 10.9734/jsrr/2024/v30i112580

Barros RT, Martins CC, Pereira FECB, Silva GZD. 2018. Conditioning in the promotion and uniformization of umbu seed germination. Rev Bras Frutic. 40(1):e–109. https://doi.org/10.1590/ 0100-29452018109

Batista FRC, Silva SM, Santana MFS, Cavalcante AR. 2015. O umbuzeiro e o semiárido brasileiro. Instituto Nacional do Semiárido.

Cavalcante ACP et al. 2018. Organic substrate and organic foliar fertilizer effect on chlorophyll index and growth in umbuzeiro seedlings. Agron Colomb. 36(2):152–157. https://doi.org/10.15446/ agron.colomb.v36n2.69866

Cavalcanti NB, Resende GM, Brito LTL. 2010. O crescimento de plantas de imbuzeiro (*Spondias tuberosa* Arruda) no semi-árido de Pernambuco. Engenharia Ambiental. 7(3):21–31. [accessed 2026 Jan 28]. https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/895250

Cavalcanti NB, Resende GM, de Lima Brito LT. 2002. Emergência e crescimento do imbuzeiro (*Spondias tuberosa* Arr. Cam.) em diferentes substratos. Rev Ceres. 49(282):97–108. [accessed 2026 Jan 28]. https://ojs.ceres.ufv.br/ceres/article/view/2796

Chaves MM, Maroco JP, Pereira JS. 2003. Understanding plant responses to drought — from genes to the whole plant. Funct Plant Biol. 30(3):239–264. https://doi.org/10.1071/FP02076

Chiminazzo MA, Bombo AB, Charles-Dominique T, Fidelis A. 2023. To protect or to hide: why not both? An investigation of fire-related strategies in Cerrado woody species. Flora. 306:152–350. https://doi.org/10.1016/j.flora.2023.152350

Correia MA et al. 2024. Salicylic acid and soaking times on the emergence, gas exchange and early growth of umbu. Rev Caatinga. 37:e12060. https://doi.org/10.1590/1983-21252024v3712060rc

Cruz FRDS, Andrade LAD, Feitosa RC. 2016. Produção de mudas de umbuzeiro (*Spondias tuberosa* Arruda Câmara) em diferentes substratos e tamanho de recipientes. Ciênc Florest. 26(1):69–80. https://doi.org/10.5902/1980509821092

da Costa NP, Bruno RDLA, Souza FXD, Lima EDPDA. 2001. Efeito do estádio de maturação do fruto e do tempo de pré-embebição de endocarpos na germinação de sementes de umbuzeiro (*Spondias tuberosa* Arr. Câm.). Rev Bras Frutic. 23(3):738–741. https://doi.org/10.1590/S0100-29452001000300060

da Silva EC, Nogueira RJMC, de Araújo FP, de Melo NF, de Azevedo Neto AD. 2008. Physiological responses to salt stress in young umbu plants. Environ Exp Bot. 63(1–3):147–157. https://doi.org/ 10.1016/j.envexpbot.2007.11.010

de Andrade MW, Mendonça V, Hafle OM, de Medeiros PVQ, Mendonça LFM. 2013. Adubos nitrogenados e potássicos na produção de porta-enxertos de umbuzeiro (*Spondias tuberosa* Arr. Cam.) Rev Caatinga. 26(4):117–122. [accessed 2026 Jan 28]. https://periodicos.ufersa.edu.br/caa tinga/article/view/2605

de Araújo FD, Santos CAF, Cavalcanti NDB, Rezende GD. 2001. Influência do período de armazenamento das sementes de umbuzeiro na sua germinação e no desenvolvimento de plântula. Rev Bras Armazen. 26(2):36–39. [accessed 2026 Jan 28]. https://www.alice.cnptia.embrapa.br/handle/ doc/134443

de Araujo FP, de Castro Neto MT. 2002. Influência de fatores fisiológicos de plantas-matrizes e de épocas do ano no pegamento de diferentes métodos de enxertia do umbuzeiro. Rev Bras Frutic. 24(3):752–755. https://doi.org/10.1590/S0100-29452002000300048

de Brito Neto JF et al. 2009. Emergência de plântulas e características morfológicas de sementes e plantas de umbuzeiro. Eng Ambient Pesq e Tecnol. 6(2):224–230. [accessed 2026 Feb 08]. https:// l1nq.com/j5CuR

de Freitas JS et al. 2024. *Spondias tuberosa and Spondias mombin: Nutritional Composition, Bioactive Compounds, Biological Activity and Technological Applications*. Resources. 13(5):68. https://doi. org/10.3390/resources13050068

de Medeiros EVD et al. 2015. População microbiana, disponibilidade de nutrientes e crescimento de umbuzeiro em substratos contendo resíduos orgânicos. Rev Caatinga. 28(3):47–53. https://doi.org/ 10.1590/1983-21252015v28n305rc

de Melo APC et al. 2012. Superação de dormência de sementes e crescimento inicial de plântulas de umbuzeiro. Semina Ciênc Agrárias. 33(4):1343–1350. https://doi.org/10.5433/1679-0359. 2012v33n4p1343

de Melo ASD et al. 2005. Desenvolvimento de porta-enxertos de umbuzeiro em resposta à adubação com nitrogênio e fósforo. Cienc Rural. 35(2):324–331. https://doi.org/10.1590/S0103-84782005000200012

de Oliveira KA et al. 2025. *Spondias tuberosa*: a promising food species from the Caatinga biome—a comprehensive review of its chemistry, biological and nutritional potential, and applications. Biol Nutr Potential Appl Rev Bras Farmacogn. 35(5):922–934. https://doi.org/10.1007/s43450-025-00686-0

de Paula LA, Boliani AC, de Souza Corrêa L, Celoto MIB. 2007. Efeito do ácido indolbutírico e raizon no enraizamento de estacas herbáceas e lenhosas de umbuzeiro. Acta Sci Agron. 29(3):411–414. https://doi.org/10.4025/actasciagron.v29i3.468

de Souza AA et al. 2005. Semillas de *Spondias tuberosa* oriundas de frutos cosechados en cuatro estadios de maduración y almacenadas. Rev bras eng agríc Ambient. 9(3):372–378. https://doi.org/ 10.1590/S1415-43662005000300012

de Souza ADV, dos Santos Sousa W, Peixoto N, Do Carmo Vieira M, dos Santos EA. 2022. Superação de dormência de sementes de umbuzeiro em função da idade e diferentes concentrações de ácido giberélico. Res Soc Dev. 11(9):e1811931339. https://doi.org/10.33448/rsd-v11i9.31339

de Souza BM, Costa Neto EM. 2025. Uso histórico da raiz do umbuzeiro (*Spondias tuberosa* Arr. Cam. Anacardiaceae) no semiárido nordestino. Ouricuri. 15(1):3–23. https://doi.org/10.59360/ ouricuri.vol15.i1.a19559

dos Reis RVD et al. 2010. Estádios de desenvolvimento de mudas de umbuzeiros propagadas por enxertia. Cienc Rural. 40(4):787–792. https://doi.org/10.1590/S0103-84782010005000043

Dutra TR, Massad MD, Sarmento MFQ, Oliveira JC. 2012. Indolebutyric acid and substrates on *Spondias tuberosa* layering. Pesq Agropec Trop. 42(4):424–429. https://doi.org/10.1590/S1983-40632012000400010

Dutra TR, Massad MD, Sarmento MFQ, Oliveira JC. 2023. Propagação vegetativa de *Spondias tuberosa* pela técnica de alporquia utilizando ácido indolbutírico e diferentes substratos. Rev Delos. 16(45):1–10. https://doi.org/10.55905/rdelosv16.n45-001

Epstein E, Bloom AJ. 2005. Mineral nutrition of plants: principles and perspectives. Sinauer Associates.

Espíndola A, Almeida C, Carvalho N, Roza M. 2004. Diâmetro do caule e método de enxertia na formação de mudas de umbuzeiro (*Spondias tuberosa* Arr. Cam.). Rev Bras Agrociência. 10(3):371–372. [accessed 2026 Jan 28]. https://periodicos.ufpel.edu.br/index.php/CAST/article/ view/975

Esselen DJ. 1930. The litchi. Farming South Africa. 5(46):543–544. [accessed 2026 Jan 28]. https:// journals.co.za/doi/pdf/10.10520/AJA00148490_291

Fonseca N. 2010. Propagação do umbuzeiro por enxertia. Circular técnica 96. Cruz das Almas-BA: Embrapa Mandioca e Fruticultura. [accessed 2026 Jan 28]. https://www.infoteca.cnptia.embrapa. br/infoteca/handle/doc/873080?locale=pt_BR

Franzon RC, Carpenedo S, Silva JCS. 2010. Produção de mudas: principais técnicas utilizadas na propagação de fruteiras. Embrapa Cerrados; [accessed 2026 Jan 28]. https://www.infoteca.cnptia. embrapa.br/infoteca/handle/doc/883211

Gomes WDA et al. 2010. Garfagem e diâmetro de porta-enxerto na obtenção de mudas de umbuzeiro do acesso laranja. Rev Bras Frutic. 32(3):952–959. https://doi.org/10.1590/S0100-29452010000300041

Gonçalves EG, Lorenzi H. 2026. Morfologia Vegetal | Organografia e Dicionário Ilustrado de Morfologia das Plantas Vasculares 3 (Instituto Plantarum de Estudos da Flora) 544p.

Gonçalves FC, Neves OSC, Carvalho JGD. 2006. Deficiência nutricional em mudas de umbuzeiro decorrente da omissão de macronutrientes. Pesq Agropec Bras. 41(6):1053–1057. https://doi.org/ 10.1590/S0100-204X2006000600023

Gupta A, Rico-Medina A, Caño-Delgado AI. 2020. The physiology of plant responses to drought. Science. 368(6488):266–269. https://doi.org/10.1126/science.aaz7614

Hartmann HT, Kester DE, Davies FT Jr, Geneve RL. 2011. Plant propagation: principles and practices. Prentice Hall.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2023. Pesquisa da Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura (PEVS) - Tabelas. [accessed 2026 Jan 28]. https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pevs/ tabelas

Kiill LHP, Araújo FP, Oliveira VR, Ribeiro M. 2016. Caracterização botânica e biologia reprodutiva. In: Drumond MA, Aidar ST, Nascimento CES, Oliveira VR, editors. Umbuzeiro: avanços e perspectivas. Embrapa Semiárido; pp 53–79. [accessed 2026 Feb 08]. https://www.infoteca. cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1046431/1/UMBUZEIRO-avancos-perspectivas-ed01-2016.pdf

Leal AS, Cozin BB, Leite MCM, Martins AR. 2026. How do legumes cope with environmental filters in savanna ecosystems? Analysis of morphoanatomical and ultrastructural traits of legumes aerial organs and ecological implications. Braz J Bot. 49(1):[páginas]. https://doi.org/10.1007/s40415-026-01133-7

Leal AS, Fidelis A, de Araujo MA, Cozin BB, Martins AR. 2024. Belowground systems in tropical savanna: fabaceae morphoanatomical traits and their relation to fire. Plant Biol J. 26(7):1118–1130. https://doi.org/10.1111/plb.13730

Leite RA et al. 2021. Métodos de quebra de dormência em sementes de Umbuzeiro (*Spondias tuberosa* Arr. Cam.) (Anacardiaceae) para a produção de mudas. Res Soc Dev. 10(9): e13910917958. https://doi.org/10.33448/rsd-v10i9.17958

Lima Filho JMP. 2007. Water status and gas exchange of umbu plants (*Spondias tuberosa* Arr. Cam.) propagated by seeds and stem cuttings. Rev Bras Frutic. 29(2):355–358. https://doi.org/10.1590/ S0100-29452007000200032

Lima Filho JMP. 2011. Ecofisiologia do umbuzeiro (*Spondias tuberosa* Arr. Cam.). Embrapa Semiárido. [accessed 2026 Jan 28]. https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/ doc/911418/4/SDC240.pdf

Lima Filho JMP, Santos CAF. 2009. Avaliações fenotípicas e fisiológicas de espécies de spondias tendo como porta enxerto o umbuzeiro (*Spondias tuberosa* Cam.). Rev Caatinga. 22(1):59–63. [accessed 2026 Jan 28]. https://periodicos.ufersa.edu.br/caatinga/article/view/148

Lins Neto EMF, Peroni N, Maranhão CMC, Maciel MIS, Albuquerque UP. 2012. Analysis of umbu (*Spondias tuberosa Arruda* (Anacardiaceae)) in different landscape management regimes. Environ Monit Assess. 184(7):4489–4499. https://doi.org/10.1007/s10661-011-2280-7

Lopes PSN, Magalhães HM, Gomes JG, Brandão Júnior DS, Araújo VD. 2009. Superação da dormência de sementes de umbuzeiro (*Spondias tuberosa*, Arr. Cam.) utilizando diferentes métodos. Rev Bras Frutic. 31(3):872–880. https://doi.org/10.1590/S0100-29452009000300034

Lorenzi H. 2020. Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil. Vol 1. 8th ed. Instituto Plantarum.

Maia GN. 2012. Caatinga: Árvores e arbustos e suas utilidades. 2nd ed. Printcolor Gráfica e

Editora.

Marschner P. 2012. Marschner's mineral nutrition of higher plants. 3rd ed. Academic Press.

Matos FS, Freitas IAS, Pereira VLG, Pires WKL. 2020. Effect of gibberellin on growth and development of *Spondias tuberosa* seedlings. Rev Caatinga. 33(4):1124–1130. https://doi.org/10.1590/ 1983-21252020v33n427rc

Matta VM, Torrezan R, Ribeiro LO. 2019. Agregação de valor ao fruto do umbuzeiro. In: Gonçalves NP, Saturnino HM, Donato SLR, editors. Umbuzeiro: a fruteira da caatinga. Vol 40. Informe Agropecuário-EPAMIG; pp 112–119.

Melo N, Fári M, Teixeira J. 1997. In vitro cultivation of nodal segments of the umbu tree [*Spondias tuberosa* (Arr.) Cam]. Acta Hortic. 447(447):535–538. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1997. 447.105

Mertens J, Almeida-Cortez JS, Germer J, Sauerborn J. 2015. Umbuzeiro (*Spondias tuberosa*): a systematic review. Rev Bras Ciênc Ambient. 36(36):179–197. https://doi.org/10.5327/Z2176-947820151006

Mertens J, Germer J, Siqueira Filho JA, Sauerborn J. 2017a. *Spondias tuberosa* Arruda (Anacardiaceae), a threatened tree of the Brazilian Caatinga? Braz J Biol. 77(3):542–552. https:// doi.org/10.1590/1519-6984.18715

Mertens J, Germer S, Germer J, Sauerborn J. 2017b. Comparison of soil amendments for reforestation with a native multipurpose tree under semiarid climate: root and root tuber response of *Spondias tuberosa*. For Ecol Manage. 396:1–10. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.04.010

Mitchell JD, Daly DC. 2015. A revision of *Spondias* L. (Anacardiaceae) in the neotropics. PhytoKeys. 55:1–92. https://doi.org/10.3897/phytokeys.55.8489

Moher D, Liberati A, Tetzlaff J, Altman DG, PRISMA Group. 2009. Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement. PLoS Med. 6(7):e1000097. https:// doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097

Mudge K. 2008. Grafting: theory and practice. In: Beyl CA, Trigiano R, editors. Plant propagation concepts and laboratory exercises. CRC Press; pp 273–292.

Munns R, Tester M. 2008. Mechanisms of salinity tolerance. Annu Rev Plant Biol. 59(1):651–681. https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092911

Neves OSC, Carvalho JGD, Ferreira EVD, Pereira NV. 2007b. Crescimento, nutrição mineral e nível crítico foliar de K em mudas de umbuzeiro, em função da adubação potássica. Ciênc agrotec. 31(3):636–642. https://doi.org/10.1590/S1413-70542007000300006

Neves OSC, Carvalho JGD, Oliveira EVD, Neves VBF. 2008. Crescimento, nutrição mineral e nível crítico foliar de P em mudas de umbuzeiro, em função da adubação fosfatada. Rev Bras Frutic. 30(3):801–805. https://doi.org/10.1590/S0100-29452008000300040

Neves OSC, Carvalho JGD, Rodrigues CR. 2004. Crescimento e nutrição mineral de mudas de umbuzeiro (*Spondias tuberosa* Arr. Cam.) submetidas a níveis de salinidade em solução nutritiva. Ciênc agrotec. 28(5):997–1006. https://doi.org/10.1590/S1413-70542004000500005

Neves OSC, Ferreira EVDO, Carvalho JGD, Soares CRFS. 2007a. Adição de níquel na solução nutritiva para o cultivo de mudas de umbuzeiro. Rev Bras Ciênc Solo. 31(3):485–490. https:// doi.org/10.1590/S0100-06832007000300008

Neves OS, de Carvalho JG, Ferreira EV, Pereira NV, Neves VB. 2007c. Efeito da adubação nitrogenada sobre o crescimento e acúmulo de nutrientes em mudas de umbuzeiro. Rev Bras Ciênc Agrár. 2(3):200–207. https://doi.org/10.5039/agraria.v2i3a384

Nobre DAC, Neta ICS, Maia VM, de Souza David AMS, Alexandre RS. 2018. Qualidade física, fisiológica e superação de dormência de sementes de umbuzeiro (*Spondias tuberosa* Arr. Câmara) Pesq Agropec Pernamb. 22:e201705. https://doi.org/10.12661/pap.2017.013

Novais RF, Neves JCL, Barros NF. 2007. Fertilidade do solo. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.

Oliveira MC, Silva TC. 2019. Bibliometric method for mapping the state-of-the-art and identifying research gaps and trends in literature. In: Silvio AR, Costa ML, editors. Handbook of research on emerging technologies for effective project management. IGI Global; pp 1–20. [accessed 2026 Jan 28]. https://www.intechopen.com/chapters/69867

Oliveira MMD et al. 2019. Crescimento e partição de massa seca em plantas jovens de amburana (*Amburana cearensis*) e de umbuzeiro (*Spondias tuberosa*). Ciênc Florest. 29(3):1142–1153. https://doi.org/10.5902/1980509827189

Page MJ et al. 2021. The Prisma 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. BMJ. 372:n71. https://doi.org/10.1136/bmj.n71

Pedrosa AC et al. 1991. Métodos de enxertia do umbuzeiro (*Spondias tuberosa* Arr. Cam.) em viveiro. Rev Bras Frutic. 13(1):59–62. [accessed 2026 Jan 28]. https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/ bitstream/doc/132785/1/Gonzaga2.pdf

Pereira FRA, Pereira WE, dos Santos Pessoa AM, de Vasconcelos ESAG. 2023. Crescimento inicial de mudas de *Spondias tuberosa* irrigadas com água salina. Rev JRG Estud Acad. 6(12):494–513. https://doi.org/10.55892/jrg.v6i12.531

Pires ES et al. 2020. Análise de crescimento de plantas de umbuzeiro sob diferentes concentrações de giberelina. Agrarian. 13(48):141–150. https://doi.org/10.30612/agrarian.v13i48.7990

Ribeiro GD, Costa JNM, Vieira AH, Santos MRA. 2005. Enxertia em fruteiras (Recomendação Técnica 92). Embrapa Rondônia. [accessed 2026 Jan 28]. https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bit stream/doc/859550/1/rt92enxertiadefruteiras.pdf

Rios ÉS, Pereira MDC, Santos LDS, de Souza TC, Ribeiro VG. 2012. Concentrações de ácido indolbutírico, comprimento e época de coleta de estacas, na propagação de umbuzeiro. Rev Caatinga. 25(1):52–57. [accessed 2026 Jan 28]. https://periodicos.ufersa.edu.br/caatinga/article/ view/2113

Rocha GT, Silva AGD, Martins JB, Peixoto N, Rodrigues F. 2019. Vegetative propagation of *Spondias tuberosa* e *Spondias dulcis* with the use of immersion in indole acetic acid. Rev Caatinga. 32(4):858–866. https://doi.org/10.1590/1983-21252019v32n401rc

Rodrigues AMB et al. 2025. Pre-germination treatments for *Spondias tuberosa* seeds. Rev Delos. 18 (64):e4044. https://doi.org/10.55905/rdelosv18.n64-078

Rodrigues AMB, et al. 2024. Unveiling the structure of *Spondias tuberosa* dispersal units through x-ray imaging. Genet Resour Crop Evol. 71(2):947–956. https://doi.org/10.1007/s10722-023-01751-0

Rodrigues NL et al. 2024. Nutritional and biological attributes of Spondias tuberosa (umbu) fruit: an integrative review with a systematic approach. J Food Compost Anal. 130:106196. https://doi.org/ 10.1016/j.jfca.2024.106196

Santos PAA et al. 2018. Embryo rescue of *Spondias tuberosa* and exogenous application of gibberellic acid. Acta Hortic. 1224(1224):39–44. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2018.1224.6

Silva EC, Nogueira RJ, Vale FH, Araújo FPD, Pimenta MA. 2009a. Stomatal changes induced by intermittent drought in four umbu tree genotypes. Braz J Plant Physiol. 21(1):33–42. https://doi. org/10.1590/S1677-04202009000100005

Silva EC, Nogueira RJ, Vale FH, Melo NFD, Araújo FPD. 2009b. Water relations and organic solutes production in four umbu tree (*Spondias tuberosa*) genotypes under intermittent drought. Braz J Plant Physiol. 21(1):43–53. https://doi.org/10.1590/S1677-04202009000100006

Silva LDA et al. 2023. Morphophysiology and water relations of *Spondias* rootstocks under different irrigation frequencies. Rev Caatinga. 36(4):865–874. https://doi.org/10.1590/1983-21252023v36n414rc

Silva MG, Amorim SM. 2009. Estresse salino em plantas de *Spondias tuberosa* Arruda (Câmara) colonizadas com fungos micorrízicos arbusculares. Rev Caatinga. 22(2): [accessed 2026 Jan 28]. https://periodicos.ufersa.edu.br/caatinga/article/view/226

Soltani A, et al. 2021. The genetics and physiology of seed dormancy: a crucial trait in common bean domestication. BMC Plant Biol. 21(1):58. https://doi.org/10.1186/s12870-021-02837-6

Souza FXD. 2019. *Spondias* rootstock in the formation of seedlings of the yellow mombin. Rev Ciência Agronômica. 50(4):635–639. https://doi.org/10.5935/1806-6690.20190075

Taiz L, Zeiger E, Møller IM, Murphy A. 2017. Fisiologia e desenvolvimento vegetal. 6th ed. Artmed.

Tedesco S, Fevereiro P, Kragler F, Pina A. 2022. Plant grafting and graft incompatibility: a review from the grapevine perspective. Sci Hortic. 299:111019. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111019

Van Eck NJ, Waltman L. 2010. Software survey: vosviewer, a computer program for bibliometric mapping. Scientometrics. 84(2):523–538. https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3

Véras ML et al. 2018. Propagation of umbuzeiro (*Spondias tuberosa* Arr. Cam.), a native plant to Brazilian semi-arid regions, using ethephon and indolebutyric acid (IBA). Aust J Crop Sci. 12(4):602–609. https://doi.org/10.21475/ajcs.18.12.04.pne888

Véras MLM et al. 2018. Enraizamento de estacas de umbuzeiro potencializado pela aplicação de ácido indol-3-butírico (AIB). Rev Bras Ciênc Agrár. 13(3):1–9. https://doi.org/10.5039/agraria. v13i3a5541

Wang Q, Li S, Li J, Huang D. 2024. The utilization and roles of nitrogen in plants. Forests. 15(7):1191. https://doi.org/10.3390/f15071191

Willis CG et al. 2014. The evolution of seed dormancy: environmental cues, evolutionary hubs, and diversification of the seed plants. New Phytol. 203(1):300–309. https://doi.org/10.1111/nph.12782

6. ARTIGO 3
DA UNIDADE DE DISPERSÃO À MUDA: VARIAÇÃO ENTRE PROCEDÊNCIAS E MATRIZES DE *Spondias tuberosa* Arruda NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

RESUMO

A identificação da variabilidade entre árvores matrizes pode contribuir para a seleção de fontes de sementes e para a produção de mudas de maior qualidade de umbuzeiro (*Spondias tuberosa* Arruda), além de fornecer subsídios para a conservação da espécie. Objetivou-se avaliar a biometria das unidades de dispersão, a emergência de plântulas e o crescimento inicial de mudas provenientes de diferentes procedências geográficas e árvores matrizes. Foram avaliadas matrizes provenientes de Graccho Cardoso, Nossa Senhora da Glória e Poço Redondo, Sergipe, Brasil. A biometria das unidades de dispersão foi determinada em 17 matrizes, enquanto a emergência e o desenvolvimento das plântulas e mudas foram avaliados em conjuntos de matrizes selecionados nas diferentes etapas experimentais. Os dados foram submetidos a análises univariadas e multivariadas. As características biométricas das unidades de dispersão apresentaram variação significativa entre as árvores matrizes, sem diferenciação consistente entre as procedências geográficas. A emergência, a velocidade de emergência e o crescimento inicial também variaram entre matrizes, evidenciando diferenças no potencial de estabelecimento das plântulas. Após o transplantio, a maioria das características de crescimento apresentou comportamento semelhante entre as matrizes, enquanto diferenças foram observadas para o índice de clorofila, a biomassa radicular, o comprimento do xilopódio e o índice de qualidade de Dickson. A análise de componentes principais integrada explicou 81,43% da variação total nos dois primeiros componentes e revelou associações distintas entre as características das unidades de dispersão, a emergência, o crescimento inicial, o desenvolvimento do xilopódio e a qualidade das mudas. Não foi observado agrupamento definido das matrizes conforme a procedência geográfica. A variação observada ocorreu predominantemente entre árvores matrizes, indicando que a seleção individual das fontes de sementes pode ser mais relevante do que a procedência geográfica para a produção de mudas de umbuzeiro.

Palavras-chave: Caatinga, emergência de plântulas, qualidade de mudas, variabilidade fenotípica, xilopódio.

6.1. Introdução

O umbuzeiro (*Spondias tuberosa* Arruda) é uma frutífera nativa da Caatinga e endêmica do Brasil, que pertence à família Anacardiaceae (Mitchell; Daly, 2015). A espécie é reconhecida por sua importância socioeconômica e adaptação às condições de elevada temperatura e baixa disponibilidade hídrica (Rocha *et al.*, 2024; Mertens *et al.*, 2017). O umbuzeiro apresenta mecanismos morfofisiológicos que favorecem sua sobrevivência durante os períodos de escassez hídrica, destacando-se a caducifolia e a formação de estruturas radiculares especializadas no armazenamento de água e reservas, conhecidas como xilopódios (Lins Neto *et al.*, 2013; Silva *et al.*, 2009). Além de sua relevância ecológica, o umbuzeiro possui grande importância socioeconômica, principalmente para comunidades rurais, que utilizam seus frutos tanto para o consumo *in natura* quanto para a produção de polpas, sucos, doces, geleias e outros produtos processados (Mertens *et al.*, 2015, 2017; Sales *et al.*, 2025).

Apesar desse potencial, a exploração do umbuzeiro ainda ocorre predominantemente de forma extrativista, com poucos pomares comerciais implantados e reduzido uso de materiais propagativos selecionados (Gama *et al.*, 2024). Esse cenário, associado às alterações no uso da terra, à baixa ocorrência de indivíduos jovens em algumas populações naturais e à baixa

ocorrência de regeneração natural, evidencia a necessidade de estratégias voltadas à conservação, domesticação e cultivo sustentável da espécie (Gama *et al.*, 2024; Mertens *et al.*, 2017; Sales *et al.*, 2025; Santos *et al.*, 2021). Nesse contexto, a identificação de árvores matrizes com características superiores e a produção de mudas de qualidade constituem etapas fundamentais para o estabelecimento de plantios, a conservação dos recursos genéticos e o desenvolvimento de futuros programas de seleção e melhoramento (Cruz *et al.*, 2016; Santana *et al.*, 2025; Silva *et al.*, 2025).

A propagação por sementes é particularmente importante para a conservação da variabilidade genética, a produção de porta-enxertos e a obtenção de mudas destinadas a plantios comerciais ou à restauração de áreas degradadas (Carvalho *et al.*, 2021; Pedrini *et al.*, 2020). Entretanto, a emergência de plântulas de umbuzeiro é frequentemente lenta e desuniforme, condição atribuída à dormência das sementes e à resistência mecânica exercida pelo endocarpo rígido e lignificado, que dificulta a expansão do embrião e pode limitar a entrada de água e oxigênio (Lopes *et al.*, 2009; Nascimento *et al.*, 2026). Além disso, as unidades de dispersão apresentam variações quanto às dimensões, à massa e à estrutura interna, podendo conter sementes bem formadas, malformadas, translúcidas ou sem sementes, características que podem afetar diretamente sua qualidade física e fisiológica (Rodrigues *et al.*, 2024).

As características biométricas das unidades de dispersão podem refletir tanto diferenças genéticas entre os indivíduos quanto as condições ambientais às quais as plantas matrizes estiveram submetidas durante a floração, formação e maturação dos frutos (Bezodis; Penfield, 2024; Singh *et al.*, 2017). Consequentemente, unidades de dispersão provenientes de diferentes matrizes ou localidades podem apresentar respostas distintas quanto à biometria, à emergência, à velocidade e uniformidade do processo germinativo e ao desempenho inicial das plântulas e mudas (Benamirouche; Chouial; Guechi, 2025; Gerber *et al.*, 2021; Silva *et al.*, 2025). Estudos com umbuzeiro têm demonstrado grande variabilidade genética e fenotípica entre acessos, procedências e progênies, indicando que a origem do material propagativo pode influenciar características de interesse para a conservação e o cultivo da espécie (Nascimento *et al.*, 2025; Sales *et al.*, 2024).

Entretanto, a distribuição da variabilidade no umbuzeiro não depende exclusivamente da distância ou da procedência geográfica, uma vez que diferenças expressivas também podem ocorrer entre árvores matrizes pertencentes a uma mesma população (Sales *et al.*, 2024; Santos *et al.*, 2021). Avaliações recentes de frutos e endocarpos provenientes de diferentes matrizes evidenciaram elevada diversidade fenotípica dentro das populações naturais, reforçando a importância de amostragens que contemplem um número representativo de indivíduos (Pereira *et al.*, 2021; Silva *et al.*, 2025).

Embora diferentes estudos tenham abordado isoladamente a biometria de frutos e unidades de dispersão, a germinação, a diversidade genética ou o desenvolvimento de mudas de umbuzeiro, ainda são escassas as avaliações integradas que acompanham materiais provenientes das mesmas árvores matrizes ao longo das diferentes etapas de propagação. Essa abordagem permite verificar se as diferenças observadas nas unidades de dispersão estão associadas à emergência, ao vigor das plântulas e à qualidade das mudas, além de auxiliar na identificação de características úteis para a seleção precoce de materiais propagativos. Assim, o presente estudo teve como objetivo caracterizar e comparar a biometria das unidades de dispersão, a emergência de plântulas e o crescimento inicial de mudas de umbuzeiro provenientes de diferentes procedências geográficas e árvores matrizes, bem como investigar as relações entre as características avaliadas.

6.2. Material e Métodos

6.2.1. Área de coleta e material vegetal

O estudo foi conduzido com material vegetal de umbuzeiro proveniente de árvores matrizes localizadas em três municípios do estado de Sergipe: Graccho Cardoso (GC), Nossa

Senhora da Glória (NSG) e Poço Redondo (PR) (Figura 1). Para fins de análise, cada município foi considerado uma procedência geográfica, enquanto as árvores amostradas em cada local foram tratadas como matrizes representativas da variação existente dentro de cada procedência. As matrizes foram nomeadas sequencialmente pelo número de registro de coleta, seguida da abreviatura do município de origem.

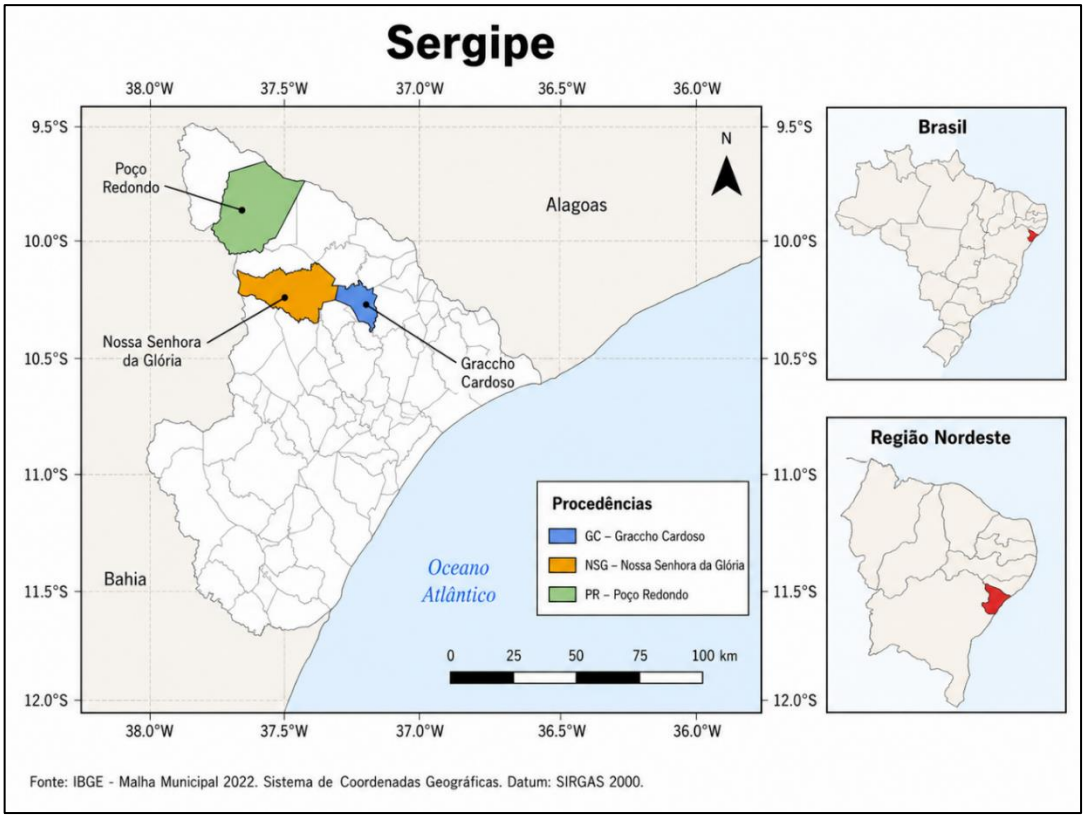


Figura 1. Localização das procedências geográficas de umbuzeiro avaliadas no estudo, com destaque para o estado de Sergipe, região Nordeste do Brasil, e para os municípios de Graccho Cardoso, Nossa Senhora da Glória e Poço Redondo.

As áreas de coleta estão inseridas no semiárido sergipano e apresentam clima quente e sazonalmente seco, embora difiram entre si principalmente quanto à disponibilidade hídrica anual. As principais características ambientais das áreas amostradas encontram-se descritas na Tabela 1.

Tabela 1. Caracterização das procedências geográficas de umbuzeiro amostradas no estado de Sergipe.

Procedência	Matrizes	Temperatura °C (média)	Pluviosidade mm (média anual)
Graccho Cardoso	7	24,7	823,9
Nossa Senhora da Glória	5	24,2	702,4
Poço Redondo	5	25,2	387,8

Fonte: EMDAGRO.

De modo geral, as árvores matrizes foram localizadas em paisagens com diferentes graus de antropização, incluindo quintais rurais, áreas de pastagem, bordas de propriedades e remanescentes de vegetação associados ao uso agropecuário. Essa condição reflete o contexto de ocorrência do umbuzeiro na região, frequentemente mantido em áreas manejadas devido à sua importância alimentar, cultural e socioeconômica para populações rurais do semiárido.

As árvores matrizes foram selecionadas em campo com base na presença de frutos maduros e bom estado fitossanitário aparente. Após a coleta, os frutos foram identificados conforme a matriz e a procedência geográfica de origem, acondicionados em recipientes apropriados e transportados ao laboratório. Os frutos foram coletados diretamente do solo, sob a copa da planta-mãe, após dispersão natural (Nascimento *et al*., 2026).

No laboratório, os frutos foram despolpados manualmente, e as unidades de dispersão obtidas foram lavadas em água corrente para remoção dos resíduos de polpa aderidos ao endocarpo. Em seguida, as unidades de dispersão foram submetidas à secagem ao sol, dispostas em camada única sobre superfície limpa, até a retirada do excesso de umidade superficial. Após a secagem, o material foi acondicionado em sacos plásticos tipo zip lock, devidamente identificados por matriz e procedência, e armazenados no laboratório em temperatura ambiente por aproximadamente dois meses, até a realização das avaliações biométricas e dos experimentos de emergência.

6.2.2. Caracterização biométrica das unidades de dispersão

Para a caracterização biométrica, foram avaliadas unidades de dispersão de 17 árvores matrizes de umbuzeiro distribuídas nas três procedências geográficas. Para cada matriz, foram analisadas 50 unidades de dispersão, organizadas em cinco repetições de dez unidades, totalizando 850 unidades de dispersão avaliadas. Em cada unidade de dispersão, foram mensurados o comprimento, a largura e a espessura, com auxílio de paquímetro digital (precisão de 0,01 mm), sendo os resultados expressos em milímetros. A massa individual foi determinada em balança semianalítica (precisão de 0,001 g), com os valores expressos em gramas.

A partir dessas dimensões foram calculadas a razão comprimento/largura (RC/L), o diâmetro geométrico médio (Dg) e a esfericidade (ϕ) (Mohsenin, 1986), conforme as seguintes equações:

$$R_{C/L} = \frac{C}{L} \; ; D_g = (C \times L \times E)^{1/3} \; ; \phi = \frac{D_g}{C} \times 100$$

em que C, L e E correspondem, respectivamente, ao comprimento, largura e espessura.

O teor de água das unidades de dispersão de doze matrizes foi determinado de acordo com as Normas para Análise de Sementes (RAS; Brasil, 2025) utilizando o método de secagem em estufa a 105 ± 2 °C por 24 h. Foram utilizadas cinco repetições de dez sementes e os resultados foram expressos em base úmida.

6.2.3. Teste de emergência de plântulas

O teste de emergência foi conduzido em casa de vegetação com unidades de dispersão de 10 árvores matrizes, utilizando bandejas de polietileno preenchidas com areia lavada como substrato. As bandejas apresentavam dimensões de 53 × 27 cm e eram compostas por 128 células, cada uma com capacidade aproximada de 20 mL. Cada célula apresentava 29 mm de diâmetro na abertura superior, 42 mm de profundidade e 10 mm de diâmetro na base.

O experimento foi conduzido com oito repetições de 25 unidades de dispersão de dez árvores matrizes, totalizando 200 unidades de dispersão por matriz. As unidades de dispersão foram distribuídas nas células das bandejas e mantidas em casa de vegetação, com irrigação realizada diariamente.

As avaliações foram realizadas diariamente durante 60 dias, registrando-se o número de plântulas emergidas em cada repetição. Considerou-se emergida a unidade de dispersão que apresentou emergência do hipocótilo acima do substrato. A partir dos dados diários, foram calculadas as variáveis apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Variáveis de emergência calculadas a partir das contagens diárias e respectivas expressões utilizadas.

Variável	Expressão utilizada	Descrição dos termos
Primeira contagem aos 30 dias (PC30%)	$PC_{30}(\%) = \left(\frac{N_{30}}{25}\right) \times 100$	N_{30} = número acumulado de plântulas emergidas até o 30° dia; 25 = número de unidades de dispersão por repetição.
Emergência final (E%)	$E(\%) = \left(\frac{N}{25}\right) \times 100$	N = número total de plântulas emergidas ao final do período de avaliação; 25 = número de unidades de dispersão por repetição.
Índice de velocidade de emergência (IVE) (Maguire, 1962)	$IVE = \sum \left(\frac{E_i}{D_i}\right)$	E_i = número de plântulas emergidas no dia *i*; D_i = dia após a instalação do experimento.
Tempo médio de emergência (TME)	$TME = \frac{\sum(E_i \cdot D_i)}{\sum E_i}$	E_i = número de plântulas emergidas no dia *i*; D_i = dia após a instalação do experimento.
Velocidade média de emergência (VME)	$VME = \frac{1}{TME}$	TME = tempo médio de emergência.
Sincronia da emergência (Z)	$Z = \frac{\sum_{i=1}^{k} C_{n_i,2}}{C_{N,2}}$	$C_{Ei,2}$ = combinação, duas a duas das plântulas emergidas no tempo *i*; $C_{N,2}$ = combinação, duas a duas do total de plântulas emergidas; *k* = último dia de avaliação.
Incerteza da emergência (U)	$U = -\sum(f_i \cdot \log_2 f_i)$	f_i = frequência relativa da emergência no dia *i*;
Emergência acumulada (GAc)	$EAc_i = \frac{\sum_{j=1}^{i} n_j}{N} \times 100$	EAc_i = germinação acumulada no dia *i*; n_j = número de sementes germinadas no dia *j*; N = número total de sementes avaliadas por matriz; *i* = dia de avaliação.

6.2.4. Caracterização morfológica das plântulas

A caracterização morfológica inicial das plântulas foi realizada aos 30 dias após a semeadura, utilizando-se plântulas provenientes do teste de emergência. Para essa avaliação, foram consideradas dez árvores matrizes, sendo avaliadas dez plântulas por matriz.

As plântulas foram avaliadas quanto à altura da parte aérea (H, cm), diâmetro do caule (D, mm), número de folhas (NF), comprimento do epicótilo (Epi, cm), comprimento do hipocótilo (Hipo, cm), diâmetro do xilopódio (DX, mm), comprimento do xilopódio (CX, mm) e massa seca total da plântula (MS, g).

As mensurações de altura foram realizadas com régua graduada. O diâmetro do caule, comprimento e diâmetro do xilopódio foram determinados com auxílio de paquímetro digital. Após as avaliações morfológicas, as plântulas foram acondicionadas em sacos de papel e submetidas à secagem em estufa de circulação forçada de ar até massa constante. Em seguida, a massa seca total foi determinada em balança semianalítica, sendo os resultados expressos em gramas.

6.2.5. Crescimento inicial das mudas

Após o teste de emergência, as plântulas de 9 matrizes com 30 dias de idade foram avaliadas inicialmente e, em seguida, transferidas para sacos de polietileno (12x15), preenchidos com substrato composto por terra vegetal e areia lavada na proporção 1:1. A caracterização físico-química do substrato utilizado no experimento foi realizada no Instituto Tecnológico e de Pesquisas do Estado de Sergipe (ITPS) (Tabela 3).

Tabela 3. Caracterização físico-química do substrato utilizado para o cultivo de mudas de umbuzeiro.

Parâmetro	Unidade	Valor
Atributos químicos		
pH (H_2O)	–	5.91
P	mg dm^{-3}	6.5
K	mg dm^{-3}	13.9
Na	mg dm^{-3}	41.1
Ca	cmolc dm^{-3}	1.99
Mg	cmolc dm^{-3}	0.33
Ca + Mg	cmolc dm^{-3}	2.31
Al	cmolc dm^{-3}	<0.08
H + Al	cmolc dm^{-3}	1.43
Matéria Orgânica	g dm^{-3}	12.9
Total N	%	<0.22
Relação C/N	–	0.75
Atributos de fertilidade		
Soma de bases (SB)	cmolc dm^{-3}	4.6
Capacidade de troca catiônica (CTC)	cmolc dm^{-3}	6.03
Saturação por bases (V)	%	76.3
Percentual de sódio trocável (PST)	%	5
Distribuição granulométrica		
Areia	%	82.78
Silte	%	9.84
Argila	%	7.38

pH (H_2O) – pH em água; Na – sódio; K – potássio; P – fósforo (método Mehlich-1); Mg – magnésio; Ca – cálcio; Al – alumínio (método KCl); MO – matéria orgânica (método colorimétrico de Walkley-Black); H + Al – hidrogênio + alumínio (método SMP); SB – soma de bases trocáveis; CTC – capacidade de troca catiônica; PST – percentual de sódio trocável; V – índice de saturação por bases; C/N – relação carbono/nitrogênio (método MPOACF); N total – nitrogênio total (método MAPA); distribuição granulométrica – método do densímetro de Bouyoucos.

O substrato foi acrescido de 5 g L^{-1} de fertilizante mineral misto de liberação controlada Forth Cote®, de formulação NPK 15-09-12. De acordo com a garantia do fabricante, o fertilizante apresentava 15% de nitrogênio total (N), 9% de fósforo solúvel em citrato neutro de amônio e água, expresso como P_2O_5, 12% de potássio solúvel em água, expresso como K_2O, 1,3% de magnésio total (Mg), 6% de enxofre total (S), 0,05% de cobre total (Cu), 0,46% de ferro total (Fe) e 0,02% de molibdênio total (Mo).

As mudas foram mantidas em casa de vegetação, com irrigação realizada três vezes por semana. O crescimento inicial foi acompanhado mensalmente durante 90 dias, sendo avaliadas as seguintes variáveis: altura da parte aérea (H, cm), diâmetro do caule (D, mm), número de folhas e índice de clorofila foliar aos 90 dias.

A altura da parte aérea foi determinada com régua graduada, sendo expressa em centímetros. O diâmetro do caule foi mensurado com paquímetro digital sempre na altura do

nó cotiledonar, sendo os valores expressos em milímetros. O número de folhas foi obtido por contagem direta. O índice de clorofila foliar foi determinado no folíolo terminal de folhas completamente expandidas, estimado de forma indireta através do clorofilômetro portátil (modelo CCM-200, OPIT-SCIENCES, EUA), sendo expresso pela média de duas medidas em 1 folha.

Ao final dos 90 dias de avaliação, as mudas foram separadas em parte aérea e sistema radicular, retiradas dos recipientes e lavadas cuidadosamente para remoção do substrato aderido às raízes. Foram determinadas a massa fresca da parte aérea e a massa fresca do sistema radicular. Posteriormente, o material vegetal foi acondicionado em sacos de papel e seco em estufa de circulação forçada de ar a 70 °C até massa constante, para determinação da massa seca da parte aérea e da massa seca do sistema radicular.

Também foram avaliadas características do sistema radicular, incluindo comprimento (CX, cm), diâmetro (DX, mm) e número de xilopódios por muda. O comprimento do xilopódio foi mensurado com régua graduada, sendo expresso em centímetros, enquanto o diâmetro foi determinado com paquímetro digital e expresso em milímetros. O número de xilopódios foi obtido por contagem direta.

Os dados de crescimento e de massa foram utilizados para os cálculos das razões altura/diâmetro (H/D), massa seca da parte aérea/massa seca da raiz (MSPA/MSR) e do Índice de Qualidade de Dickson (IDQ) (Dickson; Leaf; Hosner, 1960), de acordo com a Eq. 1:

$$IDQ = \frac{MST\ (g)}{\frac{H\ (cm)}{D\ (mm)} + \frac{MSPA\ (g)}{MSR\ (g)}}$$

Onde MST é a massa seca total, H é a altura, D é o diâmetro do caule, MSPA é a massa seca da parte aérea e MSR é a massa seca da raiz.

6.2.6. Delineamento experimental e análise estatística

Para a caracterização biométrica das unidades de dispersão, os dados foram submetidos inicialmente à estatística descritiva, sendo estimados a média, valores mínimo e máximo, desvio-padrão e coeficiente de variação. Foram realizadas comparações entre procedências geográficas e entre matrizes. Na comparação entre procedências, utilizaram-se as médias das repetições de cada matriz, considerando as árvores matrizes como unidades amostrais dentro de cada procedência. Para a comparação entre matrizes, cada árvore matriz foi considerada como tratamento.

As variáveis de emergência, caracterização morfológica inicial das plântulas e crescimento inicial das mudas foram analisadas em delineamento experimental inteiramente casualizado (DIC), considerando as matrizes como tratamentos. A emergência acumulada foi apresentada por matriz dentro de cada procedência. As variáveis referentes à caracterização morfológica inicial das plântulas foram analisadas considerando as matrizes como tratamentos. Para o crescimento inicial das mudas, as variáveis mensuradas mensalmente, como altura, diâmetro do caule e número de folhas, foram utilizadas para construção das curvas de crescimento, visando demonstrar a evolução das mudas ao longo do período experimental. A análise estatística comparativa foi realizada apenas com os dados obtidos aos 90 dias após o transplantio.

As análises de componentes principais (PCA) foram realizadas no software RStudio. As médias de cada árvore matriz foram consideradas como unidades de observação, e as variáveis foram previamente centralizadas e padronizadas para média zero e desvio-padrão igual a um, devido às diferentes unidades de mensuração. A PCA biométrica foi realizada com 17 árvores matrizes, considerando comprimento, largura, espessura e massa das unidades de dispersão.

Também foi realizada uma PCA integrada, de caráter exploratório, com as nove matrizes comuns às diferentes etapas do estudo. Foram selecionadas a massa da unidade de dispersão, o índice de velocidade de emergência, o comprimento do hipocótilo aos 30 dias, o

comprimento do xilopódio aos 90 dias e o índice de qualidade de Dickson aos 90 dias, representando, respectivamente, a biometria, o vigor de emergência, o crescimento inicial, o desenvolvimento do xilopódio e a qualidade final das mudas. A interpretação foi baseada na variância explicada, nos escores das matrizes e nas cargas das variáveis.

Os pressupostos de normalidade dos resíduos e homogeneidade das variâncias foram avaliados previamente pelos testes de Shapiro-Wilk e Levene, respectivamente, utilizando o programa Jamovi (Projeto Jamovi, 2025). As análises de variância e os testes de comparação de médias foram realizados no programa Sisvar versão 5.8 (Ferreira, 2019). Para as características biométricas e de emergência, quando constatado efeito significativo pela análise de variância, as médias foram agrupadas pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade. Para o crescimento das plântulas e das mudas, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

6.3. Resultados e Discussão

Os aspectos morfológicos dos frutos, unidades de dispersão e fases iniciais de desenvolvimento do umbuzeiro estão apresentados na Figura 2. A sequência evidencia características do material propagativo, da emergência, da plântula, da muda e do xilopódio, permitindo relacionar visualmente as estruturas observadas às variáveis biométricas e de crescimento avaliadas no estudo.



Figura 2. Aspectos morfológicos de frutos, unidades de dispersão, emergência, plântula, muda e xilopódio de umbuzeiro. A: frutos; B: unidades de dispersão de diferentes matrizes; C–F: fases iniciais da emergência e desenvolvimento da plântula; G: muda com 90 dias; H: xilopódio com 90 dias. COT: cotilédone; EPI: epicótilo; HIP: hipocótilo; EOF: eófilo. Barras: B, E e H = 2 cm; G = 30 cm. Fonte: Augusto Nascimento.

6.3.1. Biometria das unidades de dispersão

As unidades de dispersão de umbuzeiro apresentaram grande variação biométrica entre as matrizes avaliadas. Considerando as 85 unidades amostrais compostas, o comprimento médio foi de 18,89 mm, variando de 15,39 a 22,05 mm, enquanto a largura e a espessura médias foram de 12,83 e 10,14 mm, respectivamente. A massa média foi de 1,025 g, com amplitude de 0,583 a 1,348 g. O diâmetro geométrico médio foi de 13,47 mm, e a esfericidade média foi de 71,66%, indicando formato predominantemente alongado/oblongo das unidades de dispersão, como evidenciado pela razão comprimento/largura média de 1,48 (Tabela 4).

Tabela 4. Estatística descritiva das características biométricas das unidades de dispersão de umbuzeiro provenientes de diferentes árvores matrizes e procedências em Sergipe.

Variável	Média±DP	Mín.–Máx. das médias	Mín.–Máx. observado	CV (%)
Comprimento (mm)	18,89±1,71	15,39–22,05	13,9–24,5	9,03
Largura (mm)	12,83±0,96	11,09–14,50	9,6–16,6	7,51
Espessura (mm)	10,14±0,87	8,69–11,84	7,7–15,5	8,53
Massa (g)	1,025±0,234	0,583–1,348	0,20–1,84	22,84
C/L	1,48±0,11	1,30–1,72	1,13–2,17	7,17
Dg (mm)	13,47±0,98	11,44–15,03	10,3–16,7	7,29
Esfericidade (%)	71,66±3,70	63,00–77,38	53,7–84,1	5,16

Os valores foram calculados com base em 85 unidades amostrais compostas, correspondentes a cinco repetições de 10 unidades de dispersão por matriz. DP = desvio-padrão; CV = coeficiente de variação; C/L = razão comprimento/largura; Dg = diâmetro geométrico médio. A coluna "Mín.–Máx. das médias" corresponde à amplitude observada entre as repetições compostas, enquanto "Mín.–Máx. observado" corresponde aos menores e maiores valores registrados individualmente nas unidades de dispersão avaliadas.

Esses valores estão próximos aos relatados para diásporos/endocarpos de umbuzeiro em diferentes regiões do semiárido brasileiro. Em população natural da Caatinga no município de Santa Cruz-RN, foram registrados diásporos com comprimento médio de 19,27 mm, diâmetro de 13,95 mm, espessura de 11,14 mm e massa fresca de 2,28 g (Sales *et al*., 2024). Em populações naturais da Paraíba, os endocarpos apresentaram comprimento entre 19,3 e 20,3 mm, largura entre 13,6 e 14,2 mm, espessura entre 10,8 e 11,0 mm e massa entre 1,12 e 1,20 g (Silva *et al*., 2025). Assim, os resultados do presente estudo encontram-se dentro da faixa descrita para a espécie, embora a massa média tenha sido inferior à observada em alguns trabalhos.

Entre as variáveis avaliadas, a massa apresentou o maior coeficiente de variação (22,84%), enquanto comprimento, largura, espessura, diâmetro geométrico médio e esfericidade apresentaram CV inferior a 10%. Esse padrão indica que as dimensões lineares foram relativamente mais estáveis que a massa. Essa maior variação da massa pode estar relacionada a diferenças no teor de água, densidade dos tecidos, grau de enchimento interno e integridade da semente no interior do endocarpo. Comportamento semelhante foi observado em estudo com população natural de umbuzeiro, no qual a massa fresca dos diásporos apresentou maior variação relativa que as medidas lineares (Sales *et al*., 2024).

Não foram observadas diferenças significativas entre as procedências geográficas para as características biométricas avaliadas. Entretanto, a análise do gráfico de dispersão das médias mostra elevada variabilidade entre as matrizes dentro de cada procedência (Figura 2). Esse resultado sugere que a variabilidade biométrica esteve mais associada ao efeito individual das árvores matrizes do que à origem geográfica. Em estudo com fenotipagem de endocarpos de umbuzeiro em Sergipe, métricas de tamanho apresentaram ampla sobreposição entre procedências, enquanto descritores de forma e cor contribuíram de forma mais consistente para a discriminação da origem dos materiais (Silva *et al*., 2026).

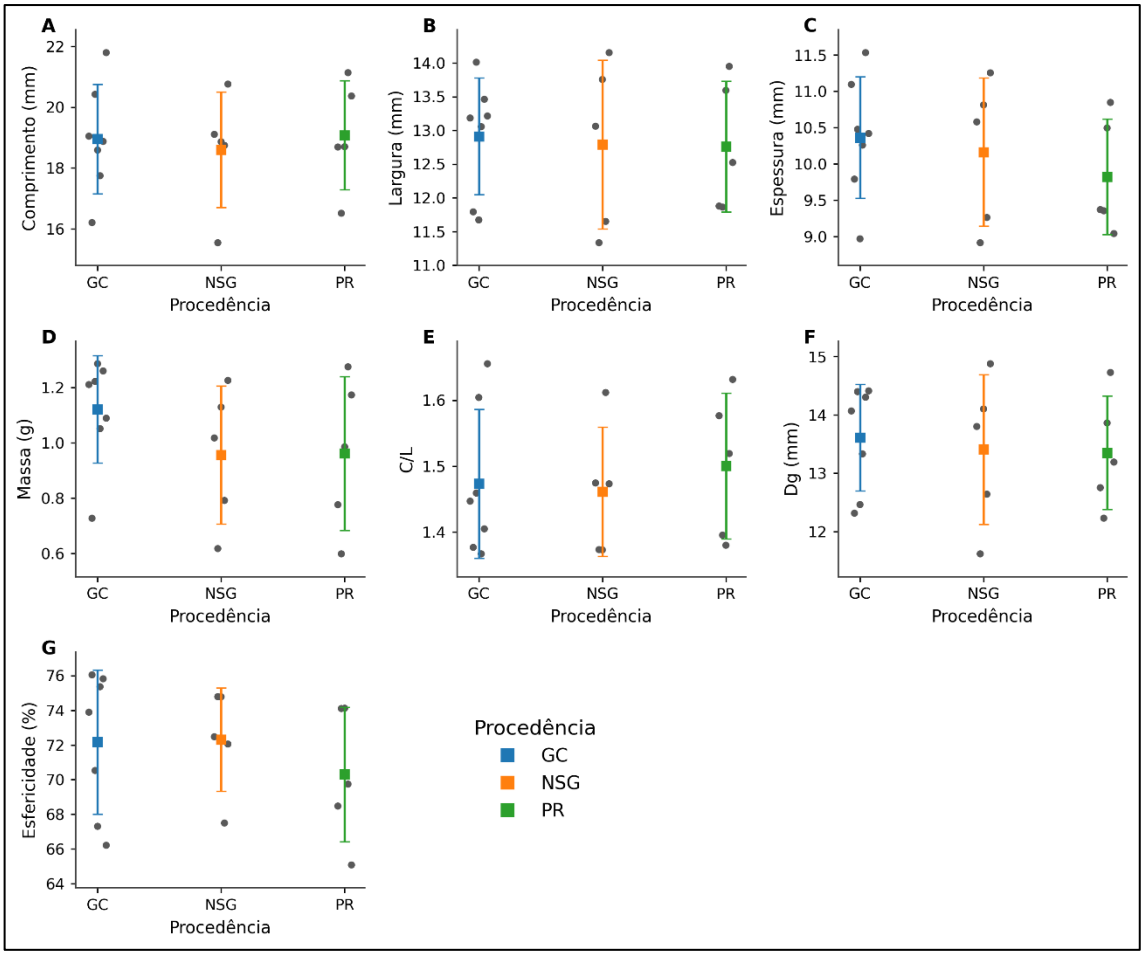


Figura 3. Dotplot das características biométricas das unidades de dispersão de umbuzeiro provenientes de três procedências geográficas em Sergipe. A: comprimento; B: largura; C: espessura; D: massa; E: razão comprimento/largura; F: diâmetro geométrico médio; G: esfericidade. Pontos representam os valores médios das matrizes dentro de cada procedência; quadrados representam a média da procedência; barras indicam o desvio-padrão.

A comparação entre matrizes mostrou diferenças significativas para todas as características biométricas avaliadas (Tabela 5). A maior média de comprimento foi observada em M7-GC (21,8 mm), enquanto a menor foi registrada em M2-NSG (15,6 mm). Para massa, os maiores valores ocorreram em M4-GC, M6-GC e M4-PR (1,29, 1,26 e 1,27 g, respectivamente) e as matrizes M2-NSG (0,62 g) e M2-PR (0,60 g) apresentaram os menores valores. Essa variação entre matrizes pode refletir diferenças genéticas, efeitos maternos e condições microambientais durante o desenvolvimento dos frutos, como disponibilidade hídrica, fertilidade do solo, idade da planta, carga de frutos e grau de manejo da paisagem. A variabilidade fenotípica em umbuzeiro tem sido apontada como uma importante estratégia de conservação, seleção de matrizes e uso sustentável da espécie (Santana *et al*., 2025; Silva *et al*., 2025).

Tabela 5. Caracterização biométrica das unidades de dispersão de umbuzeiro provenientes de diferentes árvores matrizes.

Matriz	Comp.(mm)	Larg.(mm)	Esp.(mm)	Massa(g)	C/L	Dg(mm)	Esf.(%)
M1-GC	19,1±0,4d	13,2±0,3c	11,1±0,2h	1,21±0,09b	1,45±0,03d	14,1±0,2c	73,9±0,9b
M2-GC	16,2±0,3f	11,8±0,1i	9,8±0,1e	0,73±0,03e	1,38±0,03e	12,3±0,1g	76,0±0,9a
M3-GC	20,4±0,2c	14,0±0,1a	10,5±0,5d	1,22±0,06b	1,46±0,01d	14,4±0,2b	70,5±0,8d
M4-GC	18,6±0,4d	11,7±0,3e	9,0±0,1g	1,29±0,04a	1,60±0,06a	12,5±0,1g	67,3±1,3f

M5-GC	17,8±0,3e	13,1±0,2c	10,3±0,2d	1,05±0,06d	1,37±0,04e	13,3±0,1e	75,4±1,5a
M6-GC	18,9±0,3d	13,5±0,3c	11,5±0,2a	1,26±0,05a	1,41±0,03e	14,3±0,2b	75,8±0,4a
M7-GC	21,8±0,4a	13,2±0,5c	10,4±0,4d	1,09±0,03c	1,66±0,04a	14,4±0,4b	66,2±0,9g
M1-NSG	19,1±0,7d	13,1±0,2c	10,6±0,3d	1,02±0,05d	1,47±0,05d	13,8±0,3d	72,5±1,8c
M2-NSG	15,6±0,2g	11,3±0,2h	8,9±0,1g	0,62±0,01f	1,37±0,02e	11,6±0,2h	74,8±0,6b
M3-NSG	18,9±0,2d	13,8±0,2b	10,8±0,2c	1,13±0,02c	1,37±0,02e	14,1±0,2c	74,8±0,7b
M4-NSG	18,7±0,2d	11,7±0,2e	9,3±0,2f	0,79±0,03e	1,61±0,04a	12,6±0,2f	67,5±1,0f
M5-NSG	20,8±0,5c	14,2±0,2a	11,3±0,1b	1,23±0,04b	1,47±0,04d	14,9±0,2a	72,1±1,1c
M1-PR	18,7±0,7d	11,9±0,2e	9,4±0,2f	0,78±0,04e	1,58±0,06b	12,8±0,2f	68,5±1,8e
M2-PR	16,5±0,2f	11,9±0,3e	9,4±0,2f	0,60±0,01f	1,40±0,03e	12,2±0,2g	74,1±0,7b
M3-PR	18,7±0,3d	13,6±0,3b	10,5±0,5d	0,99±0,06d	1,38±0,03e	13,9±0,3d	74,1±1,6b
M4-PR	21,1±0,2b	14,0±0,3a	10,9±0,1c	1,27±0,07a	1,52±0,04c	14,7±0,1a	69,7±1,0d
M5-PR	20,4±0,1c	12,5±0,3d	9,0±0,2g	1,17±0,06b	1,63±0,05a	13,2±0,2e	65,1±1,4g
CV (%)	1,8	2,0	2,4	4,6	2,7	1,5	1,7

Valores apresentados como média ± desvio-padrão. Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade. COMP = comprimento; LARG = largura; ESP = espessura; MASSA = massa; C/L = razão comprimento/largura; Dg = diâmetro geométrico médio; ESF = esfericidade; CV (%) = coeficiente de variação.

As variáveis de forma também contribuíram para diferenciar as matrizes. Matrizes com maiores valores de razão C/L apresentaram unidades de dispersão mais alongadas, enquanto aquelas com maior esfericidade apresentaram formato relativamente menos alongado (Tabela 5). Esse comportamento confirma a complementaridade entre os descritores biométricos, uma vez que o comprimento isolado não representa necessariamente maior volume ou maior massa. Nesse sentido, o uso conjunto de comprimento, largura, espessura, massa, diâmetro geométrico e esfericidade permite uma caracterização mais completa da variação fenotípica das unidades de dispersão (Silva *et al*., 2026).

Os resultados indicam que a variação biométrica das unidades de dispersão de umbuzeiro ocorreu principalmente entre árvores matrizes, e não entre procedências. Esse padrão reforça a importância da seleção individual de matrizes para produção de mudas, conservação de germoplasma e estudos de propagação. Além disso, como dimensões e massa dos endocarpos podem estar associadas ao desempenho fisiológico das sementes, a biometria constitui uma ferramenta prática para triagem inicial de materiais propagativos promissores, devendo ser interpretada em conjunto com os resultados de emergência, vigor e crescimento inicial das plântulas e mudas (Silva *et al*., 2025).

A análise de componentes principais sintetizou a variação conjunta das características biométricas, com os dois primeiros componentes explicando 91,65% da variância total (Figura 3). O PC1, responsável por 76,07% da variação, foi positivamente associado ao comprimento, à largura, à espessura e à massa, representando o tamanho geral das unidades de dispersão. As matrizes M5-NSG, M6-GC, M3-GC e M4-PR estiveram associadas aos maiores valores biométricos, enquanto M2-NSG, M2-PR e M2-GC se relacionaram aos menores. Não houve separação evidente entre procedências, indicando que a variação ocorreu principalmente entre árvores matrizes dentro de cada localidade, padrão semelhante ao observado em populações naturais de umbuzeiro (Silva *et al*., 2025).

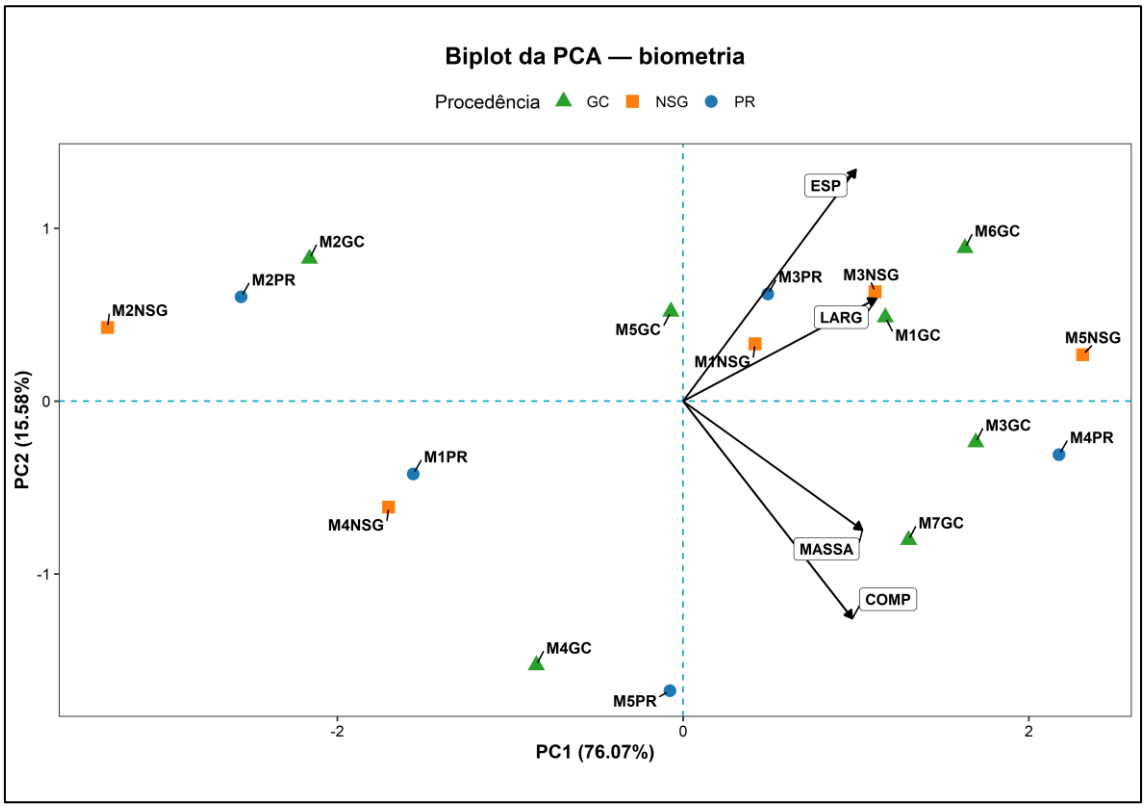


Figura 4. Biplot da análise de componentes principais das características biométricas das unidades de dispersão de umbuzeiro provenientes de 17 árvores matrizes. A análise considerou comprimento (COMP), largura (LARG), espessura (ESP) e massa (MASSA). Os componentes principais PC1 e PC2 explicaram, respectivamente, 76,07% e 15,58% da variância total. As cores e os símbolos representam as procedências: Graccho Cardoso (GC), Nossa Senhora da Glória (NSG) e Poço Redondo (PR).

6.3.2. Emergência das plântulas

A emergência acumulada variou entre matrizes e procedências geográficas, com início entre aproximadamente 10 e 15 dias após a semeadura e estabilização das curvas entre 30 e 40 dias. Em Graccho Cardoso, destacou-se a matriz M3-GC, com emergência próxima de 75%, enquanto M1-GC e M2-GC apresentaram baixas porcentagens (22 e 9,5%). Em Nossa Senhora da Glória, M3-NSG apresentou a maior média (83%), seguida por M5-NSG e M2-NSG. Em Poço Redondo, as matrizes apresentaram curvas mais próximas entre si, com emergência final intermediária a alta (Figura 4). Esse padrão evidencia variação entre matrizes quanto à porcentagem e à velocidade de emergência, reforçando a influência do material de origem no desempenho inicial das plântulas.

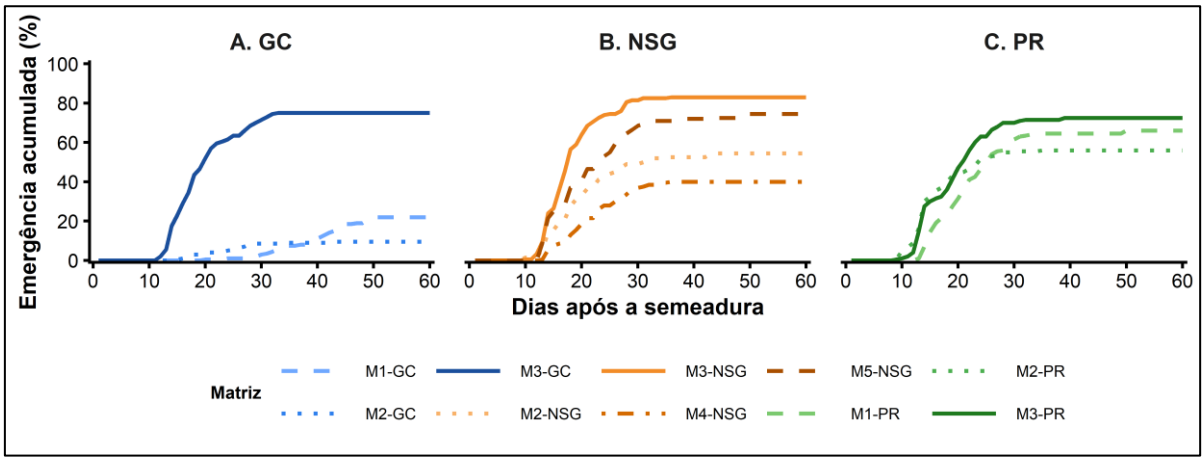


Figura 5. Emergência acumulada de plântulas de umbuzeiro provenientes de diferentes árvores matrizes e procedências. A: GC-Gracho Cardoso; B: NSG-Nossa Senhora da Glória; C: PR-Poço Redondo. As curvas representam a média acumulada de emergência ao longo de 60 dias após a semeadura.

A emergência de plântulas de umbuzeiro diferiu significativamente entre as matrizes avaliadas, evidenciando ampla variação no desempenho fisiológico das unidades de dispersão (Tabela 6). A porcentagem de emergência variou de 9,5% em M2-GC a 83,0% em M3-NSG. As matrizes M3-NSG, M3-GC, M5-NSG e M3-PR formaram o grupo de maior desempenho, com valores superiores a 72%, enquanto M2-GC e M1-GC apresentaram os menores percentuais de emergência entre 9,5 e 22%. As matrizes com maiores percentuais de emergência também apresentaram, em geral, melhor desempenho na primeira contagem (PC) e no índice de velocidade de emergência (IVE), indicando maior vigor inicial, com destaque para a matriz M3-NSG, que apresentou 81,5% de porcentagem de germinação na PC e 1,22 de IVE.

Tabela 6. Emergência e índices de emergência de plântulas de umbuzeiro provenientes de diferentes árvores matrizes.

Matriz	%E	PC	IVE	TME	VME	Sincronia	Incerteza
M1-GC	22,0±6,8e	3,0±2,8e	0,14±0,04e	38,7±2,1a	0,026±0,001d	0,003±0,01b	2,3±0,3b
M2-GC	9,5±8,5f	8,5±7,5e	0,10±0,10e	23,7±4,7b	0,043±0,008c	0,02±0,05b	1,3±1,0c
M3-GC	75,0±8,2a	71,5±9,7b	1,05±0,16b	19,2±2,1c	0,053±0,006b	0,09±0,04a	3,1±0,3a
M2-NSG	54,5±6,0c	49,0±7,0c	0,74±0,11c	20,3±1,7b	0,049±0,004c	0,07±0,03a	3,0±0,2a
M3-NSG	83,0±10,8a	81,5±11,3a	1,22±0,18a	18,1±1,2c	0,056±0,004b	0,08±0,03a	3,1±0,3a
M4-NSG	40,0±18,1d	37,0±19,7d	0,49±0,27d	22,8±3,5b	0,045±0,007c	0,07±0,04a	2,5±0,5b
M5-NSG	74,5±12,6a	68,5±13,8b	0,99±0,15b	20,8±3,0b	0,049±0,007c	0,10±0,07a	3,1±0,5a
M1-PR	66,0±8,3b	61,5±9,5c	0,82±0,13c	21,7±2,5b	0,047±0,005c	0,06±0,02a	3,2±0,2a
M2-PR	56,0±13,2c	55,0±13,0c	0,92±0,28c	16,6±1,7c	0,061±0,007a	0,11±0,03a	2,7±0,3b
M3-PR	72,5±6,6a	70,0±6,4b	1,05±0,11b	18,6±1,5c	0,054±0,005b	0,09±0,05a	3,1±0,3a
CV (%)	**19,09**	**21,78**	**22,47**	**11,50**	**11,59**	**57,63**	**16,64**

Valores apresentados como médias ± desvio-padrão seguidas pela mesma letra minúscula na coluna pertencem ao mesmo grupo pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade. %E = porcentagem de emergência; PC = primeira contagem; IVE = índice de velocidade de emergência; TME = tempo médio de emergência; VME = velocidade média de emergência.

O tempo médio de emergência (TME) variou de 16,6 a 38,7 dias. As matrizes M2-PR, M3-NSG, M3-PR e M3-GC apresentaram emergência mais rápida, enquanto M1-GC se destacou pelo maior TME, indicando atraso no processo de emergência. A velocidade média de emergência (VME) apresentou comportamento inverso, com maior valor em M2-PR (0,061) e menor em M1-GC (0,026) (Tabela 6). Esses resultados confirmam o caráter lento e desuniforme da emergência do umbuzeiro, característica já relatada para a espécie e atribuída, em grande parte, à dormência das sementes e à presença de um endocarpo rígido, lenhoso e

lignificado que envolve a semente e dificulta a entrada de água e expansão do embrião (Lopes *et al*., 2009; Nobre *et al*., 2017; Barros *et al*., 2018).

A sincronia também diferiu entre as matrizes, com M1-GC e M2-GC apresentando as menores médias. Para a incerteza, M2-GC apresentou o menor valor, enquanto as maiores médias foram observadas em M2-NSG, M3-NSG, M5-NSG, M3-PR, M3-GC e M1-PR. No entanto, a interpretação dessa variável deve ser feita com cautela, pois menores valores de incerteza em matrizes com baixa emergência podem estar associados ao pequeno número de eventos de emergência, e não necessariamente à maior uniformidade fisiológica (Tabela 6).

A variação observada entre matrizes pode estar relacionada a diferenças genéticas, ao grau de maturação dos frutos no momento da coleta, às características físicas do endocarpo e, especialmente, à qualidade interna das unidades de dispersão. Em umbuzeiro, a avaliação externa das unidades de dispersão nem sempre permite inferir sua qualidade interna, uma vez que o endocarpo rígido pode ocultar diferenças no enchimento, na formação e na viabilidade das sementes. Nesse sentido, estudos com imagens de raio X têm demonstrado a ocorrência de variações internas nos pirênios de umbuzeiro, incluindo sementes bem formadas, malformadas, translúcidas ou vazias (Rodrigues *et al*., 2024).

Dessa forma, a menor emergência observada em matrizes como M1-GC e M2-GC pode estar relacionada não apenas à resistência física imposta pelo endocarpo, mas também à maior proporção de unidades de dispersão com sementes malformadas ou fisiologicamente inviáveis. Outro fator é o grau de maturação dos frutos, estudos têm demonstrado que frutos coletados em grau de maturação avançada apresentam maiores porcentagens de emergência (Costa *et al*., 2001; Souza *et al*., 2005; Nascimento *et al*., 2026). Além disso, a variação fenotípica de frutos e unidades de dispersão tem sido apontada como indicadora da diversidade existente em populações naturais de umbuzeiro, reforçando a importância da seleção de matrizes com melhor qualidade física e fisiológica para a produção de mudas (Silva *et al*., 2025).

O teor de água das unidades de dispersão de umbuzeiro diferiu entre as matrizes avaliadas (Figura 6A), variando de 9,43% em M3-PR a 14,08% em M4-GC, com média geral de 10,67%. Esses valores estão dentro da faixa relatada para pirênios de umbuzeiro após períodos de armazenamento, geralmente em torno de 10% a 13%, embora a espécie possa apresentar valores bem mais elevados em unidades de dispersão recém-colhidas, próximos de 40%, ou valores mais baixos após armazenamento prolongado ou sob temperaturas elevadas (Araújo *et al*., 2001; Lopes *et al*., 2009; Barros *et al*., 2018).

A variação no teor de água entre matrizes pode refletir diferenças no grau de maturação dos frutos no momento da coleta, nas características físicas das unidades de dispersão e no equilíbrio higroscópico estabelecido durante o armazenamento (Hay *et al*., 2023). Em sementes, o teor de água é uma variável importante para a padronização de testes fisiológicos, pois interfere na atividade metabólica, na conservação e na resposta germinativa (El-Maarouf-Bouteau, 2022; Upretee; Bandara; Tanino, 2024). No umbuzeiro, entretanto, essa relação é complexa, uma vez que a redução gradual da umidade durante o armazenamento tem sido associada à superação parcial da dormência dos pirênios, enquanto a elevação do teor de água durante a pré-embebição nem sempre favorece a germinação ou o vigor das plântulas (Barros *et al*., 2018; Lopes *et al*., 2009; Nobre *et al*., 2017).

A comparação entre o teor de água e a emergência de plântulas indica que a umidade inicial das unidades de dispersão não explicou, isoladamente, o desempenho das matrizes (Figura 6B). Matrizes com teores de água próximos apresentaram respostas contrastantes, como M2-GC e M3-GC, ambas próximas de 10%, mas com baixa e alta emergência, respectivamente. As unidades de dispersão da matriz M3-PR apresentaram um dos menores teores de água e estiveram entre as matrizes de maior emergência. Assim, os resultados sugerem que a emergência de umbuzeiro depende da interação entre o teor de água, a dormência imposta pelo endocarpo rígido, o grau de maturação dos frutos e a qualidade interna das sementes.

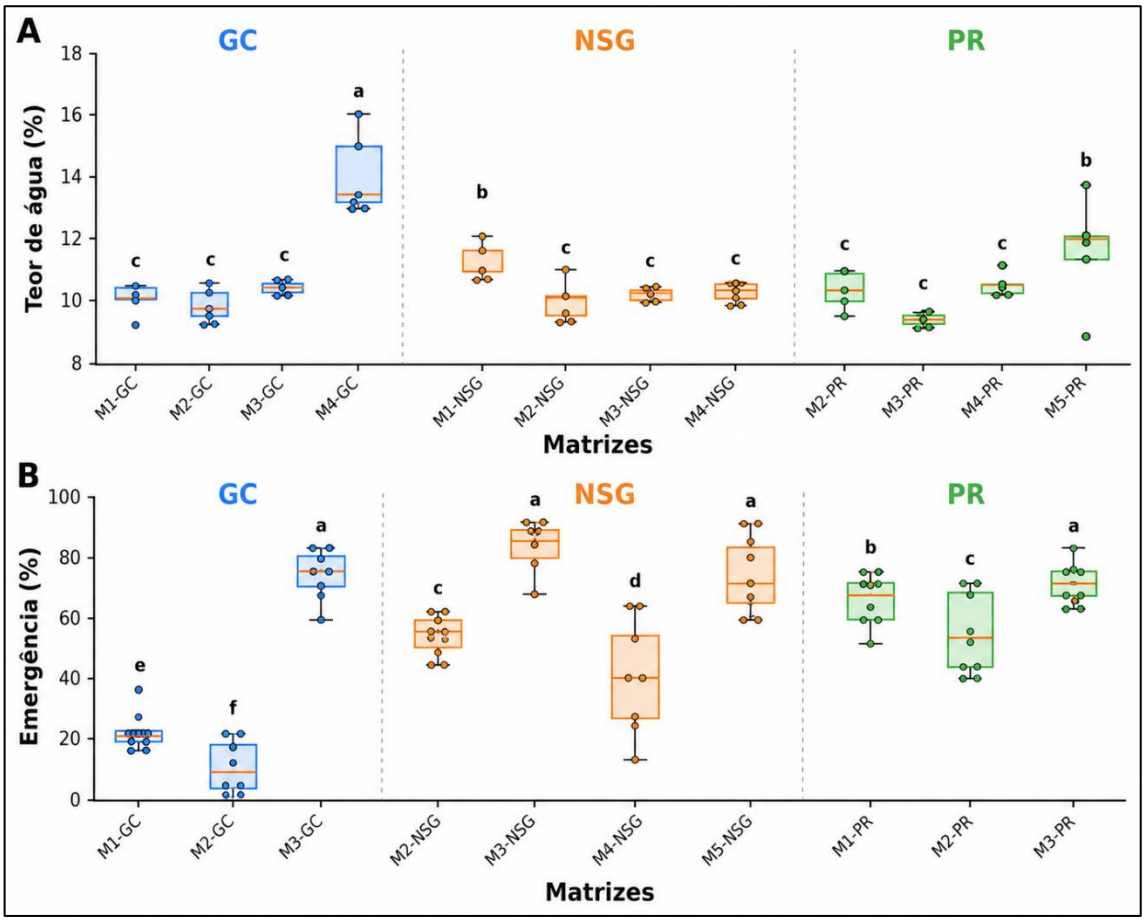


Figura 6. Teor de água das unidades de dispersão (A) e emergência de plântulas (B) de umbuzeiro em função de diferentes matrizes e procedências geográficas. As caixas representam o intervalo interquartílico, a linha central indica a mediana, as barras representam os valores mínimo e máximo, e os pontos indicam as repetições. Letras minúsculas distintas indicam diferenças entre matrizes pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade. GC = Graccho Cardoso; NSG = Nossa Senhora da Glória; PR = Poço Redondo.

6.3.3. Crescimento inicial das plântulas

Aos 30 dias após a semeadura, o crescimento inicial das plântulas de umbuzeiro apresentou diferenças significativas entre matrizes apenas para altura, comprimento do hipocótilo e massa seca da planta (Tabela 7). A maior altura foi observada em M3-NSG (12,8 cm), embora sem diferir de M3-PR, M5-NSG e M3-GC, enquanto as menores médias foram observadas nas plântulas das matrizes M2-GC, M2-NSG e M4-NSG. Esse padrão pode estar parcialmente associado ao desempenho observado na emergência, uma vez que matrizes com maior emergência e velocidade de emergência, como M3-NSG, M3-GC e M3-PR, apresentaram plântulas mais desenvolvidas aos 30 dias.

Essa interpretação é coerente com o conceito de vigor de sementes, no qual a velocidade de germinação/emergência e o crescimento inicial das plântulas são componentes importantes do desempenho fisiológico (Finch-Savage; Bassel, 2016). Além disso, diferenças no tamanho das plântulas em avaliações realizadas em tempo fixo podem estar relacionadas ao maior tempo de crescimento das plântulas originadas de sementes que germinaram mais cedo (Reed; Bradford; Khanday, 2022). No entanto, essa relação não foi direta para todas as matrizes. M5-NSG, por exemplo, apresentou elevada emergência e altura, mas menor massa seca, enquanto variáveis como diâmetro, número de folhas, epicótilo e características do xilopódio, não diferiram significativamente entre as matrizes. Logo, além da emergência, o crescimento inicial das plântulas pode ter sido influenciado também por fatores como as características intrínsecas das matrizes e a qualidade fisiológica das unidades de dispersão.

Tabela 7. Crescimento inicial de plântulas de umbuzeiro oriundas de diferentes matrizes, aos 30 dias após a semeadura.

Matriz	H(cm)	D(mm)	NF	Epi(cm)	Hip(cm)	DX(mm)	CX(mm)	MS(g)
M2-GC	9,9±0,2bc	2,5±0,1a	4,0±0,0a	3,8±0,2a	3,1±0,1ab	7,3±0,7a	20,0±2,3a	—
M3-GC	12,3±0,5ab	2,6±0,1a	4,5±0,2a	4,5±0,3a	3,7±0,3ab	7,0±0,8a	23,4±2,9a	0,30±0,03ab
M1-PR	11,4±0,4abc	2,4±0,1a	4,3±0,2a	4,1±0,2a	3,8±0,1ab	6,1±0,6a	24,9±2,4a	0,27±0,03ab
M2-PR	11,5±0,5abc	2,6±0,1a	4,5±0,3a	4,0±0,2a	4,1±0,2a	7,8±0,5a	28,1±2,0a	0,28±0,02ab
M3-PR	12,1±0,6ab	2,6±0,1a	4,2±0,1a	4,5±0,2a	4,1±0,1a	7,8±0,8a	25,1±2,8a	0,27±0,03ab
M2-NSG	10,1±0,4bc	2,5±0,1a	3,8±0,1a	3,8±0,2a	3,5±0,3ab	6,5±0,9a	21,4±3,6a	0,23±0,04ab
M3-NSG	12,8±0,7a	2,7±0,1a	4,1±0,2a	4,4±0,2a	3,7±0,2ab	7,0±0,5a	22,1±2,9a	0,33±0,02a
M4-NSG	9,2±0,3c	2,8±0,1a	4,0±0,2a	3,8±0,1a	3,2±0,1b	7,3±0,4a	25,1±1,2a	0,23±0,02ab
M5-NSG	12,2±0,4ab	2,3±0,1a	4,3±0,2a	4,5±0,2a	4,0±0,2a	5,0±0,5a	21,8±3,0a	0,19±0,03b
CV (%)	16,3	17,9	16,9	19,1	18,7	32,0	37,6	33,7

Valores representam média ± erro-padrão. Letras iguais na coluna não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. H = altura; D = diâmetro; NF = número de folhas; Epi = epicótilo; Hip = hipocótilo; DX = diâmetro do xilopódio; CX = comprimento do xilopódio; MS = massa seca da planta; CV = coeficiente de variação. O traço indica ausência de dado.

6.3.4. Crescimento inicial das mudas

Ao longo do período de avaliação, as mudas de umbuzeiro apresentaram incremento contínuo em altura, diâmetro do caule e número de folhas, independentemente da procedência geográfica e da matriz de origem (Figura 5). Esse padrão indica que, após o estabelecimento inicial, as mudas mantiveram crescimento vegetativo progressivo entre 30 e 90 dias após o transplantio. No entanto, observou-se variação desse crescimento entre as matrizes.

Em Graccho Cardoso, M3-GC apresentou maiores valores de altura e diâmetro durante todo o período avaliado, enquanto M2-GC apresentou crescimento mais acentuado em número de folhas, superando M3-GC aos 90 dias. Entre as matrizes de Nossa Senhora da Glória, as curvas foram mais próximas, principalmente para diâmetro, indicando maior uniformidade de crescimento entre as matrizes dessa procedência. Já em Poço Redondo, M1-PR e M3-PR apresentaram crescimento superior ao de M2-PR, especialmente para altura e número de folhas. Essas diferenças sugerem que o crescimento inicial das mudas pode ser influenciado pelo material de origem, reforçando a importância da seleção de matrizes para a produção de mudas de umbuzeiro. Além disso, parte desse desempenho pode estar associada ao vigor inicial observado nas fases anteriores, uma vez que matrizes com emergência mais rápida e maior desenvolvimento inicial tendem a originar plântulas com maior tempo efetivo de crescimento e melhor estabelecimento.

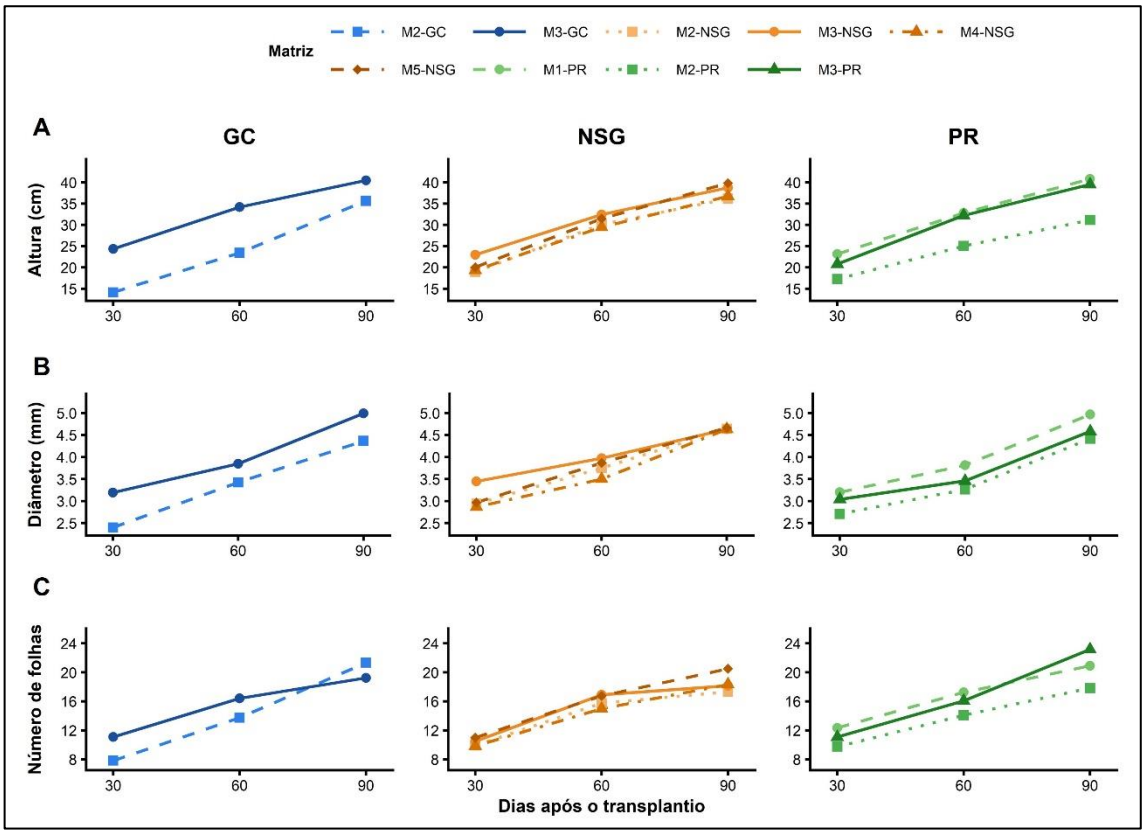


Figura 7. Crescimento em altura (A), diâmetro do caule (B) e número de folhas (C) de mudas de umbuzeiro oriundas de diferentes matrizes e procedências geográficas, avaliadas aos 30, 60 e 90 dias após o transplantio. GC = Graccho Cardoso; NSG = Nossa Senhora da Glória; PR = Poço Redondo.

Aos 90 dias após o transplantio, as matrizes não diferiram significativamente para a maioria das variáveis de crescimento e biomassa, indicando desempenho relativamente semelhante após o estabelecimento das mudas. De modo geral, as mudas apresentaram altura média entre 31,2 e 40,8 cm, diâmetro do caule entre 4,4 e 5,0 mm e número de folhas entre 17,3 e 23,2. A massa seca total variou de 3,83 a 5,46 g, enquanto o comprimento do xilopódio variou de 10,1 a 13,0 cm (Tabela 8).

Diferenças significativas foram observadas apenas para o índice de clorofila, a massa fresca e seca das raízes, o comprimento do xilopódio e o índice de qualidade de Dickson. As mudas da matriz M5-NSG apresentaram maior massa fresca e seca do sistema radicular. Já as mudas da matriz M4-NSG apresentaram maior comprimento do xilopódio comparado ao da matriz M2-PR, e os maiores valores de IQD foram registrados em M3-GC e M1-PR, diferindo significativamente apenas da matriz M2-GC (Tabela 7).

A variação nessas características pode estar relacionada a diferenças genéticas entre as progênies e a efeitos ambientais maternos, capazes de influenciar a quantidade de reservas das sementes e a estratégia de alocação de biomassa das mudas. Estudos com espécies arbóreas demonstram que a origem da árvore matriz pode afetar o crescimento inicial e a distribuição de biomassa entre raízes e parte aérea, mesmo quando as progênies são cultivadas sob condições semelhantes (González-Rodríguez; Villar; Navarro-Cerrillo, 2011; Zas; Cendán; Sampedro, 2013; Lovatel *et al*., 2021; Sousa-Santos *et al*., 2024). Entretanto, esses efeitos podem ser mais evidentes nas fases iniciais e diminuir à medida que as mudas se tornam mais dependentes da fotossíntese e respondem às condições do ambiente de cultivo (Schmeddes *et al*., 2024). Isso pode explicar a ausência de diferenças para a maioria das variáveis aos 90 dias.

O maior índice de clorofila de M2-GC não foi acompanhado por maior crescimento ou qualidade global, uma vez que essa matriz apresentou menores valores de biomassa radicular e IQD. Esse resultado evidencia que características isoladas não devem ser utilizadas como único

critério de seleção (Grossnickle, 2012). Assim, a avaliação conjunta do crescimento, do desenvolvimento radicular e de índices morfológicos, como o IQD, permite identificar matrizes com mudas mais robustas e equilibradas para a produção em viveiro (Grossnickle, 2012; Grossnickle; MacDonald, 2018, 2026).

Tabela 8. Crescimento e qualidade de mudas de umbuzeiro oriundas de diferentes matrizes, aos 90 dias após o transplantio.

Var.	M2-GC	M3-GC	M2-NSG	M3-NSG	M4-NSG	M5-NSG	M1-PR	M2-PR	M3-PR	CV(%)
H(cm)	35,7±2,5a	40,5±2,9a	36,2±1,7a	38,8±2,6a	36,8±2,9a	39,8±2,7a	40,8±3,1a	31,2±2,0a	39,5±2,4a	23,7
D(mm)	4,4±0,2a	5,0±0,2a	4,6±0,3a	4,6±0,1a	4,6±0,2a	4,7±0,2a	5,0±0,2a	4,4±0,2a	4,6±0,2a	15,9
NF	21,3±2,0a	19,2±1,0a	17,3±1,1a	18,2±1,7a	18,3±1,2a	20,5±1,5a	20,9±1,7a	17,8±1,6a	23,2±2,1a	27,9
Clo	22,1±2,3a	14,4±1,2b	18,3±1,9ab	15,2±1,3ab	13,7±1,4b	14,2±1,6b	13,6±1,7b	17,9±1,9ab	18,0±1,6ab	35,4
MFPA(g)	9,4±1,0a	11,2±1,2a	9,6±1,1a	9,7±1,0a	10,3±1,1a	10,9±1,2a	11,3±1,2a	8,6±0,9a	10,9±1,0a	37,0
MFR(g)	18,8±1,7b	27,7±2,7ab	22,1±2,7ab	20,6±2,1ab	25,6±2,8ab	30,3±3,8a	25,7±2,8ab	21,3±1,7ab	24,1±2,2ab	37,1
MFT(g)	28,2±2,6a	38,9±3,8a	31,7±3,3a	30,3±2,9a	35,8±3,6a	41,3±4,5a	37,0±3,6a	30,0±2,6a	35,0±2,8a	34,0
NX	1,5±0.19a	2.4±0.37a	1.5±0.19a	2.0±0.32a	2.0±0.21a	2.0±0.37a	1.6±0.18a	1.4±0.14a	2.5±0.39a	51.7
DX(mm)	19,3±0,8a	20,0±1,2a	20,1±1,4a	19,3±1,1a	20,4±1,0a	19,8±1,6a	19,1±1,2a	17,7±0,9a	18,6±1,1a	20,7
CX(cm)	11,8±0,6ab	12,9±0,8ab	12,6±0,9ab	10,9±0,4ab	13,0±0,7a	12,0±0,4ab	12,2±0,4ab	10,1±0,4b	10,8±0,7ab	18,5
MSPA(g)	1,96±0,19a	2,61±0,25a	1,93±0,20a	2,02±0,19a	2,21±0,22a	2,44±0,29a	2,57±0,28a	1,75±0,16a	2,45±0,22a	35,4
MSR(g)	1,87±0,15b	2,86±0,26a	2,26±0,22ab	2,20±0,19ab	2,53±0,24ab	2,98±0,29a	2,81±0,23ab	2,32±0,18ab	2,48±0,15ab	30,5
MST(g)	3,83±0,34a	5,46±0,50a	4,20±0,38a	4,23±0,36a	4,74±0,43a	5,43±0,53a	5,38±0,48a	4,07±0,33a	4,92±0,35a	30,9
PA/R	1,02±0,05a	0,90±0,03a	0,87±0,08a	0,93±0,08a	0,88±0,06a	0,83±0,08a	0,90±0,08a	0,75±0,03a	0,97±0,06a	25,2
H/D	8,1±0,4a	8,1±0,5a	7,9±0,3a	8,3±0,4a	7,8±0,3a	8,5±0,3a	8,1±0,4a	7,0±0,3a	8,6±0,3a	16,2
IQD	0,41±0,03b	0,60±0,04a	0,49±0,05ab	0,45±0,02ab	0,53±0,04ab	0,57±0,05ab	0,59±0,04a	0,52±0,04ab	0,51±0,03ab	26,0

Valores representam média±erro padrão. Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. H: altura; D: diâmetro do caule; NF: número de folhas; Clo: índice de clorofila; MFPA: massa fresca da parte aérea; MFR: massa fresca da raiz; MFT: massa fresca total; NX: número de xilopódios; DX: diâmetro do xilopódio; CX: comprimento do xilopódio; MSPA: massa seca da parte aérea; MSR: massa seca da raiz; MST: massa seca total; H/D: relação altura/diâmetro; IQD: índice de Qualidade de Dickson.

A PCA integrada sintetizou a variação entre as nove árvores matrizes ao longo das diferentes etapas avaliadas. Os dois primeiros componentes explicaram 81,43% da variância total, sendo 51,71% atribuídos ao PC1 e 29,72% ao PC2 (Figura 7). O PC1 foi associado principalmente ao índice de velocidade de emergência e ao comprimento do hipocótilo, além de apresentar associações positivas com a massa da unidade de dispersão e o índice de qualidade de Dickson. Nesse componente, M5-NSG, M3-PR, M3-GC e M3-NSG apresentaram maior associação com a velocidade de emergência e o crescimento inicial, enquanto M2-GC apresentou o maior contraste.

O PC2 foi associado principalmente ao comprimento do xilopódio e ao índice de qualidade de Dickson, com contribuição secundária da massa da unidade de dispersão. A matriz M3-GC apresentou associação conjunta com essas características, enquanto M4-NSG esteve mais relacionada ao comprimento do xilopódio. Não houve agrupamento evidente por procedência, indicando maior variação entre árvores matrizes. Devido ao número reduzido de matrizes, a análise integrada deve ser interpretada de forma exploratória.

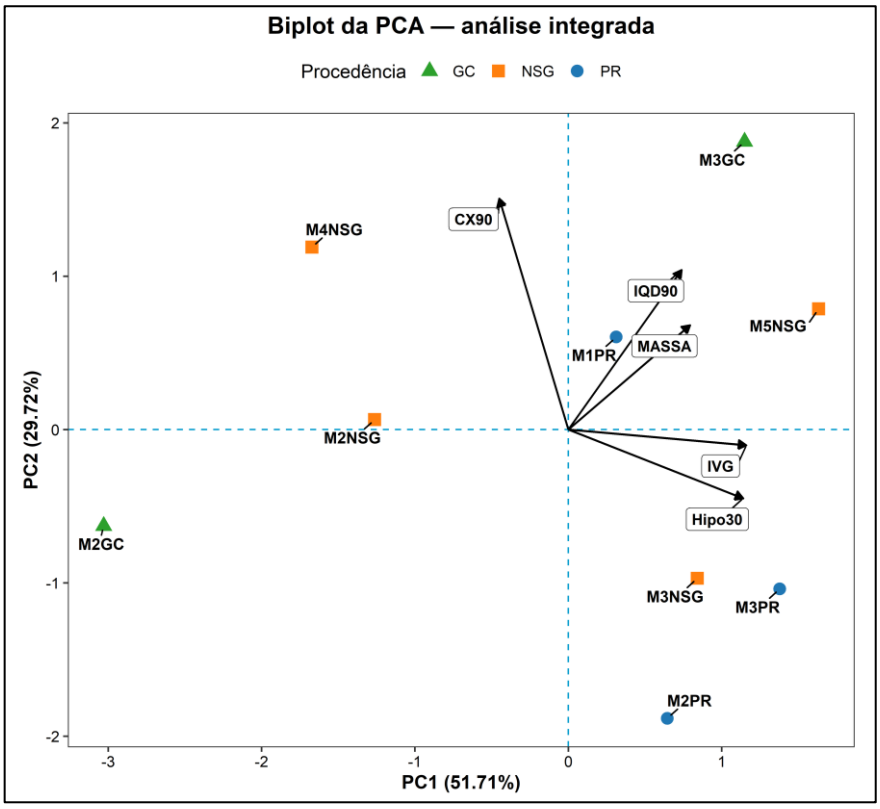


Figura 8. Biplot da análise de componentes principais integrada das características biométricas, de emergência e de crescimento de nove árvores matrizes de umbuzeiro. A análise considerou a massa da unidade de dispersão (MASSA), o índice de velocidade de emergência (IVG), o comprimento do hipocótilo aos 30 dias (Hipo30), o comprimento do xilopódio aos 90 dias (CX90) e o índice de qualidade de Dickson aos 90 dias (IQD90). Os componentes PC1 e PC2 explicaram, respectivamente, 51,71% e 29,72% da variância total. As cores e os símbolos representam as procedências: Graccho Cardoso (GC), Nossa Senhora da Glória (NSG) e Poço Redondo (PR).

6.4. Conclusão

As árvores matrizes de umbuzeiro apresentaram variação nas características biométricas das unidades de dispersão, na emergência e no crescimento inicial das plântulas e mudas. A ausência de agrupamento consistente entre as procedências indicou que a variabilidade ocorreu principalmente entre matrizes dentro de cada localidade.

O desempenho das matrizes variou conforme a etapa e a característica avaliada, demonstrando que unidades de dispersão com maiores dimensões ou massa não necessariamente resultaram em maior emergência ou melhor crescimento das mudas. Algumas matrizes, especialmente M3-GC e M5-NSG, apresentaram desempenho mais equilibrado entre as diferentes fases, enquanto outras se destacaram em características específicas.

Os resultados evidenciam a importância da avaliação conjunta de atributos biométricos, fisiológicos e de crescimento para a seleção de árvores matrizes destinadas à produção de mudas. A variabilidade observada representa um recurso relevante para programas de conservação, domesticação e melhoramento do umbuzeiro.

Agradecimentos

Este estudo foi financiado em parte pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código Financeiro 001. Os autores agradecem ao técnico João dos Santos (Universidade Federal de Sergipe) pelo auxílio na condução dos experimentos, bem como ao James Cardoso (Monumento Natural Grota do Angico), Etelvan do Nascimento, Vitor

Emanuel de Souza Nascimento, Maria Iracema e Luciano Souza pelo apoio na coleta dos frutos e as alunas Graziela Andrade e Mara Lúcia pelo auxílio no desmonte do experimento e na tabulação dos dados.

6.5. Referências Bibliográficas

ARAÚJO, F. P. de; SANTOS, C. A. F.; CAVALCANTE, N. de B.; REZENDE, G. M. de. Influência do período de armazenamento das sementes de umbuzeiro na sua germinação e no desenvolvimento da plântula. **Revista Brasileira de Armazenamento**, v. 26, p. 36–39, 2001.

BARROS, R. T.; MARTINS, C. C.; PEREIRA, F. E. C. B.; SILVA, G. Z. da. Conditioning in the promotion and uniformization of Umbu seed germination. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 40, n. 1, 8 mar. 2018.

BENAMIROUCHE, S.; CHOUIAL, M.; GUECHI, W. Variation in seed biometry and early seedling growth from northeastern Algerian *Quercus suber* L. provenances. **Annals of Silvicultural Research**, v. 50, n. 1, p. 22-31, 2025.

BEZODIS, W.; PENFIELD, S. Maternal environmental control of progeny seed physiology: a review of concepts, evidence and mechanism. **Seed Science Research**, v. 34, p. 48-55, 1 jun. 2024.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. Secretaria de Defesa Agropecuária. Departamento de Serviços Técnicos. Coordenação-Geral de Laboratórios Agropecuários. **Regras para análise de sementes – RAS**. Brasília, DF: MAPA, 2025. Disponível em: https://wikisda.agricultura.gov.br/?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 4 jul. 2026.

CARVALHO, D. U. de; BOAKYE, D. A.; GAST, T.; LEITE JUNIOR, R. P.; ALFEREZ, F. Determining seed viability during fruit maturation to improve seed production and availability of new citrus rootstocks. **Frontiers in Plant Science**, v. 12, 19 nov. 2021.

COSTA, N. P. da; BRUNO, R. D. L. A.; SOUZA, F. X. de; LIMA, E. D. P. de A. Efeito do estádio de maturação do fruto e do tempo de pré-embebição de endocarpos na germinação de sementes de umbuzeiro (*Spondias tuberosa* Arr. Câm.). **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 23, n. 3, p. 738–741, dez. 2001.

CRUZ, F. R. da S.; ANDRADE, L. A. de; FEITOSA, R. C. Produção de mudas de umbuzeiro (*Spondias tuberosa* Arruda Câmara) em diferentes substratos e tamanho de recipientes. **Ciência Florestal**, v. 26, n. 1, p. 69–80, 1 jan. 2016.

DICKSON, A.; LEAF, A. L.; HOSNER, J. F. Quality appraisal of white spruce and white pine seedling stock in nurseries. **The Forestry Chronicle**, v. 36, n. 1, p. 10–13, 1 mar. 1960.

EL-MAAROUF-BOUTEAU, H. The seed and the metabolism regulation. **Biology**, v. 11, n. 2, art. 168, 2022.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer analysis system to fixed effects split plot type designs. **Revista Brasileira de Biometria**, v. 37, n. 4, p. 529–535, 20 dez. 2019.

FINCH-SAVAGE, W. E.; BASSEL, G. W. Seed vigour and crop establishment: extending performance beyond adaptation. **Journal of Experimental Botany**, v. 67, n. 3, p. 567–591, fev. 2016.

FRANCA ROCHA, W. J. S. *et al.* Towards Uncovering Three Decades of LULC in the Brazilian Drylands: Caatinga Biome Dynamics (1985–2019). **Land**, v. 13, n. 8, p. 1250, 9 ago. 2024.

GAMA, D. C.; DEUS, D. A. de; OLIVEIRA, F. F. de; CASTRO, M. S. de; SOUZA, M. O. de; NASCIMENTO, J. S. do. Umbu tree (*Spondias tuberosa* Arr. Cam. – Anacardiaceae): from extractive to planted culture in Brazil. **Scientia Agraria**, v. 20, n. 2, 2024.

GERBER, D.; BRUN, E. J.; TOPANOTTI, L. R.; FERREIRA, J. de J.; PORRUA, D. A.; GORENSTEIN, M. R.; JÚNIOR, A. W. Genetic variability of *Araucaria angustifolia* bertol. Initial growth: Subsidy to the formation of seed orchards. **Ciência Florestal**, v. 31, n. 1, p. 310–322, 2021.

GONZÁLEZ-RODRÍGUEZ, V.; VILLAR, R.; NAVARRO-CERRILLO, R. M. Maternal influences on seed mass effect and initial seedling growth in four Quercus species. **Acta Oecologica**, v. 37, n. 1, p. 1–9, jan. 2011.

GROSSNICKLE, S. C. Why seedlings survive: influence of plant attributes. **New Forests**, v. 43, n. 5–6, p. 711–738, 2012.

GROSSNICKLE, S. C.; MACDONALD, J. E. Why seedlings grow: influence of plant attributes. **New Forests**, v. 49, n. 1, p. 1–34, 2018.

GROSSNICKLE, S. C.; MACDONALD, J. E. Seedling field performance on hot, dry forest restoration sites: influence of plant attributes. **New Forests**, v. 57, n. 2, 1 mar. 2026.

HAY, F. R.; REZAEI, S.; WOLKIS, D.; MCGILL, C. Determination and Control of Seed Moisture. **Seed Science and Technology**, v. 51, n. 2, p. 267–285, 1 ago. 2023.

LINS NETO, E. M. F.; ALMEIDA, A. L. S.; PERONI, N.; CASTRO, C. C.; ALBUQUERQUE, U. P. Phenology of *Spondias tuberosa* Arruda (Anacardiaceae) under different landscape management regimes and a proposal for a rapid phenological diagnosis using local knowledge. **Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine**, v. 9, n. 1, 31 jan. 2013.

LOPES, P. S. N.; MAGALHÃES, H. M.; GOMES, J. G.; BRANDÃO JÚNIOR, D. da S.; ARAÚJO, V. D. de. Superação da dormência de sementes de umbuzeiro (*Spondias tuberosa*, Arr. Câm.) utilizando diferentes métodos. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 31, n. 3, p. 872–880, set. 2009.

LOVATEL, Q. C.; NAVROSKI, M. C.; GERBER, T. R.; OLIVEIRA, L. M. de; PEREIRA, M. D. O.; SILVEIRA, M. F. GENETIC VARIABILITY IN JUVENILE CHARACTERS OF PROGENIES OF *Apuleia leiocarpa*. **Floresta**, v. 51, n. 3, p. 547, 22 jun. 2021.

MAGUIRE, J. D. Speed of Germination—Aid In Selection And Evaluation for Seedling Emergence And Vigor. **Crop Science**, v. 2, n. 2, p. 176–177, mar. 1962.

MERTENS, J.; ALMEIDA-CORTEZ, J. S. de; GERMER, J.; SAUERBORN, J. Umbuzeiro (*Spondias tuberosa*): a systematic review. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, n. 36, p. 179–197, 30 jun. 2015.

MERTENS, J.; GERMER, J.; SIQUEIRA FILHO, J. A.; SAUERBORN, J. *Spondias tuberosa* Arruda (Anacardiaceae), a threatened tree of the Brazilian Caatinga? **Brazilian Journal of Biology**, v. 77, n. 3, p. 542–552, 2017.

MITCHELL, J. D.; DALY, D. C. A revision of *Spondias* L. (Anacardiaceae) in the neotropics. **PhytoKeys**, v. 55, n. 1, p. 1–92, 2015.

MOHSENIN, N. N. **Physical properties of plant and animal materials: structure, physical characteristics and mechanical properties**. 2 ed. New York: Gordon and Breach, 1986.

NASCIMENTO, A. V. de S.; SANTOS, P. A. A.; MUNIZ, A. V. C. da S.; LÉDO, A. da S. The propagation of umbuzeiro (*Spondias tuberosa* Arruda), a native fruit tree of growing importance for the Brazilian semi-arid region. **Forests, Trees and Livelihoods**, p. 1–25, 16 fev. 2026.

NASCIMENTO, W. F. do; COSTA, F. M.; ALVES-PEREIRA, A.; BATISTA, C. E. de A.; CARVALHO, I. A. S. de; GARCIA, C. B.; SILVA, A. V. da; SILVA, E. F. da; DIAS, M. M. de S. G.; PEREIRA, F. R. A.; ZUCCHI, M. I.; VEASEY, E. A. SNP-based analysis reveals high genetic structure and diversity in umbu tree (*Spondias tuberosa* Arruda), a native and endemic species of the Caatinga biome. **Genetic Resources and Crop Evolution**, v. 72, p. 965–980, 2025.

NOBRE, D. A. C.; SILVA, I. C.; MAIA, V. M.; DAVID, A. M. S. de S.; ALEXANDRE, R. S. Qualidade física, fisiológica e superação de dormência de sementes de umbuzeiro (*Spondias tuberosa* Arr. Câmara). **Pesquisa Agropecuária Pernambucana**, v. 22, 2017.

PEDRINI, S.; GIBSON-ROY, P.; TRIVEDI, C.; GÁLVEZ-RAMÍREZ, C.; HARDWICK, K.; SHAW, N.; FRISCHIE, S.; LAVERACK, G.; DIXON, K. Collection and production of native seeds for ecological restoration. **Restoration Ecology**, v. 28, n. S3, p. S228–S238, 1 ago. 2020.

PEREIRA, F. R. A.; PEREIRA, W. E.; PESSOA, A. M. D. S.; VASCONCELOS, E. S. A. G. de. Biometry in umbu fruits from the semi-arid region of Paraiba. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 43, n. 6, 2021.

REED, R. C.; BRADFORD, K. J.; KHANDAY, I. Seed germination and vigor: ensuring crop sustainability in a changing climate. **Heredity**, v. 128, p. 450-459, 1 jun. 2022.

RODRIGUES, A. M. B.; TORRES, M. F. O.; NUNES, V. V.; SOUZA, J. L.; SANTANA, N. A.; SILVA-MANN, R. Unveiling the structure of *Spondias tuberosa* dispersal units through X-ray imaging. **Genetic Resources and Crop Evolution**, v. 71, n. 2, p. 947–956, 1 fev. 2024.

SALES, R. P. de; NEVES, A. G. da S.; PINHEIRO, L. G.; FAJARDO, C. G.; AZEVEDO, T. K. B. de; VIEIRA, F. de A. Fruit exploitation and climate suitability for *Spondias tuberosa*: implications for management and conservation. **Cerne**, v. 31, n. 1, 2025.

SALES, R. P. de; SILVA, L. C. da; NEVES, A. G. da S.; FAJARDO, C. G.; PINHEIRO, L. G.; VIEIRA, F. de A. Addressing Conservation Needs: Genetic Diversity and Population Ecology of the Endemic Tree *Spondias tuberosa* Arruda. **Scientifica**, v. 2024, n. 1, jan. 2024.

SANTANA, N. A.; NUNES, V. V.; SILVA, M. S. O. da; SILVA-MANN, R. Phenotypic selection for improvement of *Spondias tuberosa* trees in on-farm biodiversity conservation. **Genetic Resources and Crop Evolution**, v. 72, n. 3, p. 3603–3620, 1 mar. 2025.

SANTOS, V. N. dos; SANTOS, C. A. F.; OLIVEIRA, V. R. de; COSTA, A. E. S. da; SILVA, F. F. S. da. Diversity and genetic structure of *Spondias tuberosa* (Anacardiaceae) accessions

based on microsatellite loci. **Revista de Biología Tropical**, v. 69, n. 2, p. 640–648, 11 maio 2021.

SCHMEDDES, J.; MUFFLER, L.; BARBETA, A.; BEIL, I.; BOLTE, A.; HOLM, S.; KARITTER, P.; KLISZ, M.; LÖF, M.; NICOLAS, M.; PEÑUELAS, J.; VITASSE, Y.; WEIGEL, R.; KREYLING, J. High phenotypic variation found within the offspring of each mother tree in *Fagus sylvatica* regardless of the environment or source population. **Global Ecology and Biogeography**, v. 33, p. 470–481, 2024.

SILVA, E. C.; NOGUEIRA, R. J. M. C.; VALE, F. H. A.; MELO, N. F. de; ARAÚJO, F. P. de. Water relations and organic solutes production in four umbu tree (*Spondias tuberosa*) genotypes under intermittent drought. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 21, n. 1, p. 43–53, 2009.

SILVA, J. H. C. S.; SILVA, J. N. da; RODRIGUES, C. M.; SILVA, E. L. F. da; ALMEIDA, L. G. A. de; BERNARDO, M. K. F.; NASCIMENTO, K. L. do; RAMOS, R. da S.; NASCIMENTO, N. F. F. do; ALVES, E. U. Phenotypic Expression of Diaspores Indicates Genetic Diversity in Natural Populations of *Spondias tuberosa* (Anacardiaceae). **Biology**, v. 14, n. 12, 1 dez. 2025.

SILVA, J. N. da; PÁDUA, G. V. G. de; SILVA, M. J. da; RODRIGUES, M. H. B. S.; MEDEIROS, M. L. de S.; RODRIGUES, C. M.; SOUZA, A. D. G.; ALVES, E. U. Physiological Variability in Seeds of a Natural Population of *Hymenaea martiana* Hayne in Paraíba, Brazil. **Revista Caatinga**, v. 38, 2025.

SILVA, M. S. O. da; SANTANA, N. A.; NUNES, V. V.; VIEIRA, M. E. O.; CALAZANS, C. C.; CASTRO NIZIO, D. A. de; SILVA-MANN, R. Field-image endocarp phenotyping for provenance discrimination and traceability in *Spondias tuberosa*. **Genetic Resources and Crop Evolution**, v. 73, n. 4, 1 abr. 2026.

SINGH, J.; CLAVIJO MICHELANGELI, J. A.; GEZAN, S. A.; LEE, H.; VALLEJOS, C. E. Maternal effects on seed and seedling phenotypes in reciprocal F1 hybrids of the common bean (Phaseolus vulgaris L.). **Frontiers in Plant Science**, v. 8, 24 jan. 2017.

SOUSA-SANTOS, C.; LIMA, T. M.; CERQUEIRA, A. F.; DALMOLIN, C.; ALMEIDA, A.; SANTOS, M. S.; MIELKE, M. S. Whole-plant and leaf determinants of growth rates in progenies of *Genipa americana* L. (Rubiaceae). **Brazilian Journal of Biology**, v. 84, 2024.

SOUZA, A. A. de; BRUNO, R. de L. A.; LOPES, K. P.; CARDOSO, G. D.; PEREIRA, W. E.; CAZÉ FILHO, J. Semillas de *Spondias tuberosa* oriundas de frutos cosechados en cuatro estadios de maduración y almacenadas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, n. 3, p. 372–378, set. 2005.

THE JAMOVI PROJECT. **jamovi: version 2.6.** Sydney: The jamovi project, 2025. Software. Disponível em: https://www.jamovi.org/index.html. Acesso em: 4 jul. 2026.

UPRETEE, P.; BANDARA, M. S.; TANINO, K. K. The Role of Seed Characteristics on Water Uptake Preceding Germination. **Seeds**, v. 3, n. 4, p. 559-574, 1 dez. 2024.

ZAS, R.; CENDÁN, C.; SAMPEDRO, L. Mediation of seed provisioning in the transmission of environmental maternal effects in Maritime pine (*Pinus pinaster* Aiton). **Heredity**, v. 111, n. 3, p. 248–255, set. 2013.

7. ARTIGO 4
FERTILIZANTE DE LIBERAÇÃO CONTROLADA PROMOVE O CRESCIMENTO DAS MUDAS E O DESENVOLVIMENTO DO XILOPÓDIO DE UMBUZEIRO SOB DIFERENTES CONDIÇÕES DE LUMINOSIDADE

RESUMO

O umbuzeiro (*Spondias tuberosa* Arruda) é uma espécie nativa da Caatinga de grande importância ecológica e socioeconômica, cuja produção de mudas ainda apresenta limitações relacionadas ao crescimento inicial lento. Assim, este estudo avaliou o efeito de doses de fertilizante de liberação controlada (FLC) e de dois ambientes luminosos sobre o crescimento e a qualidade de mudas de umbuzeiro. O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial 2 × 5, com dois ambientes de cultivo (pleno sol e sombrite 50%) e cinco doses de FLC (0, 2, 4, 8 e 12 g L^{-1}). Foram avaliadas variáveis de crescimento, biomassa, qualidade de mudas e teor de clorofila ao longo de 120 dias. Os resultados indicam que as doses de FLC influenciam significativamente o crescimento das mudas, sendo as maiores médias observadas na dose de 2 g L^{-1} por promover maior diâmetro do caule, maior acúmulo de biomassa radicular, melhor desenvolvimento do xilopódio e maior Índice de Qualidade de Dickson. Doses mais elevadas (8 e 12 g L^{-1}) não resultaram em incrementos adicionais e, em alguns casos, reduziram o desempenho das mudas. O ambiente de pleno sol favoreceu o crescimento estrutural, especialmente o diâmetro do caule, a biomassa e o Índice de Qualidade de Dickson. A dose de 2 g L^{-1} de FLC, associada ao cultivo em pleno sol, favoreceu o crescimento equilibrado, o desenvolvimento do xilopódio e a produção de mudas de umbuzeiro de melhor qualidade.

Palavras-chave: Anacardiaceae, Caatinga, umbu, nutrição mineral, produção de mudas.

7.1. Introdução

O umbuzeiro (*Spondias tuberosa* Arruda) é uma espécie arbórea da família Anacardiaceae, nativa da Caatinga com grande importância ecológica e socioeconômica para o semiárido brasileiro (Sales *et al*., 2024; Rodrigues *et al*., 2024). Seus frutos, chamados de umbus ou imbus, são amplamente utilizados na alimentação humana e representam uma importante fonte de renda para populações rurais, pois podem ser consumidos *in natura* ou processados para fabricação de doces, sorvetes, licores, geleias, entre outros produtos (Lins Neto *et al*., 2012; Oliveira *et al*., 2025). Embora a espécie apresente adaptação natural às condições de estresse hídrico, o crescimento inicial é relativamente lento, tornando a fase de produção de mudas uma etapa determinante para o sucesso do estabelecimento em campo (Nascimento *et al*., 2026).

Uma característica marcante da espécie é a formação de órgãos de armazenamento subterrâneos, chamados xilopódios. Essa estrutura de reserva desempenha papel fundamental na sobrevivência em ambientes com baixa disponibilidade hídrica, pois armazena água e nutrientes, permitindo à planta suportar períodos de seca (Campos *et al*., 2021; Chiminazzo *et al*., 2023; Cozin *et al*., 2024; Leal *et al*., 2024). O desenvolvimento adequado dessa estrutura está diretamente relacionado à qualidade da muda, uma vez que sua formação depende do balanço entre crescimento da parte aérea e do sistema radicular nas fases iniciais (Oliveira *et al*., 2019). Isso ressalta a importância de práticas que estimulem seu crescimento durante a fase de viveiro (Nascimento *et al*., 2026).

Na fase de viveiro, a nutrição mineral é um dos fatores que mais interfere no crescimento, na rusticidade e na qualidade das mudas (Ali *et al*., 2024). O fornecimento adequado de nutrientes favorece o crescimento da parte aérea e do sistema radicular, a alocação

de biomassa e o desenvolvimento de estruturas de reserva, como o xilopódio (Poorter *et al*., 2012; Schott *et al*., 2016; Gonçalves *et al*., 2017). No entanto, práticas convencionais de adubação podem resultar em perdas por lixiviação e na oferta desbalanceada entre a disponibilidade de nutrientes no substrato e a demanda da planta (Chen; Wei, 2018; Priya *et al*., 2024).

Os fertilizantes de liberação controlada (FLC) podem ser utilizados para fornecer nutrientes de forma gradual durante o crescimento das mudas, reduzindo perdas e melhorando a eficiência da adubação (Vejan *et al*., 2021; Lawrencia *et al*., 2021; Govil *et al*., 2024). Apesar de amplamente utilizados na produção de mudas florestais, ainda são escassas as informações sobre seus efeitos em espécies nativas da Caatinga, especialmente no umbuzeiro.

Além da nutrição, o ambiente luminoso é outro fator que influencia diretamente o crescimento inicial das plantas em viveiros (Yin *et al*., 2023). A disponibilidade de radiação afeta processos fisiológicos e morfológicos, incluindo a produção de biomassa, o desenvolvimento radicular e a formação de estruturas subterrâneas de reserva (Xue *et al*., 2023; Wu *et al*., 2025). Em viveiros, o uso de sombreamento é prática comum, porém a redução da radiação pode modificar os padrões de crescimento e alocação de recursos das mudas (Lv *et al*., 2025; Mendonça *et al*., 2025). É importante considerar que a resposta das plantas à nutrição não ocorre de maneira isolada, podendo ser influenciada pelas condições de radiação do ambiente, influenciando a demanda metabólica e o aproveitamento dos nutrientes, alterando o desenvolvimento da parte aérea, do sistema radicular e do próprio xilopódio (Portsmuth; Niinemets, 2006; Guan *et al*., 2025; Wu *et al*., 2025).

Apesar da relevância da espécie, ainda são limitadas as informações sobre o efeito combinado da adubação com fertilizantes de liberação controlada e da radiação do ambiente de cultivo no crescimento inicial do umbuzeiro. Diante disso, o presente estudo teve como objetivo avaliar o efeito de doses de fertilizante de liberação controlada e do ambiente luminoso sobre o crescimento de mudas de umbuzeiro.

7.2. Material e Métodos

7.2.1. Material vegetal

Frutos maduros de umbuzeiro foram coletados de árvores matrizes localizadas no município de Graccho Cardoso-SE. As matrizes estavam localizadas principalmente em áreas de pastagens. Após a coleta, os frutos foram despolpados manualmente e as unidades de dispersão submetidas à secagem à sombra. Em seguida, o material foi encaminhado ao laboratório, onde permaneceu armazenado em recipientes de polietileno até a instalação dos experimentos.

As unidades de dispersão foram semeadas em bandejas (29,5 × 44 cm) contendo areia lavada como substrato para germinação e mantidas em casa de vegetação sob pleno sol. Foram utilizadas plântulas com aproximadamente 30 dias após a germinação. O transplantio foi realizado para sacos de polietileno pretos (15 × 25 cm - 1,5 litros), contendo substrato composto por terra vegetal e areia lavada na proporção 1:1. A caracterização físico-química do substrato foi realizada no Instituto Tecnológico e de Pesquisas do Estado de Sergipe (ITPS) (Tabela 1).

Tabela 1. Caracterização físico-química do substrato utilizado para o cultivo de mudas de umbuzeiro.

Parâmetro	Unidade	Valor
Atributos químicos		
pH (H_2O)	–	5.91
P	mg dm^{-3}	6.5
K	mg dm^{-3}	13.9
Na	mg dm^{-3}	41.1
Ca	cmolc dm^{-3}	1.99
Mg	cmolc dm^{-3}	0.33
Ca + Mg	cmolc dm^{-3}	2.31
Al	cmolc dm^{-3}	<0.08
H + Al	cmolc dm^{-3}	1.43
Matéria Orgânica	g dm^{-3}	12.9
Total N	%	<0.22
Relação C/N	–	0.75
Atributos de fertilidade		
Soma de bases (SB)	cmolc dm^{-3}	4.6
Capacidade de troca catiônica (CTC)	cmolc dm^{-3}	6.03
Saturação por bases (V)	%	76.3
Percentual de sódio trocável (PST)	%	5
Distribuição granulométrica		
Areia	%	82.78
Silte	%	9.84
Argila	%	7.38

pH (H_2O) – pH em água; Na – sódio; K – potássio; P – fósforo (método Mehlich-1); Mg – magnésio; Ca – cálcio; Al – alumínio (método KCl); MO – matéria orgânica (método colorimétrico de Walkley–Black); H + Al – hidrogênio + alumínio (método SMP); SB – soma de bases trocáveis; CTC – capacidade de troca catiônica; PST – percentual de sódio trocável; V – índice de saturação por bases; C/N – relação carbono/nitrogênio (método MPOACF); N total – nitrogênio total (método MAPA); distribuição granulométrica – método do densímetro de Bouyoucos.

7.2.2. Formulação dos tratamentos

Para avaliar o efeito da aplicação de fertilizante de liberação controlada (FLC) no crescimento de mudas de umbuzeiro, foram testadas cinco concentrações (0-controle, 2, 4, 8 e 12 g L^{-1}) sob dois níveis de sombreamento: pleno sol e sombrite 50%. O fertilizante utilizado foi o Forth Cote® (NPK 15-09-12 + micronutrientes), cujos níveis de garantia foram fornecidos pelo fabricante (Tabela 2).

Tabela 2. Composição nutricional garantida do fertilizante de liberação controlada utilizado no experimento.

Nutriente	N	P_2O_5	K_2O	Mg	S	Cu	Fe	Mo
Teor (%)	15,0	9,0	12,0	1,30	6,0	0,05	0,46	0,02

7.2.3. Análises de crescimento e acúmulo de biomassa

Foram realizadas avaliações mensais durante 120 dias, sendo a primeira realizada 10 dias após a transferência das plântulas para o substrato e contabilizada como avaliação 0. As seguintes variáveis foram avaliadas: altura (cm), medida com auxílio de uma régua milimetrada

e padronizada da base do caule até a inserção da última folha; diâmetro do caule (mm), medido com auxílio de um paquímetro digital; as medidas foram sempre realizadas na altura do nó cotiledonar; para o número de folhas foram consideradas apenas as completamente expandidas.

Ao final do período experimental, as plantas foram coletadas e separadas em parte aérea e sistema radicular. Foram determinadas a massa fresca da parte aérea (folhas + caule), do sistema radicular e total (g), o comprimento (cm) e o diâmetro (mm) do xilopódio. Após isso, foram levadas para estufa de ventilação forçada a 70ºC para determinação da massa seca da parte aérea, do sistema radicular e total (g).

Os dados de crescimento e de massa foram utilizados para os cálculos da razão massa seca da parte aérea/massa seca da raiz (MSPA/MSR) e do Índice de Qualidade de Dickson (IQD) (Dickson *et al*., 1960), de acordo com a Eq. 1:

$$IQD = \frac{MST\ (g)}{\frac{H\ (cm)}{D\ (mm)} + \frac{MSPA\ (g)}{MSR\ (g)}}$$

Onde MST é a massa seca total, H é a altura, D é o diâmetro do caule, MSPA é a massa seca da parte aérea e MSR é a massa seca da raiz.

7.2.4. Índice de clorofila

O índice de clorofila na folha foi estimado de forma indireta através do clorofilômetro portátil (modelo CCM-200, OPIT-SCIENCES, EUA). O índice foi medido aos 60, 90 e 120 dias, sendo o parâmetro definido pela média de 4 medidas, 2 em cada folha.

7.2.5. Monitoramento das condições ambientais

Durante todo o período experimental de 120 dias, as mudas foram mantidas em casa de vegetação com a temperatura e a umidade relativa do ar monitoradas por um termohigrômetro (ASO, modelo AK172) localizado um metro acima do nível do solo. A temperatura média durante o período experimental foi de 29 ± 4 °C e a umidade relativa média foi de 68%.

7.2.6. Análises estatísticas

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado (DIC), em esquema fatorial 2 × 5 (dois níveis de sombreamento e cinco concentrações de FLC), totalizando 10 tratamentos, com 10 repetições por tratamento. Para a variável clorofila, foram utilizadas 8 repetições aos 60 e 90 dias e 4 repetições aos 120 dias.

Inicialmente, os dados foram submetidos ao teste de normalidade de Shapiro–Wilk e à verificação da homogeneidade de variâncias pelo teste de Levene, ambos realizados no software Jamovi versão 2.6 (Projeto Jamovi, 2025). As variáveis que não atenderam aos pressupostos de normalidade (IQD, massa seca da raiz, massa seca total e relação MSPA/MSR) foram transformadas em logaritmo natural (Ln) para fins de análise estatística. As análises foram conduzidas utilizando os dados transformados quando necessário e, para fins de apresentação gráfica, foram utilizados os dados brutos.

Após verificação dos pressupostos, os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA). Como não foi observada interação significativa entre os fatores ambiente e dose de FLC, procedeu-se à análise dos efeitos principais. As doses de FLC foram avaliadas com base nas médias gerais, sendo comparadas por ANOVA seguida do teste de Tukey ($p \leq 0,05$). O efeito do ambiente de cultivo (pleno sol e sombreamento) foi avaliado por meio do teste t de Student ($p \leq 0,05$). O software utilizado para essas análises foi o Sisvar versão 5.8 (Ferreira, 2019).

7.3. Resultados e Discussão

7.3.1. Dinâmica de crescimento ao longo do tempo

O crescimento inicial das mudas de umbuzeiro ao longo do tempo foi influenciado diretamente pelas doses de FLC e pelo ambiente de cultivo durante o período experimental. Observou-se incremento em altura das mudas, com resposta diferenciada entre as doses de FLC e o tempo de avaliação (Figura 1A). De modo geral, o crescimento foi mais acentuado nos primeiros 30 dias após o transplantio, seguido por uma tendência de estabilização nas avaliações posteriores. O tratamento controle (0 g L^{-1}) apresentou aumento discreto, mantendo-se com os menores valores de altura em todos os períodos, independentemente do ambiente. Em pleno sol, as mudas submetidas à dose de 4 g L^{-1} de FLC apresentaram as maiores alturas ao longo do experimento. Já sob sombrite, os maiores valores foram observados nas doses de 2 e 4 g L^{-1}, que se destacaram em relação aos demais tratamentos desde os estágios iniciais de avaliação.

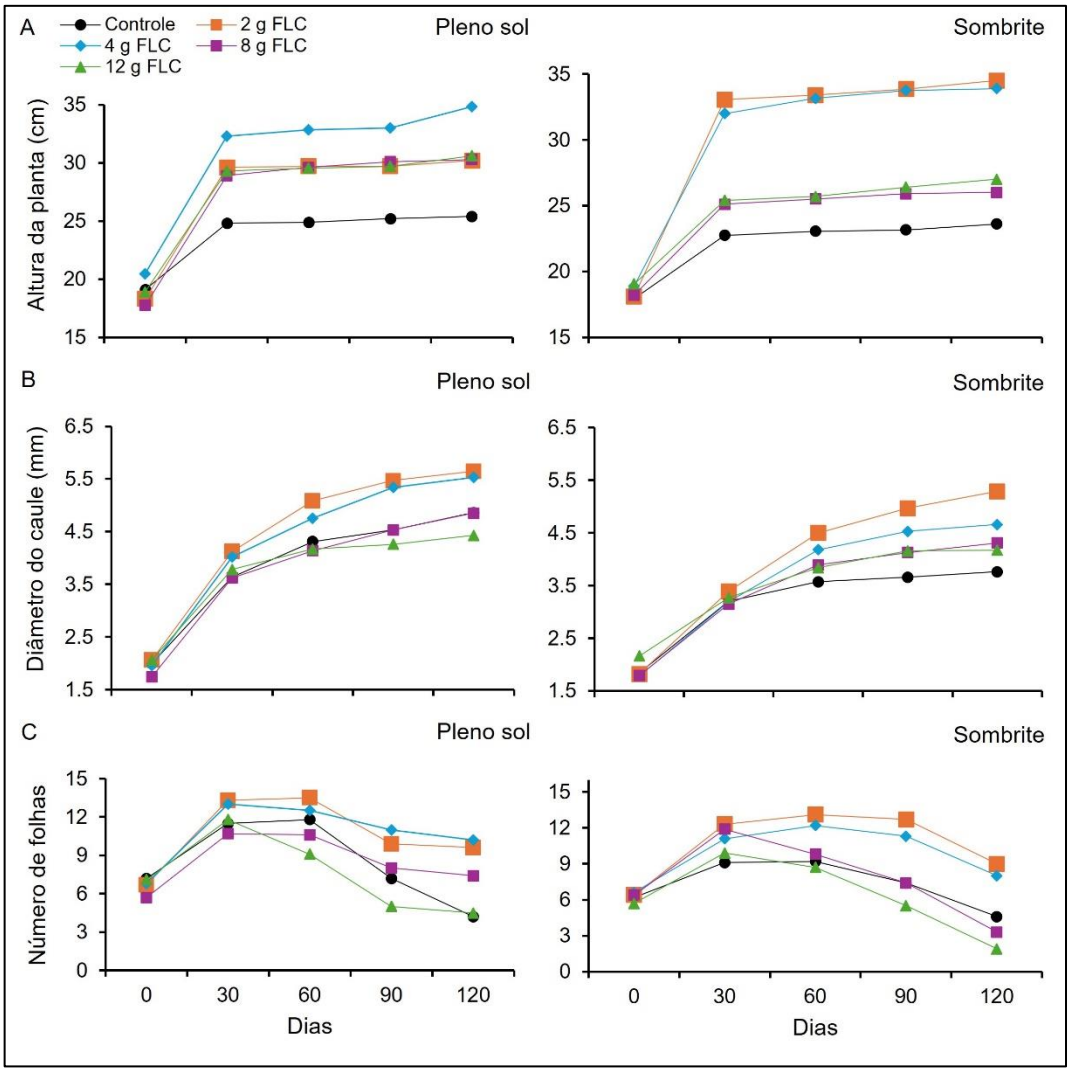


Figura 1. Crescimento inicial de mudas de umbuzeiro em função de diferentes doses de fertilizante de liberação controlada (FLC) (0, 2, 4, 8 e 12 g L^{-1}), cultivadas em dois ambientes (pleno sol e sombrite) ao longo de 120 dias. Foram avaliadas a altura da planta (cm), o diâmetro do caule (mm) e o número de folhas aos 0, 30, 60, 90 e 120 dias após o transplantio.

O diâmetro do caule apresentou um padrão de crescimento contínuo ao longo do período experimental (Figura 1B). Em ambas as condições de luz, a dose de 2 g L^{-1} de FLC foi a mais eficiente, resultando nos maiores diâmetros finais. O tratamento controle e a dose de 12 g L^{-1} apresentaram os menores incrementos em diâmetro. Este comportamento indica que o

investimento em diâmetro do caule é otimizado em doses baixas de fertilização (Carvalho *et al*., 2023; Borges *et al*., 2025).

O número de folhas apresentou pico de crescimento entre 30 e 60 dias após o transplantio, seguido de declínio nas avaliações posteriores (Figura 1C). Esta redução foi acentuada nas mudas do tratamento controle e das doses elevadas de FLC (8 e 12 g L^{-1}), sugerindo que extremos nutricionais aceleram a abscisão foliar.

Já as mudas cultivadas nas doses 2 e 4 g L^{-1} mantiveram valores superiores ao longo do experimento, indicando maior estabilidade da parte aérea. Embora a queda foliar possa refletir o hábito caducifólio intrínseco da espécie em determinadas épocas do ano, a manutenção de maior biomassa foliar nas doses mais baixas de FLC evidencia um crescimento vegetativo mais sustentado e uma mitigação da senescência sob nutrição equilibrada (Lins Neto *et al*., 2013; Wang *et al*., 2022; Zhang *et al*., 2024).

7.3.2. Respostas finais de crescimento

Aos 120 dias após o transplantio, o crescimento das plantas foi significativamente influenciado pelas doses de FLC, enquanto o efeito do ambiente luminoso foi dependente da variável morfológica avaliada (Figura 2).

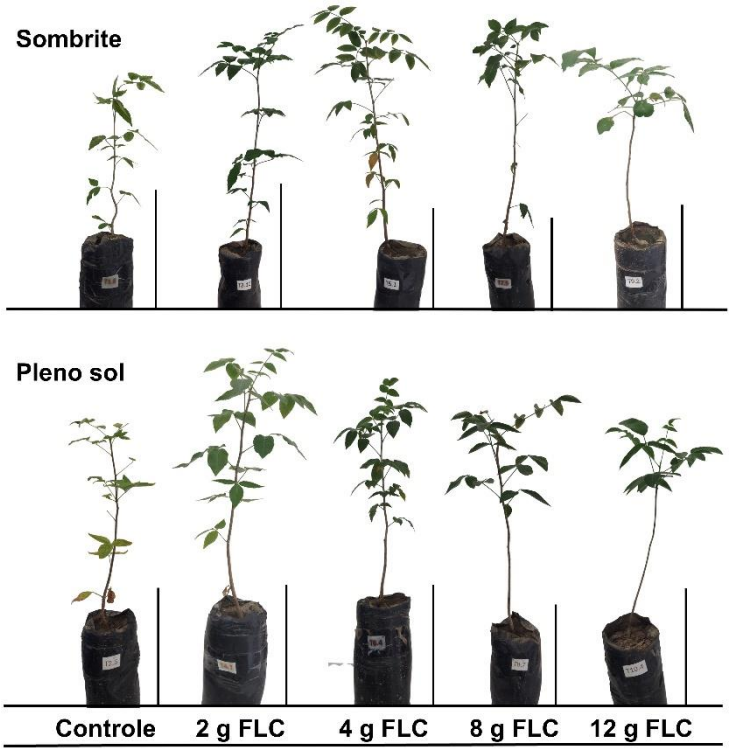


Figura 2. Desenvolvimento morfológico de mudas de umbuzeiro cultivadas sob sombreamento e pleno sol, em resposta à aplicação de diferentes doses de FLC aos 120 dias. Barra de escala = 30 cm.

A altura das plantas respondeu positivamente à fertilização, com maior média observada na dose de 4 g L^{-1} (34 cm), diferindo do tratamento controle (25,5 cm) (Figura 3A). As doses 2, 8 e 12 g L^{-1} apresentaram respostas intermediárias, sem diferirem estatisticamente da dose de 4 g L^{-1} e do tratamento controle. Esse padrão sugere a existência de uma faixa ótima de suprimento nutricional, acima da qual o aumento na disponibilidade de nutrientes não resulta em incrementos adicionais no crescimento.

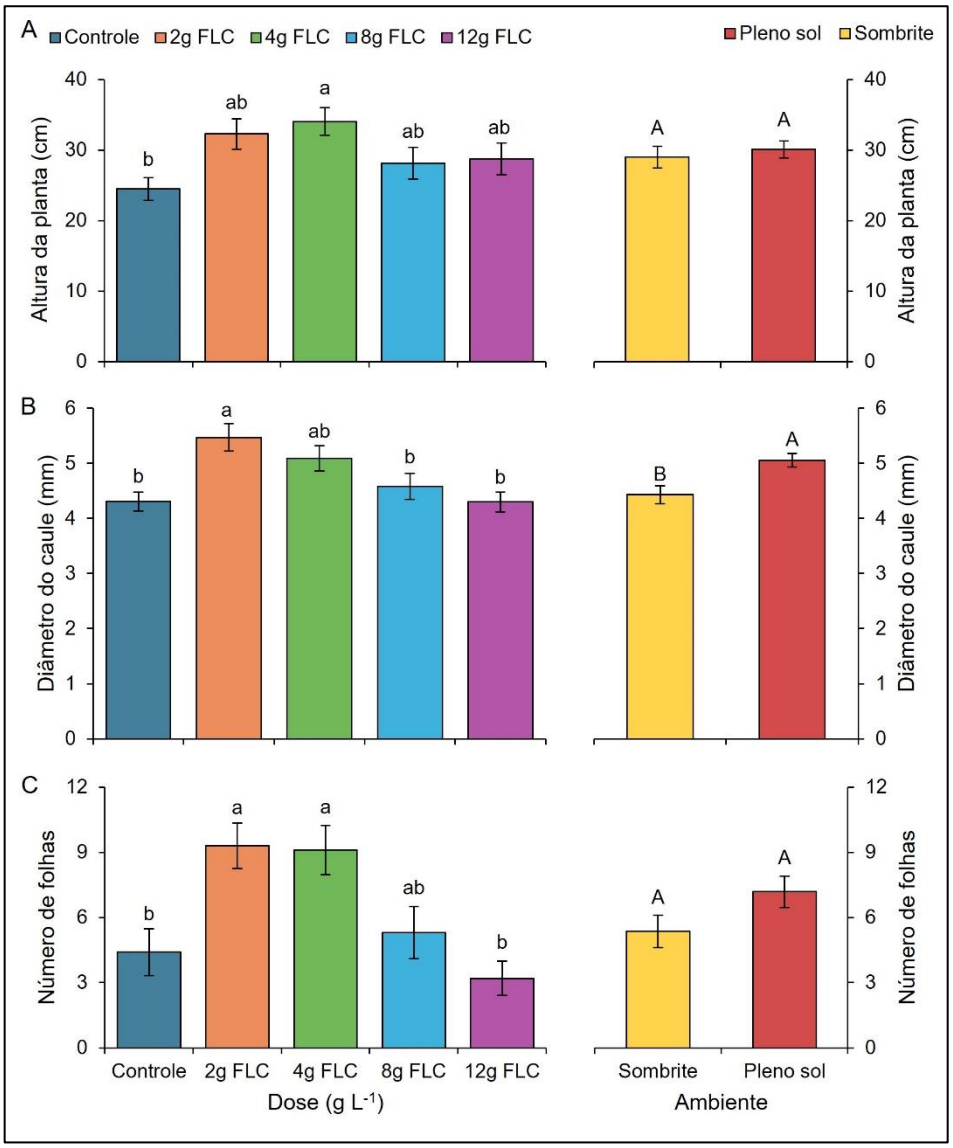


Figura 3. Altura da planta (A), diâmetro do caule (B) e número de folhas (C) de mudas submetidas a diferentes doses de fertilizante de liberação controlada (FLC) e cultivadas em dois ambientes (pleno sol e tela de sombreamento) aos 120 dias. As barras representam a média ± erro padrão. Para as doses, médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Para os ambientes, médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem entre si pelo teste t ($p \leq 0,05$).

Resultados semelhantes foram observados em mudas de *Agonandra brasiliensis* Miers ex Benth. & Hook.f. (pau-marfim), onde as mudas cultivadas na dose de 2 g L^{-1} apresentaram um incremento significativo em altura, não apresentando crescimento significativo em doses mais elevadas (Smiderle *et al*., 2020; Smiderle *et al*., 2021; Smiderle *et al*., 2021b; Mota *et al*., 2021). Não foram observadas diferenças significativas entre plantas cultivadas a pleno sol e sob sombrite para a altura das plantas nesse estudo.

Fertilizantes de liberação controlada são amplamente utilizados na produção de mudas devido à sua capacidade de disponibilizar nutrientes gradualmente ao longo do tempo, sincronizando a liberação com a demanda das plantas. Esse mecanismo aumenta a eficiência de uso dos nutrientes e reduz perdas por lixiviação, além de promover crescimento mais equilibrado das mudas (Mansouri *et al*., 2023; Govil *et al*., 2024; Zhang *et al*., 2026).

O diâmetro do caule apresentou um padrão de resposta parecido, sendo as maiores médias observadas nas mudas cultivadas na dose de 2 g L^{-1} (5,4 mm) (Figura 3B). Enquanto as mudas mantidas em 4 g L^{-1} apresentaram valores intermediários, doses mais elevadas (8 e 12 g

L^{-1}) não mantiveram esse incremento, resultando em valores semelhantes ao tratamento controle (4,3 mm). Em relação ao ambiente, plantas cultivadas a pleno sol (5.0 mm) apresentaram maior diâmetro do caule em comparação às mantidas sob sombreamento (4.4 mm).

Como espécie nativa da Caatinga, o umbuzeiro está naturalmente adaptado a ambientes com alta incidência de radiação solar, o que pode explicar o melhor desempenho das mudas sob condições de maior disponibilidade de luz, conforme observado para outras espécies que ocorrem na Caatinga como *Erythrina velutina* Willd. (mulungu) e *Tabebuia aurea* (Silva Manso) Benth. & Hook.f. ex S.Moore (craibeira) (Santos; Coelho, 2013; Silveira *et al*., 2020).

A maior disponibilidade de radiação em pleno sol favorece o aumento da taxa fotossintética, resultando em maior produção de fotoassimilados e, consequentemente, maior crescimento vegetal (Wu *et al*., 2025; Wang *et al*., 2025). Além disso, ambientes com maior intensidade luminosa podem estimular maior desenvolvimento estrutural das plantas, o que pode ter refletido no incremento do diâmetro do caule observado neste estudo (Mendonça *et al*., 2025).

O número de folhas foi significativamente influenciado pelas doses de fertilizante (Figura 3C). As mudas submetidas às doses de 2 e 4 g L^{-1} apresentaram os maiores valores médios (9,3 e 9,1 folhas, respectivamente), diferindo do controle e da dose de 12 g L^{-1}, que registraram os menores números de folhas (4,4 e 3,2 folhas, respectivamente). Um aumento no número de folhas pode expandir a superfície fotossinteticamente ativa da muda, aumentando a assimilação de carbono e promovendo o crescimento da planta (Amorim *et al*., 2024). Em contrapartida, a redução observada na dose de 12 g L^{-1} pode estar relacionada ao desequilíbrio nutricional ou ao aumento da salinidade do substrato causado pela fertilização excessiva, o que pode afetar negativamente a função radicular e o desenvolvimento da planta (Gasparin *et al*., 2015). Em relação ao ambiente de cultivo, não houve diferença significativa entre pleno sol e sombrite para o número de folhas ao final do experimento.

A altura da planta e o diâmetro do caule estão entre os principais atributos morfológicos utilizados para a avaliação da qualidade das mudas, pois são indicadores do crescimento e da sobrevivência após a transferência para o campo (Grossnickle, 2012). O diâmetro inicial do caule, em específico, é considerado a melhor característica para prever o crescimento futuro, pois se correlaciona com o peso da muda e o tamanho do sistema radicular, estando associado à estabilidade mecânica, maiores reservas de carboidratos e melhor sobrevivência após o transplante (Grossnickle; MacDonald, 2018). Em mudas de *Schinopsis brasiliensis* Engl. (baraúna), por exemplo, espécie que, assim como o umbuzeiro, é nativa da Caatinga e da família Anacardiaceae, a adição de FLC ao substrato proporcionou um aumento considerável no diâmetro do caule, na altura e no número de folhas (Brito *et al*., 2018).

7.3.3. Acúmulo de biomassa total e da parte aérea

A biomassa da parte aérea foi significativamente influenciada pelas doses de fertilizante (Figura 4A–B). Tanto a massa fresca quanto a massa seca apresentaram respostas semelhantes, com as maiores médias observadas nas mudas cultivadas nas doses de 2 e 4 g L^{-1}, que diferiram das plantas do tratamento controle, o qual apresentou os menores acúmulos de biomassa. As doses de 8 e 12 g L^{-1} resultaram em mudas com respostas intermediárias.

Quanto ao ambiente de cultivo, não houve diferença significativa entre mudas de pleno sol e de sombrite para a massa fresca da parte aérea. No entanto, para a massa seca, as mudas cultivadas a pleno sol (1,9 g) apresentaram valores superiores em comparação àquelas mantidas sob tela de sombreamento (1,3 g).

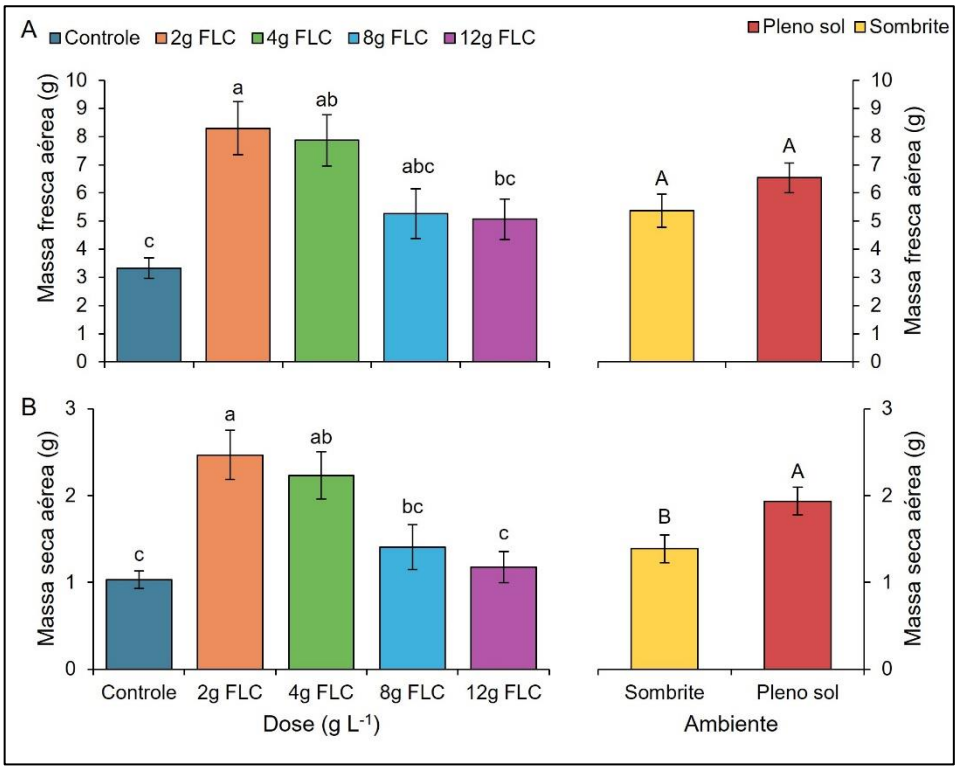


Figura 4. Massa fresca da parte aérea (A) e massa seca da parte aérea (B) de mudas submetidas a diferentes doses de fertilizante de liberação controlada (FLC) e cultivadas em dois ambientes (pleno sol e tela de sombreamento) aos 120 dias. As barras representam a média ± erro padrão. Para as doses, médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Para os ambientes, médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem entre si pelo teste t ($p \leq 0,05$).

De forma semelhante ao observado para a biomassa da parte aérea, a biomassa total também foi significativamente influenciada pelas doses de fertilizante (Figura 5A–B). Tanto a massa fresca quanto a massa seca total das mudas apresentaram maiores valores nas doses mais baixas, com destaque para 2 g L^{-1}, enquanto as plantas do controle apresentaram os menores acúmulos de biomassa. As doses mais elevadas (8 e 12 g L^{-1}) resultaram, de modo geral, em respostas intermediárias, porém sem diferir significativamente do controle.

Em relação ao ambiente de cultivo, as mudas mantidas a pleno sol (41,0 g) apresentaram maior massa fresca total em comparação àquelas sob tela de sombreamento (32,9 g), enquanto para a massa seca total não foram observadas diferenças significativas entre os ambientes.

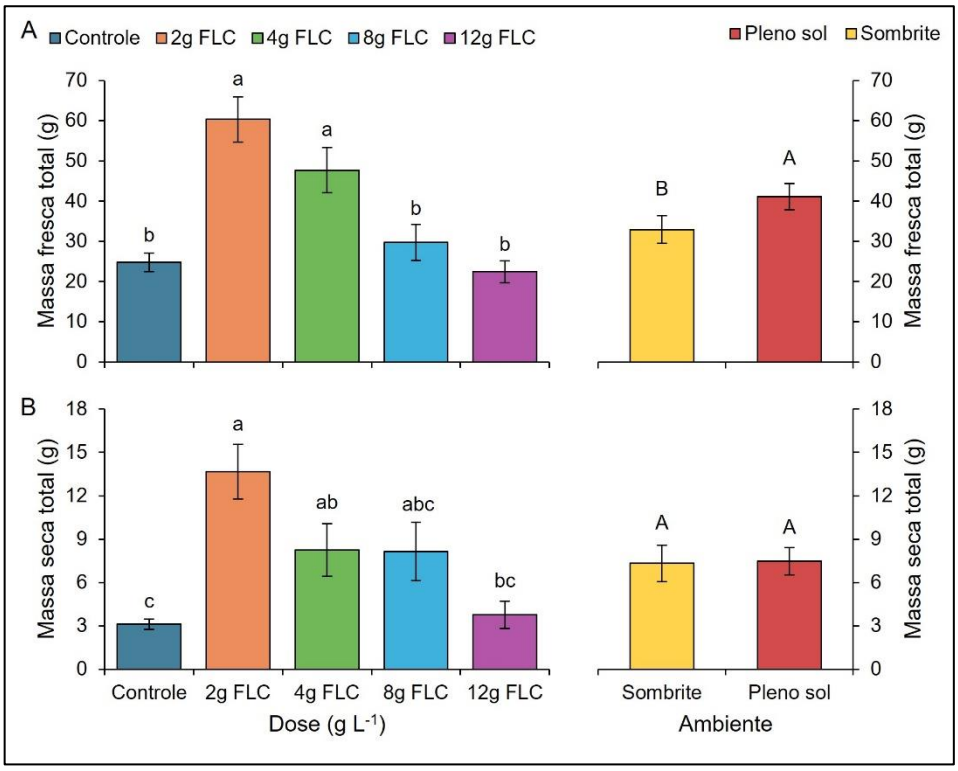


Figura 5. Massa fresca total (A) e massa seca total (B) de mudas de umbuzeiro submetidas a diferentes doses de fertilizante de liberação controlada (FLC) e cultivadas em dois ambientes (pleno sol e sombrite) aos 120 dias. As barras representam a média ± erro padrão. Para doses, médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Para ambientes, médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem entre si pelo teste t ($p \leq 0,05$).

O crescimento das mudas de umbuzeiro, observado pelo acúmulo de biomassa da parte aérea e biomassa total, foi significativamente influenciado pelas doses de fertilizante de liberação controlada. De modo geral, as plantas fertilizadas apresentaram maiores valores de massa fresca e massa seca em comparação ao controle, evidenciando que a disponibilidade adequada de nutrientes favorece o desenvolvimento inicial da espécie. O suprimento nutricional adequado promove maior atividade metabólica, expansão celular e formação de tecidos vegetais, refletindo diretamente no incremento da biomassa vegetal (Fang *et al*., 2023).

Entre as doses avaliadas, os maiores acúmulos de biomassa foram observados principalmente em 2 g L^{-1} e, em menor grau, em 4 g L^{-1}, indicando que níveis baixos de fertilização proporcionam maior eficiência no crescimento das mudas. Esse resultado sugere a existência de uma faixa ótima de disponibilidade nutricional, na qual o fornecimento de nutrientes atende às demandas fisiológicas das plantas sem causar limitações ao crescimento (Fang *et al*., 2023; Quille *et al*., 2025; Tang, 2025). Padrões semelhantes são frequentemente relatados em estudos com fertilizantes de liberação controlada em viveiros, nos quais doses mais baixas promovem maior crescimento e qualidade das mudas, como observado em mudas de *Hymenaea courbaril* L. (jatobá) e *Didymopanax morototoni* (Aubl.) Decne. & Planch. (mandiocão) (Smiderle *et al*., 2023; Borges *et al*., 2025).

Por outro lado, o aumento da fertilização para 8 e 12 g L^{-1} não resultou em incrementos adicionais de biomassa, apresentando respostas intermediárias ou próximas ao controle em algumas variáveis. Esse comportamento pode indicar redução da eficiência de absorção de nutrientes em condições de maior disponibilidade ou possíveis efeitos associados ao aumento da concentração de sais no substrato, fatores que podem limitar o crescimento das plantas quando a fertilização é excessiva (Xu *et al*., 2025).

Quanto ao ambiente de cultivo, as mudas mantidas a pleno sol apresentaram maior massa seca da parte aérea e maior massa fresca total em comparação àquelas cultivadas sob

sombrite. A maior disponibilidade de radiação solar pode favorecer a atividade fotossintética e a produção de fotoassimilados, contribuindo para maior acúmulo de biomassa (Wu *et al*., 2025; Wang *et al*., 2025).

7.3.4. Desenvolvimento radicular e formação de xilopódios

A produção de biomassa radicular foi significativamente influenciada tanto pelas doses de FLC quanto pelo ambiente de cultivo. Para a massa fresca de raiz, as mudas cultivadas na dose de 2 g L^{-1} apresentaram o maior acúmulo (52 g), não diferindo estatisticamente da dose de 4 g L^{-1}. No entanto, observou-se uma redução acentuada nesta variável à medida que as doses de FLC excederam 4 g L^{-1}, com as doses de 8 e 12 g L^{-1} apresentando valores semelhantes ao tratamento controle (21,4 g). Quanto ao ambiente, mudas cultivadas sob sol pleno apresentaram maior massa fresca radicular em comparação com as mantidas sob sombrite (Figura 6A).

Em relação à massa seca de raiz, as mudas cultivadas na dose de 2 g L^{-1} também apresentaram o maior acúmulo de matéria seca (11,2 g), sendo estatisticamente superior ao controle e à dose de 12 g L^{-1} (Figura 6B). Doses elevadas (12 g L^{-1}) resultaram em uma queda drástica na biomassa seca da raiz, atingindo valores tão baixos quanto os observados no grupo controle (2,0 g), o que pode indicar um efeito de fitotoxicidade ou estresse osmótico no sistema radicular devido ao excesso de sais (Balasubramaniam *et al*., 2023; Naseem *et al*., 2023). Diferente do observado na massa fresca, a massa seca de raiz não apresentou diferenças significativas entre os ambientes de sol pleno e sombrite, sugerindo que a variação na massa fresca entre ambientes pode estar associada majoritariamente ao conteúdo hídrico dos tecidos e não necessariamente ao acúmulo de biomassa estrutural (Ievinsh, 2023).

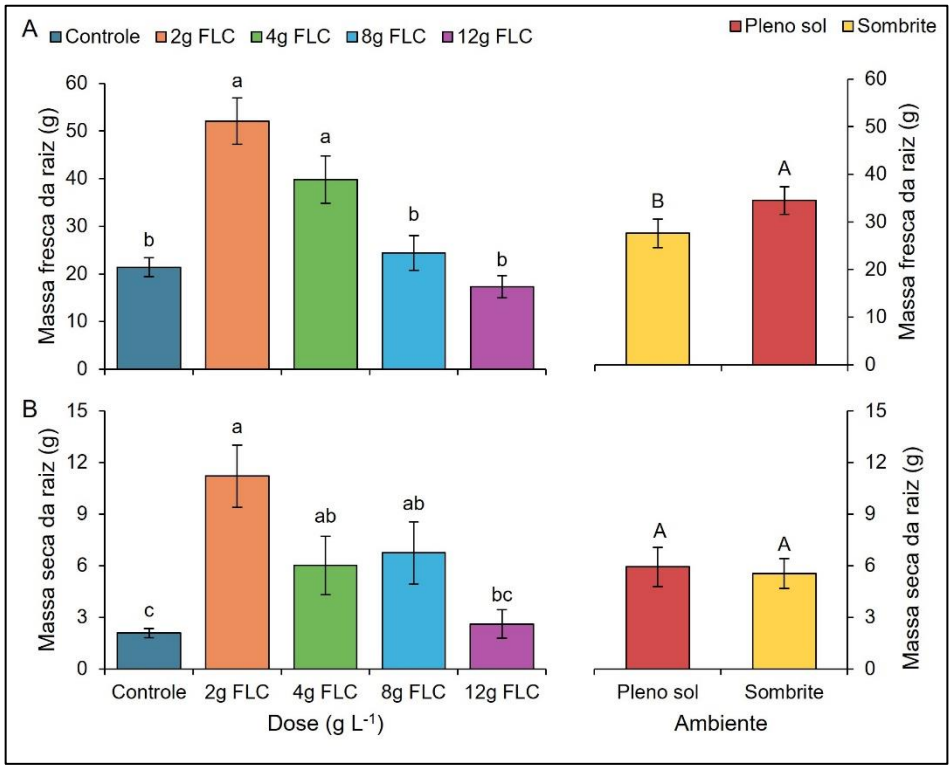


Figura 6. Massa fresca da raiz (g) e massa seca da raiz (g) de mudas de umbuzeiro submetidas a diferentes doses de fertilizante de liberação controlada (FLC) e cultivadas em dois ambientes (pleno sol e sombrite) aos 120 dias. As barras representam a média ± erro padrão. Para doses, médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Para ambientes, médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem entre si pelo teste t ($p \leq 0,05$).

O crescimento do xilopódio também foi influenciado pelas doses de FLC (Figura 7A–B). Para o comprimento, as mudas cultivadas na dose de 2 g L^{-1} (12,7 cm) apresentaram os maiores valores, diferindo das mudas das doses de 8 e 12 g L^{-1} e do tratamento controle (8,4, 5,9 e 8,5 cm, respectivamente), que apresentaram o menor comprimento. O diâmetro do xilopódio também respondeu positivamente à adição do FLC, com maiores valores observados nas mudas cultivadas nas doses de 2 e 4 g L^{-1} (28,9 e 30,8 mm, respectivamente), enquanto as mudas do controle apresentaram o menor diâmetro (21,6 mm). Em relação ao ambiente de cultivo, as mudas mantidas a pleno sol apresentaram maior comprimento do xilopódio em comparação àquelas sob tela de sombreamento. Para o diâmetro, não foram observadas diferenças significativas entre os ambientes.

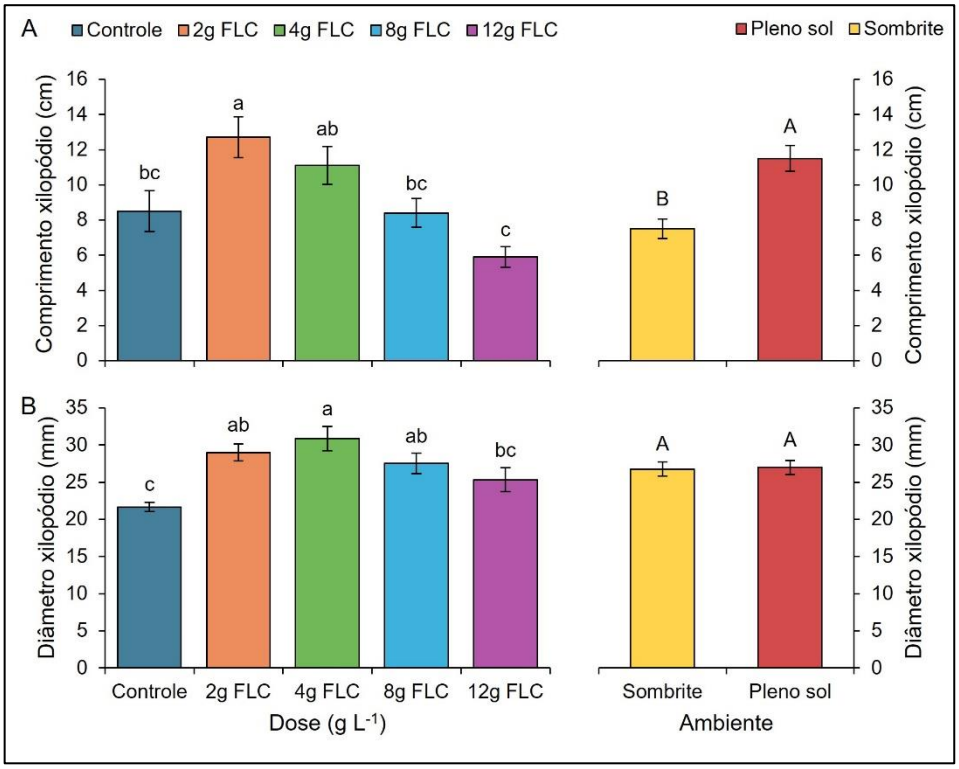


Figura 7. Comprimento do xilopódio (cm) e diâmetro do xilopódio (mm) de mudas de umbuzeiro submetidas a diferentes doses de fertilizante de liberação controlada (FLC) e cultivadas em dois ambientes (pleno sol e sombrite) aos 120 dias. As barras representam a média ± erro padrão. Para doses, médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Para ambientes, médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem entre si pelo teste t ($p \leq 0,05$).

O desenvolvimento das estruturas subterrâneas das mudas de umbuzeiro, incluindo o sistema radicular e o xilopódio, foi significativamente influenciado pelas doses de fertilizante de liberação controlada. De modo geral, as maiores médias de biomassa radicular e dimensões do xilopódio foram observadas nas doses mais baixas de fertilização, especialmente em 2 e 4 g L^{-1}, indicando que níveis adequados de disponibilidade nutricional favorecem o crescimento e a diferenciação dessas estruturas subterrâneas (Figura 8).

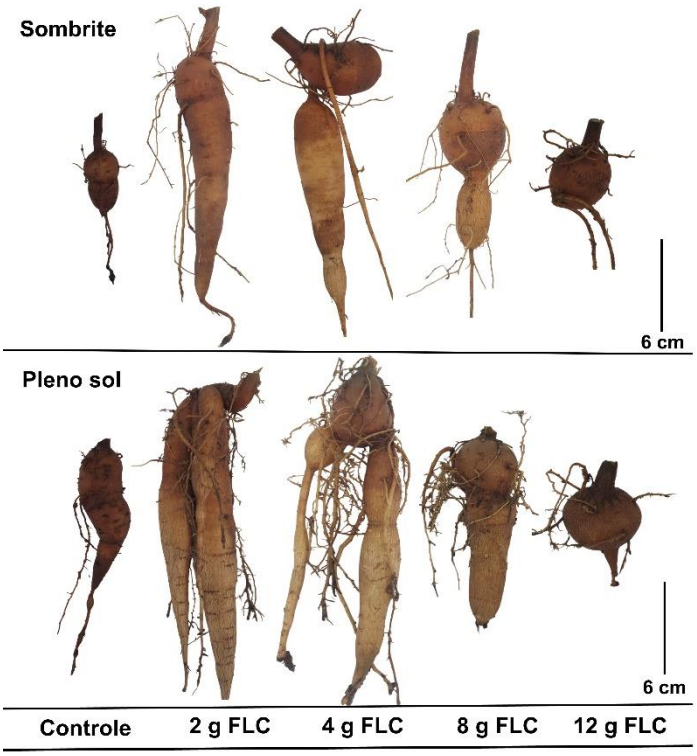


Figura 8. Variação morfológica dos xilopódios de mudas de umbuzeiro cultivadas sob sombreamento e pleno sol, em resposta à aplicação de diferentes doses de FLC aos 120 dias de experimento. Barra de escala = 6 cm.

O sistema radicular desempenha papel fundamental na absorção de água e nutrientes, enquanto o xilopódio atua como órgão de reserva capaz de armazenar água e carboidratos, contribuindo para a sobrevivência da espécie em ambientes com limitação hídrica (Pausas *et* al., 2018). Dessa forma, o maior desenvolvimento dessas estruturas sob doses baixas de fertilizante sugere que a disponibilidade equilibrada de nutrientes pode favorecer tanto o desenvolvimento das raízes quanto o acúmulo de reservas no xilopódio. Resultados semelhantes também foram observados em mudas de umbuzeiro cultivadas com adubação orgânica contendo 30% de esterco bovino ou 40% de esterco de cabra, que promoveram maior crescimento, biomassa do sistema radicular e xilopódios com maiores diâmetros (Cruz *et al*., 2016; Mertens *et al*., 2017).

Por outro lado, o aumento das doses de fertilizante acima de 4 g L^{-1} não resultou em incrementos adicionais no crescimento das estruturas subterrâneas, sendo observada redução na biomassa radicular e nas dimensões do xilopódio. Esse padrão pode estar associado à redução da eficiência de absorção de nutrientes ou ao aumento da concentração de sais no substrato, fatores que podem limitar o crescimento radicular quando a fertilização é excessiva (Munns; Tester, 2008). A sensibilidade do sistema radicular a elevadas concentrações de nutrientes pode comprometer o desenvolvimento de órgãos subterrâneos e reduzir o crescimento da raiz (Shelden; Munns, 2023; Makaza; Khiari, 2023). Além disso, doses elevadas de nutrientes, como N e K, também já foram relatadas como prejudiciais ao desenvolvimento de mudas de umbuzeiro, afetando negativamente diversas características morfológicas, incluindo redução da massa fresca da raiz e do xilopódio (Andrade *et al*., 2013).

Em relação ao ambiente de cultivo, o maior comprimento do xilopódio e a maior massa fresca radicular observados em mudas cultivadas a pleno sol sugerem que a maior disponibilidade de radiação pode favorecer a produção de fotoassimilados e sua translocação para órgãos subterrâneos (Proietti *et al*., 2023). Considerando que o umbuzeiro é uma espécie adaptada a ambientes semiáridos, o desenvolvimento adequado do sistema radicular e do xilopódio durante a fase de viveiro pode representar uma estratégia importante para aumentar

o potencial de sobrevivência das mudas após o transplantio em campo, especialmente em condições de limitação hídrica (Cruz *et al*., 2016).

7.3.5. Índice de qualidade

A relação massa seca da parte aérea/raiz foi influenciada pelas doses de fertilizante (Figura 9A). As maiores relações foram observadas nas mudas cultivadas no controle e nas doses de 4 e 12 g L^{-1}, enquanto as mudas das doses de 2 e 8 g L^{-1} apresentaram valores inferiores. Para o ambiente de cultivo, não foram observadas diferenças significativas na relação parte aérea/raiz entre pleno sol e tela de sombreamento.

O Índice de Qualidade de Dickson (IQD) também foi significativamente afetado pelas doses de FLC (Figura 9B). As mudas cultivadas na dose de 2 g L^{-1} apresentaram o maior valor de IQD, diferindo das plantas mantidas nas demais doses. Em relação ao ambiente, as mudas cultivadas a pleno sol apresentaram maior IQD em comparação àquelas mantidas sob tela de sombreamento.

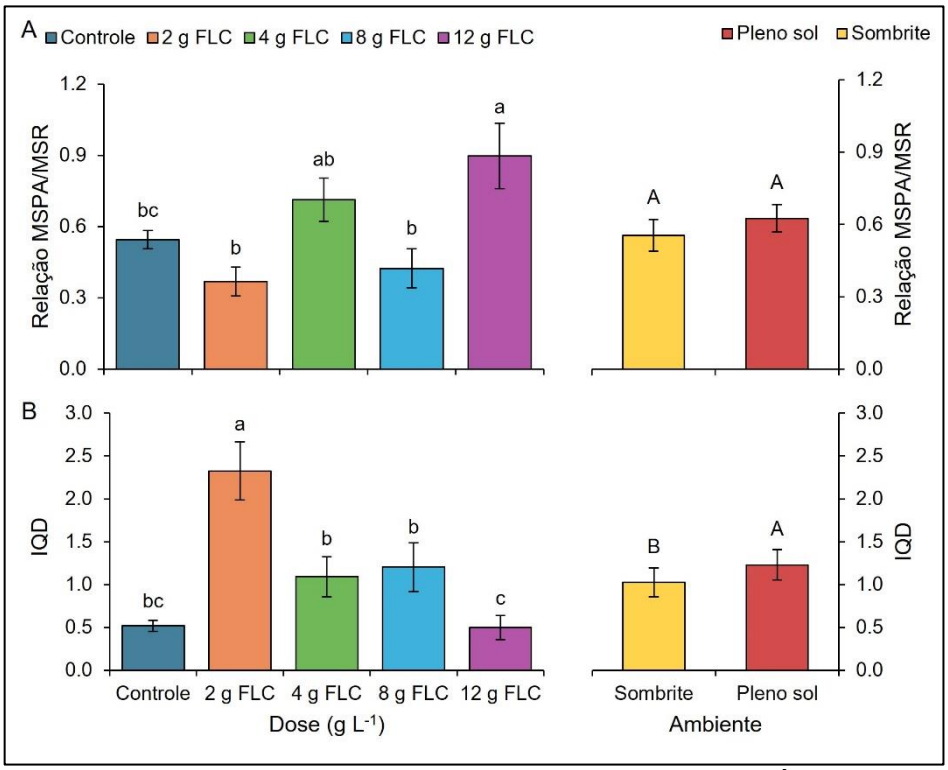


Figura 9. Relação massa seca da parte aérea/raiz (MSPA/MSR) (A) e Índice de Qualidade de Dickson (IQD) (B) de mudas de umbuzeiro submetidas a diferentes doses de fertilizante de liberação controlada (FLC) e cultivadas em dois ambientes (pleno sol e sombrite) aos 120 dias. As barras representam a média ± erro padrão. Para doses, médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Para ambientes, médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem entre si pelo teste t ($p \leq 0,05$).

A relação entre MSPA/MSR foi significativamente influenciada pelas doses de fertilizante, indicando alterações no padrão de alocação de biomassa das mudas de umbuzeiro. De modo geral, as menores relações foram observadas nas doses de 2 e 8 g L^{-1} de FLC, indicando maior investimento relativo no sistema radicular, o que pode favorecer a absorção de água e nutrientes durante as fases iniciais de estabelecimento. Por outro lado, a maior relação registrada no tratamento controle e nas doses de 4 e 12 g L^{-1} sugere maior alocação de biomassa na parte aérea. Uma baixa relação entre MSPA/MSR proporciona às mudas uma melhor chance de sobrevivência e crescimento em locais com baixa disponibilidade hídrica (Grossnickle; MacDonald, 2026), o que pode ser fundamental para espécies de ambientes semiáridos, como o umbuzeiro.

Esse padrão de alocação de biomassa também se reflete nos valores do IQD, em que se observou efeito significativo tanto das doses de fertilizante quanto do ambiente de cultivo. O maior valor de IQD foi registrado na dose de 2 g L^{-1}, indicando melhor equilíbrio morfológico e maior qualidade das mudas nessa condição. O IQD é amplamente utilizado como indicador integrado de qualidade de mudas, pois considera simultaneamente variáveis relacionadas ao crescimento e à distribuição de biomassa entre os diferentes órgãos da planta, o que permite agrupar diferentes características que são importantes para a avaliação da qualidade das mudas (Avelino *et al*., 2021).

Nesse sentido, valores mais elevados do IQD refletem em mudas mais robustas e com maior potencial de sobrevivência e desempenho após o transplantio (Leite et al., 2017). Além disso, o ambiente de pleno sol proporcionou valores superiores de IQD em comparação ao cultivo sob sombrite, sugerindo que a maior disponibilidade de luz pode favorecer o maior desenvolvimento estrutural das mudas (Mendonça *et al*., 2025).

7.3.6. Índice de clorofila

O teor de clorofila nas folhas foi influenciado significativamente pelas doses de fertilizante em todas as épocas avaliadas, enquanto o ambiente de cultivo não apresentou efeito significativo sobre essa variável (Tabela 3). De modo geral, as plantas cultivadas sem fertilização apresentaram os menores valores de clorofila, com redução ao longo do tempo, passando de 15,7 aos 60 dias para 8,1 aos 120 dias. Em contraste, os tratamentos com FLC mantiveram valores mais elevados, variando entre 42,5 e 68,6 nas diferentes avaliações, evidenciando o efeito positivo da adubação sobre o teor de clorofila foliar. Em relação ao ambiente de cultivo, não foram observadas diferenças significativas entre plantas cultivadas em pleno sol e sob sombrite em nenhuma das épocas avaliadas para o teor de clorofila na folha.

Através do índice de clorofila na folha é possível monitorar o estado fisiológico e nutricional das mudas, pois existe uma relação direta entre o teor de clorofila foliar e a disponibilidade de nutrientes no substrato, principalmente o nitrogênio (Wei *et al*., 2024; Wang *et al*., 2024). Os maiores teores de clorofila observados nas plantas submetidas à fertilização indicam que a disponibilidade de nutrientes desempenha papel importante na manutenção da capacidade fotossintética das plantas (Silva *et al*., 2019). A análise química do substrato utilizado evidencia baixa disponibilidade de nitrogênio (<0,22%), conforme apresentado na Tabela 1, o que sugere que esse nutriente pode ter sido um fator limitante para o desenvolvimento inicial das plantas no tratamento controle (Guo *et al*., 2024). Já nos tratamentos fertilizados, a adição do FLC ao substrato contribuiu para elevar a disponibilidade de nutrientes, especialmente o nitrogênio (15% de N total).

O nitrogênio está envolvido diretamente na estrutura e na síntese das moléculas de clorofila, sendo um dos principais constituintes dos pigmentos fotossintéticos (Lv *et al*, 2025). Dessa forma, a maior disponibilidade desse nutriente em plantas fertilizadas tende a favorecer a formação e a manutenção dos pigmentos fotossintéticos, refletindo em maiores valores de clorofila foliar (Zhang *et al*., 2021; Xu *et al*., 2024).

A literatura relata que a adição de FLC ao substrato pode favorecer o aumento do teor de clorofila foliar, uma vez que um dos principais componentes é o nitrogênio, elemento diretamente associado à síntese de clorofila. Resultados semelhantes foram observados em outras espécies, como *Lonchocarpus muehlbergianus* Hassl. (embira-de-sapo), *Khaya anthotheca* e *Khaya grandifoliola* (mogno africano), nas quais a aplicação de FLC promoveu incremento significativo nos índices de clorofila em comparação ao tratamento controle (Azevedo *et al*., 2024; Roubuste *et al*., 2025). Esse padrão corrobora os resultados obtidos no presente estudo, em que o aumento das doses de FLC no substrato esteve associado à elevação dos teores de clorofila nas folhas, evidenciando a importância do suprimento adequado de nitrogênio para o desempenho fotossintético das plantas.

Tabela 3. Índice de clorofila de mudas de umbuzeiro submetidas a diferentes doses de fertilizante de liberação controlada e cultivadas em dois ambientes de cultivo (sol pleno e sombrite) aos 60, 90 e 120 dias após o transplante.

Dose (g L^{-1})		60 Days	90 Days	120 Days
0		15.7 (± 1.1) c	12.2 (± 1.6) b	8.08 (± 1.8) b
2		68.6 (± 4.3) a	54.9 (± 5.0) a	42.5 (± 3.7) a
4		51.1 (± 2.5) ab	53.5 (± 4.4) a	44.1 (± 4.5) a
8		46.6 (± 5.6) b	53.7 (± 5.3) a	47.6 (± 8.5) a
12		48.4 (± 7.1) b	51.7 (± 6.1) a	48.5 (± 6.5) a
Environment	Full sun	47.2 (± 4.3) A	46.1 (± 4.0) A	42.4 (± 5.5) A
	Shade net	45.0 (± 3.6) A	44.2 (± 3.8) A	33.9 (± 3.8) A
Overall Mean		46.1	45.2	38.1
CV (%)		38.6	41.1	37.5

Os valores representam a média ± erro padrão. Médias seguidas pela mesma letra minúscula dentro de uma coluna não diferem pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na linha "Ambiente" não diferem pelo teste t ($p \leq 0,05$). n = 8 aos 60 e 90 dias e n = 4 aos 120 dias. CV = coeficiente de variação.

De forma geral, a adição de FLC ao substrato influenciou significativamente o crescimento e a qualidade de mudas de umbuzeiro. A adição de doses entre 2 e 4 g L^{-1} de FLC otimiza o crescimento da parte aérea e o desenvolvimento do xilopódio, estrutura essencial para a sobrevivência da planta em condições do semiárido. Doses elevadas de fertilizante (8 e 12 g L^{-1}) não promovem ganhos adicionais e podem comprometer o desempenho das mudas, indicando a existência de uma faixa ótima de suprimento nutricional.

Quanto ao ambiente, o pleno sol mostrou-se mais adequado por promover mudas mais robustas (maior diâmetro e IQD), refletindo a adaptação natural da espécie à alta luminosidade. Considerando que o umbuzeiro é uma espécie nativa de ambientes semiáridos, naturalmente exposta a elevados níveis de radiação solar, o bom desempenho das mudas cultivadas a pleno sol pode refletir adaptações fisiológicas da espécie a condições de alta luminosidade. Dessa forma, a combinação de doses baixas de fertilizante de liberação controlada e ambientes com adequada disponibilidade de luz pode favorecer o crescimento e a produção de mudas de maior qualidade em viveiro.

7.4. Conclusão

O uso de fertilizante de liberação controlada promove incremento no crescimento e na qualidade de mudas de umbuzeiro, sendo a dose de 2 g L^{-1} a mais eficiente. Doses superiores a 4 g L^{-1} não proporcionam ganhos adicionais, podendo inclusive comprometer o desempenho das mudas. Além disso, o cultivo em pleno sol favorece o desenvolvimento e resulta em mudas de melhor qualidade.

7.5. Referências Bibliográficas

ALI, A.; NIU, G.; MASABNI, J.; FERRANTE, A.; COCETTA, G. Integrated nutrient management of fruits, vegetables, and crops through the use of biostimulants, soilless cultivation, and traditional and modern approaches: a mini review. **Agriculture**, v. 14, n. 8, art. 1330, 2024.

AMORIM, P. E. C.; PEREIRA, D. F.; FREIRE, R. I. S.; OLIVEIRA, A. M. F.; MENDONÇA, V.; RIBEIRO, J. E. S. A non-destructive method for leaflet area prediction of *Spondias tuberosa* Arruda: an approach to regression models. **Bragantia**, v. 83, e20230269, 2024.

ANDRADE, M. W. de; MENDONÇA, V.; HAFLE, O. M.; MEDEIROS, P. V. Q. de; MENDONÇA, L. F. de M. Adubos nitrogenados e potássicos na produção de porta-enxertos de umbuzeiro (*Spondias tuberosa* Arr. Cam.). **Revista Caatinga**, v. 26, n. 4, p. 117-122, 2013.

AVELINO, N. R.; SCHILLING, A. C.; DALMOLIN, A. C.; SANTOS, M. S.; MIELKE, M. S. Biomass allocation and growth indicators for quality evaluation of seedlings of native forest species. **Ciência Florestal**, v. 31, n. 4, p. 1733-1750, 2021.

AZEVEDO, C. dos S.; FARIA, J. C. T.; CALDEIRA, M. V. W.; GODINHO, T. de O.; DIAS, N. G. F.; MOMOLLI, D. R.; MOURA, C. C. de; ZUCOLOTO, M.; ATALA, L. R. Controlled release fertilizer and tube volume in the production of African mahogany seedlings. **Cerne**, v. 30, e103456, 2024.

BALASUBRAMANIAM, T.; SHEN, G.; ESMAEILI, N.; ZHANG, H. Plants' response mechanisms to salinity stress. **Plants**, v. 12, n. 12, art. 2253, 2023.

BORGES, M. de M. R.; CASTRO, P. H. C. de; SANTOS, M. D. C.; SILVA FILHO, D. P. da; GAMA, M. A. P.; ARAÚJO, D. G. de. Growth of *Didymopanax morototoni* seedlings as a function of doses of controlled-release fertilizer. **Revista Árvore**, v. 49, n. 1, p. 1-12, 2025.

BRITO, L. P. da S.; BEZERRA, T. T.; NUNES, E. M. B.; CAVALCANTE, M. Z. B.; SIQUEIRA FILHO, J. A. de. Production of *Schinopsis brasiliensis* Engler seedlings under washed coconut coir fiber and increasing doses of controlled release fertilizers. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 3, p. 1022-1034, 2018.

CAMPOS, G. R.; CARNEIRO, R. G. da S.; FERREIRA, H. D.; BORTOLINI, J. C.; MORAES, M. G. de. Non-structural carbohydrates stored in belowground organs point to the diversity in Amaranthaceae. **Flora**, v. 276-277, e151774, 2021.

CARVALHO, F. E. L.; PRATO, A. I.; ROJAS-MOLINA, J. Quality of *Lecythis tuyrana* Pittier seedlings using controlled-release fertilizer, volumes of container and light acclimatation. **Floresta e Ambiente**, v. 30, n. 3, 2023.

CHEN, J.; WEI, X. Controlled-release fertilizers as a means to reduce nitrogen leaching and runoff in container-grown plant production. In: **Nitrogen in Agriculture: Updates**. London: InTech, 2018.

CHIMINAZZO, M. A.; BOMBO, A. B.; CHARLES-DOMINIQUE, T.; FIDELIS, A. To protect or to hide: Why not both? An investigation of fire-related strategies in Cerrado woody species. **Flora**, v. 306, art. 152350, 2023.

COZIN, B. B.; LEAL, A. S.; DAIBES, L. F.; FIDELIS, A.; MARTINS, A. R. Origin and ontogeny of the xylopodium in Cerrado legumes: role of the hypocotyl and ecological significance. **Flora: Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants**, v. 321, 2024.

CRUZ, F. R. da S.; ANDRADE, L. A. de; FEITOSA, R. C. Produção de mudas de umbuzeiro (*Spondias tuberosa* Arruda Câmara) em diferentes substratos e tamanho de recipientes. **Ciência Florestal**, v. 26, n. 1, p. 69-80, 2016.

DICKSON, A.; LEAF, A. L.; HOSNER, J. F. Quality appraisal of white spruce and white pine seedling stock in nurseries. **The Forestry Chronicle**, v. 36, n. 1, p. 10-13, 1960.

FANG, X.; YANG, Y.; ZHAO, Z.; ZHOU, Y.; LIAO, Y.; GUAN, Z.; CHEN, S.; FANG, W.; CHEN, F.; ZHAO, S. Optimum nitrogen, phosphorous, and potassium fertilizer application increased chrysanthemum growth and quality by reinforcing the soil microbial community and nutrient cycling function. **Plants**, v. 12, n. 23, art. 4062, 2023.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer analysis system to fixed effects split plot type designs. **Revista Brasileira de Biometria**, v. 37, n. 4, p. 529-535, 2019.

GASPARIN, E.; ARAUJO, M. M.; SALDANHA, C. W.; TOLFO, C. V. Controlled release fertilizer and container volumes in the production of *Parapiptadenia rigida* (Benth.) Brenan seedlings. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 37, n. 4, p. 473-481, 2015.

GONÇALVES, W. V.; VIEIRA, M. C.; CARNEVALI, T. O.; HEREDIA ZÁRATE, N. A.; ROSA ARAN, H. D. V.; SILVA MINELI, K. C. Nitrogen and phosphorus fertilization promotes aerial part development and affect nutrient uptake by carobinha of the Brazilian Cerrado. **American Journal of Plant Sciences**, v. 8, n. 13, p. 3377-3398, 2017.

GOVIL, S.; VAN DUC LONG, N.; ESCRIBÀ-GELONCH, M.; HESSEL, V. Controlled-release fertiliser: recent developments and perspectives. **Industrial Crops and Products**, v. 219, 119160, 2024.

GROSSNICKLE, S. C. Why seedlings survive: influence of plant attributes. **New Forests**, v. 43, n. 5-6, p. 711-738, 2012.

GROSSNICKLE, S. C.; MACDONALD, J. E. Why seedlings grow: influence of plant attributes. **New Forests**, v. 49, p. 1-34, 2018.

GROSSNICKLE, S. C.; MACDONALD, J. E. Seedling field performance on hot, dry forest restoration sites: influence of plant attributes. **New Forests**, v. 57, n. 2, 2026.

GUAN, C.; ZHANG, D.; CHU, C. Interplay of light and nitrogen for plant growth and development. **The Crop Journal**, v. 13, p. 641-655, 2025.

GUO, P.; REN, J.; SHI, X.; XU, A.; ZHANG, P.; GUO, F.; FENG, Y.; ZHAO, X.; YU, H.; JIANG, C. Optimized nitrogen application ameliorates the photosynthetic performance and yield potential in peanuts as revealed by OJIP chlorophyll fluorescence kinetics. **BMC Plant Biology**, v. 24, art. 774, 2024.

IEVINSH, G. Water content of plant tissues: so simple that almost forgotten? **Plants**, v. 12, n. 6, art. 1238, 2023.

LAWRENCIA, D.; WONG, S. K.; LOW, D. Y. S.; GOH, B. H.; GOH, J. K.; RUKTANONCHAI, U. R.; SOOTTITANTAWAT, A.; LEE, L. H.; TANG, S. Y. Controlled release fertilizers: a review on coating materials and mechanism of release. **Plants**, v. 10, n. 2, art. 238, 2021.

LEAL, A. S.; FIDELIS, A.; ARAUJO, M. A. de; COZIN, B. B.; MARTINS, A. R. Belowground systems in tropical savanna: Fabaceae morphoanatomical traits and their relation to fire. **Plant Biology**, v. 26, n. 7, p. 1118-1130, 2024.

LEITE, T. de S.; DOMBROSKI, J. L. D.; FREITAS, R. M. O. de; LEITE, M. de S.; RODRIGUES, M. R. de O. Produção de mudas de *Enterolobium contortisiliquum* e partição de assimilados em resposta à adubação fosfatada e inoculação com fungos micorrízicos. **Ciência Florestal**, v. 27, n. 4, p. 1157-1166, 2017.

LINS NETO, E. M. de F.; ALMEIDA, A. L.; PERONI, N.; CASTRO, C. C. de; ALBUQUERQUE, U. P. de. Phenology of *Spondias tuberosa* Arruda (Anacardiaceae) under different landscape management regimes and a proposal for a rapid phenological diagnosis using local knowledge. **Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine**, v. 9, art. 10, 2013.

LINS NETO, E. M. de F.; PERONI, N.; MARANHÃO, C. M. C.; MACIEL, M. I. S.; ALBUQUERQUE, U. P. de. Analysis of umbu (*Spondias tuberosa* Arruda (Anacardiaceae)) in different landscape management regimes: a process of incipient domestication? **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 184, n. 7, p. 4489-4499, 2012.

LV, Y.; WANG, X.; DING, B.; XIAO, M.; QIN, C. Effects of nitrogen addition on the growth and photosynthetic physiology of *Gleditsia sinensis* Lam. seedlings under shading conditions. **Scientific Reports**, v. 15, 2025.

MAKAZA, W.; KHIARI, L. Too salty or toxic for use: a tale of starter fertilizers in agronomic cropping systems. **Agronomy**, v. 13, n. 11, art. 2690, 2023.

MANSOURI, H.; AIT SAID, H.; NOUKRATI, H.; OUKARROUM, A.; BEN YOUCEF, H.; PERREAULT, F. Advances in controlled release fertilizers: cost-effective coating techniques and smart stimuli-responsive hydrogels. **Advanced Sustainable Systems**, v. 7, n. 9, 2023.

MENDONÇA, A. M. das C.; GARCIA, F. H. S.; VILELA, A. L. de O.; RODRIGUES, M.; BARBOSA, J. P. R. A. D. Optimizing *Copaifera langsdorffii* seedling production through light-mediated phenotypic plasticity in nursery environments. **Floresta e Ambiente**, v. 32, n. 3, e20240051, 2025.

MERTENS, J.; GERMER, S.; GERMER, J.; SAUERBORN, J. Comparison of soil amendments for reforestation with a native multipurpose tree under semiarid climate: root and root tuber response of *Spondias tuberosa*. **Forest Ecology and Management**, v. 396, p. 1-10, 2017.

MOTA, E. R.; SMIDERLE, O. J.; DIONISIO, L. F. S.; SOUZA, A. das G.; MONTENEGRO, R. A.; SCHWARTZ, G. Seedling quality of *Agonandra brasiliensis* in response to different Osmocote® doses and recipient volumes. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 1, e55010111903, 2021.

MUNNS, R.; TESTER, M. Mechanisms of salinity tolerance. **Annual Review of Plant Biology**, v. 59, p. 651-681, 2008.

NASCIMENTO, A. V. de S.; SANTOS, P. A. A.; MUNIZ, A. V. C. da S.; LÉDO, A. da S. The propagation of umbuzeiro (*Spondias tuberosa* Arruda), a native fruit tree of growing importance for the Brazilian semi-arid region. **Forests, Trees and Livelihoods**, v. 35, n. 3, p. 1-25, 2026.

NASEEM, A.; IQBAL, S.; JABEEN, K.; UMAR, A.; ALHARBI, K.; ANTAR, M.; GRĄDECKA-JAKUBOWSKA, K.; GANCARZ, M.; ALI, I. Organic amendments improve

salinity-induced osmotic and oxidative stress tolerance in okra (*Abelmoschus esculentus* (L.) Moench). **BMC Plant Biology**, v. 23, art. 522, 2023.

OLIVEIRA, K. A. de; CALDAS, C. P.; SILVA, W. A. V. da; DANTAS, T. dos S.; MACHADO, J. C. B.; FERREIRA, M. R. A.; SOARES, L. A. L. *Spondias tuberosa*: a promising food species from the Caatinga biome: a comprehensive review of its chemistry, biological and nutritional potential, and applications. **Revista Brasileira de Farmacognosia**, v. 35, p. 922-934, 2025.

OLIVEIRA, M. M. de; GALVÃO, E. K. dos S.; SOUZA, C. L. M. de; BOAVENTURA, V. de J.; OLIVEIRA, L. M. de; CASTRO NETO, M. T. de; PELACANI, C. R. Crescimento e partição de massa seca em plantas jovens de amburana (*Amburana cearensis* (Fr. All.) A. C. Smith) e de umbuzeiro (*Spondias tuberosa* Arr. Cam.). **Ciência Florestal**, v. 29, n. 3, p. 1142–1153, 2019.

PAUSAS, J. G.; LAMONT, B. B.; PAULA, S.; APPEZZATO-DA-GLÓRIA, B.; FIDELIS, A. Unearthing belowground bud banks in fire-prone ecosystems. **New Phytologist**, v. 217, n. 4, p. 1435-1448, 2018.
POORTER, H.; NIKLAS, K. J.; REICH, P. B.; OLEKSYN, J.; POOT, P.; MOMMER, L. Biomass allocation to leaves, stems and roots: meta-analyses of interspecific variation and environmental control. **New Phytologist**, v. 193, n. 1, p. 30-50, 2012.

PORTSMUTH, A.; NIINEMETS, Ü. Interacting controls by light availability and nutrient supply on biomass allocation and growth of *Betula pendula* and *B. pubescens* seedlings. **Forest Ecology and Management**, v. 227, n. 1-2, p. 122-134, 2006.

PRIYA, E.; SARKAR, S.; MAJI, P. K. A review on slow-release fertilizer: nutrient release mechanism and agricultural sustainability. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 12, n. 4, art. 113211, 2024.

PROIETTI, S.; PARADISO, R.; MOSCATELLO, S.; SACCARDO, F.; BATTISTELLI, A. Light intensity affects the assimilation rate and carbohydrates partitioning in spinach grown in a controlled environment. **Plants**, v. 12, n. 4, art. 804, 2023.

QUILLE, P.; KACPRZYK, J.; O'CONNELL, S.; NG, C. K. Y. Reducing fertiliser inputs: plant biostimulants as an emerging strategy to improve nutrient use efficiency. **Discover Sustainability**, v. 6, art. 128, 2025.

RODRIGUES, N. L.; SOUZA, A. L. da C.; OLIVEIRA, C. C. de; CARVALHO, M. G. de; LIMA, B. R. de; AKUTSU, R. de C. C. de A.; LANA, V. S.; RAPOSO, A.; SARAIVA, A.; HAN, H.; CARVALHO, I. M. M. de. Nutritional and biological attributes of *Spondias tuberosa* (umbu) fruit: an integrative review with a systematic approach. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 130, art. 106196, 2024.

ROUBUSTE, R. R.; SALDANHA, C. W.; MISSIO, E. L.; ARAUJO, M. M.; GASPARIN, E.; MALDANER, J. Controlled release fertilizer and container volume improve the seedling morphophysiology of *Lonchocarpus muehlbergianus* Hassl. **Floresta**, v. 55, n. 1, e95139, 2025.

SALES, R. P. de; SILVA, L. C. da; NEVES, A. G. da S.; FAJARDO, C. G.; PINHEIRO, L. G.; VIEIRA, F. de A. Addressing conservation needs: genetic diversity and population

ecology of the endemic tree *Spondias tuberosa* Arruda. **Scientifica**, v. 2024, art. 5023974, 2024.

SCHOTT, K. M.; SNIVELY, A. E. K.; LANDHÄUSSER, S. M.; PINNO, B. D. Nutrient loaded seedlings reduce the need for field fertilization and vegetation management on boreal forest reclamation sites. **New Forests**, v. 47, p. 393-410, 2016.

SHELDEN, M. C.; MUNNS, R. Crop root system plasticity for improved yields in saline soils. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, 2023.

SILVA, P. F. da; MATOS, R. M. de; PEREIRA, M. de O.; BORGES, V. E.; DANTAS NETO, J.; LIMA, V. L. A. de. Chlorophyll content in beet cv. Early Wonder under nitrogen fertilization. **Revista Ceres**, v. 66, n. 6, p. 460-469, 2019.

SILVEIRA, G. V. S.; HOLANDA, A. C.; ALVES, A. R.; SILVA, F. D. S.; OLIVEIRA, J. L. R. Development of *Tabebuia aurea* and *Anadenanthera macrocarpa* under different levels of shading. **Revista Engenharia na Agricultura**, v. 28, p. 357-363, 2020.

SMIDERLE, O. J.; MONTENEGRO, R. A.; SOUZA, A. G.; CHAGAS, E. A.; DIAS, T. J. Container volume and controlled-release fertilizer influence the seedling quality of *Agonandra brasiliensis*. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 50, e62134, 2020.

SMIDERLE, O. J.; SOUZA, A. G.; MONTENEGRO, R. A.; MORIYAMA, T. K. Morphological correlation and quality of *Agonandra brasiliensis* seedlings in substrates and controlled release fertilizer. **Acta Agronómica**, v. 70, n. 3, p. 258-265, 2021a.

SMIDERLE, O. J.; SOUZA, A. G.; MENEGATTI, R. D.; DIAS, T. J.; MONTENEGRO, R. A. Shading and slow release fertiliser affect early growth in seedlings of pau-marfim. **Floresta e Ambiente**, v. 28, n. 1, e20200023, 2021b.

SMIDERLE, O. J.; SOUZA, A. D. G.; MAIA, S. da S. Do doses of controlled-release fertilizer and container volume influence the quality of *Hymenaea courbaril* seedlings? **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 45, 2023.

TANG, L. Nutrient requirements and fertilizer management strategies in plant cultivation. **Plants**, v. 14, 2025.

THE JAMOVI PROJECT. **jamovi**: version 2.6 [computer software]. 2025. Disponível em: https://www.jamovi.org. Acesso em: 5 jul. 2026.

VEJAN, P.; KHADIRAN, T.; ABDULLAH, R.; AHMAD, N. Controlled release fertilizer: a review on developments, applications and potential in agriculture. **Journal of Controlled Release**, v. 339, p. 321-334, 2021.

SANTOS, L. W. dos; COELHO, M. de F. B. Sombreamento e substratos na produção de mudas de *Erythrina velutina* Willd. **Ciência Florestal**, v. 23, n. 4, p. 571-577, 2013.

WANG, P.; FU, C.; WANG, L.; YAN, T.; INSELSBACHER, E. Delayed autumnal leaf senescence following nutrient fertilization results in altered nitrogen resorption. **Tree Physiology**, v. 42, n. 8, p. 1549-1559, 2022.

WANG, W.; LI, B.; ZHAO, X.; ZHANG, S.; LI, J. Light intensity moderates photosynthesis by optimizing photosystem mechanisms under high VPD stress. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 218, 2025.

WANG, Y.; SHI, P.; QIAN, Y.; CHEN, G.; XIE, J.; GUAN, X.; SHI, W.; XIANG, H. Enhancing nitrogen nutrition index estimation in rice using multi-leaf SPAD values and machine learning approaches. **Frontiers in Plant Science**, v. 15, 2024.

WEI, L.; LU, L.; SHANG, Y.; RAN, X.; LIU, Y.; FANG, Y. Can SPAD values and CIE L*a*b* scales predict chlorophyll and carotenoid concentrations in leaves and diagnose the growth potential of trees? An empirical study of four tree species. **Horticulturae**, v. 10, n. 6, art. 548, 2024.

WU, W.; CHEN, L.; LIANG, R.; HUANG, S.; LI, X.; HUANG, B.; LUO, H.; ZHANG, M.; WANG, X.; ZHU, H. The role of light in regulating plant growth, development and sugar metabolism: a review. **Frontiers in Plant Science**, v. 15, 1507628, 2025.

XU, N.; NIU, J.; GUO, Z.; WANG, Q.; CHEN, Z. Nitrogen-phosphorus stoichiometry shapes seedling growth and yield performance of perennial cool-season forage grasses in saline-alkali soil. **BMC Plant Biology**, v. 25, art. 1445, 2025.

XU, X.; ZHANG, X.; NI, W.; LIU, C.; QIN, H.; GUAN, Y.; LIU, J.; FENG, Z.; XING, Y.; TIAN, G.; ZHU, Z.; GE, S.; JIANG, Y. Nitrogen-potassium balance improves leaf photosynthetic capacity by regulating leaf nitrogen allocation in apple. **Horticulture Research**, v. 11, n. 1, uhad253, 2024.

XUE, G.; WU, J.; ZHOU, B.; ZHU, X.; ZENG, J.; MA, Y.; WANG, Y.; JIA, H. Effects of shading on the growth and photosynthetic fluorescence characteristics of *Castanopsis hystrix* seedlings of top community-building species in Southern Subtropical China. **Forests**, v. 14, n. 8, art. 1659, 2023.

YIN, J.; LIN, F.; DE LOMBAERDE, E.; MAO, Z.; LIU, S.; YE, J.; FANG, S.; WANG, X. The effects of light, conspecific density and soil fungi on seedling growth of temperate tree species. **Forest Ecology and Management**, v. 529, 120683, 2023.

ZHANG, H.; ZHAO, Q.; WANG, Z.; WANG, L.; LI, X.; FAN, Z.; ZHANG, Y.; LI, J.; GAO, X.; SHI, J.; CHEN, F. Effects of nitrogen fertilizer on photosynthetic characteristics, biomass, and yield of wheat under different shading conditions. **Agronomy**, v. 11, n. 10, art. 1989, 2021.

ZHANG, K.; ZHU, L.; SUN, H.; ZHANG, Y.; ZHANG, K.; BAI, Z.; WANG, Z.; LIU, L.; LI, C. Research progress and application advances of controlled-release nitrogen fertilizers in crop production. **Agriculture**, v. 16, n. 4, art. 472, 2026.

ZHANG, Y.; WANG, N.; HE, C.; GAO, Z.; CHEN, G. Comparative transcriptome analysis reveals major genes, transcription factors and biosynthetic pathways associated with leaf senescence in rice under different nitrogen application. **BMC Plant Biology**, v. 24, art. 419, 2024.

8. ARTIGO 5
FECHANDO O CICLO DE NUTRIENTES NA CULTURA DE TECIDOS VEGETAIS: REÚSO DE MEIO RESIDUAL COMO FONTE ALTERNATIVA DE NUTRIENTES PARA A PRODUÇÃO DE MUDAS DE *Spondias tuberosa*

RESUMO

Meios de cultura de tecidos vegetais descartados após o cultivo podem conter ainda nutrientes residuais com potencial de uso na produção de mudas, sendo uma alternativa de descarte sustentável, porém ainda pouco explorada sob a perspectiva da economia circular. Este estudo avaliou o efeito da aplicação via solo de resíduo de meio de cultura de tecidos vegetais no crescimento, acúmulo de biomassa e estado nutricional de mudas de umbuzeiro (*Spondias tuberosa* Arruda). Meios de cultura descartados após o cultivo ou contaminação foram autoclavados, homogeneizados e diluídos em água (1:1). As mudas foram então submetidas a diferentes frequências de aplicação do resíduo (0, 7, 14, 21 e 28 dias). Foram avaliadas variáveis de crescimento, acúmulo de biomassa, características radiculares, desenvolvimento do xilopódio, índices de qualidade de mudas e teores de nutrientes na parte aérea e no sistema radicular. A aplicação do resíduo promoveu incrementos significativos em altura, diâmetro do caule, número de folhas, área foliar e acúmulo de massa fresca e seca em relação ao controle. As melhores respostas ocorreram, de modo geral, em frequências intermediárias, com pontos de máxima eficiência técnica estimados principalmente entre 14 e 18 dias para a maioria das variáveis de crescimento e biomassa. O resíduo também influenciou o sistema subterrâneo, com destaque para a massa seca da raiz e o comprimento do xilopódio. A aplicação alterou o estado nutricional das mudas, aumentando os teores de nutrientes como N, P, K, S, Mn e Zn, além de modificar a distribuição de Na, Ca e Mg entre parte aérea e raízes. Os resultados indicam que o resíduo de meio de cultura apresenta potencial como fonte alternativa de nutrientes para a produção de mudas de umbuzeiro, podendo ser uma alternativa para reaproveitar resíduos laboratoriais de meio de cultura na produção de mudas.

Palavras-chave: Caatinga, *Spondias tuberosa* Arruda, fonte alternativa de nutrientes, nutrição vegetal, produção de mudas, resíduo laboratorial.

8.1. Introdução

As técnicas de cultura de tecidos vegetais são amplamente utilizadas na biotecnologia vegetal, apoiando a conservação de germoplasma, a multiplicação rápida e os estudos de espécies com relevância ecológica e socioeconômica (Loyola-Vargas; Ochoa-Alejo, 2018). Entre as técnicas utilizadas, destaca-se a micropropagação, amplamente reconhecida por possibilitar a multiplicação clonal de plantas, livres de patógenos e mantidas sob condições controladas, sendo especialmente útil para espécies que apresentam limitações nos métodos convencionais de propagação (Abdalla *et al*., 2022; Hasnain *et al*., 2022).

Apesar dos avanços proporcionados pela cultura de tecidos vegetais, os elevados custos operacionais ainda constituem uma das principais limitações à adoção mais ampla dessas técnicas (Abdalla *et al*., 2022). Parte desses custos está associada à formulação dos meios de cultura, que demandam sais minerais, vitaminas, fontes de carbono, agentes gelificantes e reguladores de crescimento vegetal. Esses componentes são essenciais para sustentar o crescimento e a morfogênese *in vitro*, mas também contribuem para elevar o custo operacional dos sistemas de cultura de tecidos vegetais (Saad; Elshahed, 2012; Phillips; Garda, 2019).

Entre os meios mais utilizados na cultura de tecidos vegetais, destacam-se formulações como MS (Murashige; Skoog, 1962), Woody Plant Medium-WPM (Lloyd; McCown, 1980) e

Knudson C (Knudson, 1946). O meio MS é amplamente empregado para regeneração de plantas, por apresentar elevada concentração de sais minerais, como os altos níveis de nitrogênio nas formas de nitrato e amônio. O WPM, por sua vez, foi desenvolvido para espécies lenhosas, apresentando composição mineral mais diluída em comparação ao MS. Já o meio Knudson C é frequentemente utilizado no cultivo *in vitro* de orquídeas, sobretudo em processos de germinação assimbiótica (Phillips; Garda, 2019). Essas formulações e outros meios basais amplamente empregados em cultura de tecidos diferem quanto à composição mineral e orgânica, sendo ajustados conforme as exigências da espécie, tipo de explante e o objetivo do cultivo (Hameg *et al*., 2020).

De forma geral, após o cultivo ou a ocorrência de contaminação, esses meios são geralmente descartados, embora possam permanecer com frações residuais de nutrientes minerais, compostos orgânicos e reguladores vegetais. Assim, o descarte após uso único representa não apenas uma fonte adicional de custos laboratoriais, mas também um potencial problema ambiental, em razão da geração de resíduos químicos em sistemas de biotecnologia vegetal.

A busca por alternativas sustentáveis na agricultura e na biotecnologia tem estimulado o desenvolvimento de estratégias alinhadas aos princípios da economia circular, visando reduzir o desperdício e melhorar a eficiência do uso de recursos (Mesa *et al*., 2024; Vandecasteele *et al*., 2020; Velasco-Muñoz *et al*., 2021). Nesse contexto, a reutilização de meios de cultura descartados ainda é pouco estudada, mas pode ser útil para aproveitar nutrientes residuais para produção de mudas em viveiros, reduzindo o descarte de resíduos laboratoriais.

Spondias tuberosa Arruda (Anacardiaceae), conhecida popularmente como umbuzeiro ou imbuzeiro, é uma árvore frutífera endêmica da Caatinga brasileira e possui grande importância ecológica e socioeconômica em regiões semiáridas (Rodrigues *et al*., 2024; Sales *et al*., 2024). Através do consumo *in natura* ou do processamento do seu fruto, o umbu ou imbu, a espécie contribui para a segurança alimentar, geração de renda para pequenos agricultores, além de apresentar adaptação a ambientes com baixa disponibilidade hídrica, devido à presença de xilopódios (Lins Neto *et al*., 2012; Oliveira *et al*., 2025). No entanto, a produção de mudas em larga escala continua sendo um grande obstáculo para programas de conservação e cultivo devido à germinação irregular das sementes, longos períodos juvenis e eficiência limitada dos métodos tradicionais de propagação (Nascimento *et al*., 2026).

A melhoria dos sistemas de produção em viveiro, especialmente por meio do uso de insumos sustentáveis, representa uma estratégia importante para fortalecer a cadeia produtiva de espécies nativas como o umbuzeiro (Ferreira, 2025; Mariotti *et al*., 2023). Nesse contexto, a reutilização de meios de cultura descartados pode representar uma alternativa inovadora para reduzir custos de produção e promover práticas ambientalmente mais sustentáveis.

Até o presente momento, nenhum estudo anterior avaliou a reutilização de meios de cultura de tecidos vegetais descartados como fonte alternativa de nutrientes para a produção de mudas. Dessa forma, este estudo teve como objetivo avaliar os efeitos da aplicação via solo de resíduos de meio de cultura sobre o crescimento, o estado nutricional e o desenvolvimento de mudas de umbuzeiro (*Spondias tuberosa* Arruda).

8.2. Material e Métodos

8.2.1. Material vegetal

Frutos maduros de umbuzeiro foram coletados de árvores matrizes localizadas no município de Graccho Cardoso-SE. Após a coleta, os frutos foram despolpados manualmente e as unidades de dispersão submetidas à secagem à sombra. Em seguida, o material foi encaminhado ao laboratório e armazenado em sacos plásticos tipo zip-lock em temperatura ambiente.

As unidades de dispersão foram então semeadas em bandejas (29,5 × 44 cm) contendo areia lavada como substrato para germinação. Plantas com aproximadamente 45 dias de idade foram utilizadas para montagem do experimento.

8.2.2. Meio de cultura

Os resíduos de meios de cultura utilizados no experimento foram provenientes dos Laboratórios de Cultura de Tecidos Vegetais da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) e do Laboratório de Fisiologia Vegetal da Universidade Federal de Sergipe (UFS). O material foi oriundo do descarte de experimentos finalizados e de meios contaminados.

Após a coleta, os meios foram submetidos à autoclavagem a 121 °C por 30 minutos, visando à esterilização do material. Posteriormente, foram homogeneizados e diluídos na proporção de 1:1 (v:v), adicionando-se 1 L de água para cada litro de meio de cultura, de forma que os meios não retornassem ao estado gelificado. Após a diluição, a solução resultante foi armazenada em recipientes plásticos até sua utilização no experimento.

Nos laboratórios de origem dos resíduos, são utilizados predominantemente meios de cultura MS e WPM comerciais, preparados a partir de formulações prontas para diluição em água, bem como meios preparados a partir de soluções estoque, principalmente MS, WPM e Knudson C. De modo geral, esses meios recebem sacarose como fonte de carbono e podem conter agentes gelificantes, como ágar ou Phytagel, carvão ativado, vitaminas e reguladores de crescimento vegetal, incluindo auxinas, citocininas e giberelinas, conforme a finalidade experimental de origem. A composição de referência dos principais meios e aditivos potencialmente presentes nos resíduos reutilizados é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1. Principais componentes potencialmente presentes nos resíduos de meios de cultura reutilizados no experimento.

Componente/ fonte	MS/ comercial	WPM/ comercial	MS/ solução estoque	WPM/ solução estoque	KNUDSON C/ solução estoque
Macronutrientes (mg/L^{-1})					
NH_4NO_3	1650.0	400.0	1650.0	400.0	—
$(NH_4)_2SO_4$	—	—	—	—	500.0
KNO_3	1900.0	—	1900.0	—	525.0
$CaCl_2$/$CaCl_2 \cdot 2H_2O$	332.2	72.5	440.0	96.0	—
$Ca(NO_3)_2$/$Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$	—	386.0	—	556.0	200
KH_2PO_4	170.0	170.0	170.0	170.0	250
K_2SO_4	—	990.0	—	990.0	—
$MgSO_4$/$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	180.7	180.7	370.0	370.0	250
Micronutrientes (mg/L^{-1})					
H_3BO_3	6.2	6.2	6.2	6.2	—
$MnSO_4$/$MnSO_4 \cdot H_2O$	16.9	22.3	22.3	22.3	7.5
$ZnSO_4$/$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$	8.6	8.6	8.6	8.6	—
KI	0.83	—	0.83	—	—
Na_2MoO_4/$Na_2MoO_4 \cdot 2H_2O$	0.25	0.25	0.25	0.25	—
$CuSO_4$/$CuSO_4 \cdot 5H_2O$	0.025	0.25	0.025	0.25	—
$CoCl_2$/$CoCl_2 \cdot 6H_2O$	0.025	—	0.025	—	—
Ferro					
$FeSO_4 \cdot 7H_2O$	27.8	27.8	27.85	27.8	27.8
Na_2EDTA	37.26	37.3	37.25	37.3	37.3
Compostos orgânicos (mg/L^{-1})					
Mio-inositol	—	—	100.0	100.0	—
Ácido nicotínico	—	—	0.5	0.5	—

Componente/ fonte	MS/ comercial	WPM/ comercial	MS/ solução estoque	WPM/ solução estoque	KNUDSON C/ solução estoque
Piridoxina HCl	—	—	0.5	0.5	—
Tiamina HCl	—	—	0.1	1.0	—
Glicina	—	—	2.0	2.0	—
Outros aditivos (g/L^{-1})					
Sacarose	30	30	30	30	30
Carvão ativado	até 1	até 1	até 1	até 1	até 1
Phytagel	4	4	—	—	—
Ágar	—	—	7	7	7
Fitorreguladores (mg/L^{-1})					
Auxinas (AIB)	até 2	até 2	até 2	até 2	até 2
Citocininas (BAP)	até 2	até 2	até 2	até 2	até 2
Giberelinas (GA_3)	até 1	até 1	até 1	até 1	até 1

Valores expressos em mg L^{-1}. Os meios comerciais MS e WPM correspondem às formulações Sigma-Aldrich© M5524 e M6774, respectivamente. Os meios preparados em laboratório foram baseados em soluções estoque. Sais anidros e hidratados foram agrupados na mesma linha como fontes nutricionais equivalentes. Portanto, os valores expressos em mg L^{-1} não devem ser comparados diretamente sem conversão para o elemento mineral correspondente. A sacarose foi adicionada aos meios na concentração de 30 g L^{-1}. O carvão ativado pode ou não ter sido adicionado, conforme a finalidade experimental do meio de origem, quando utilizado, a concentração foi de 1 g L^{-1}. O Phytagel foi utilizado nos meios comerciais na concentração de 4 g L^{-1}, enquanto o ágar foi utilizado nos meios preparados por soluções estoque na concentração de 7 g L^{-1}. O traço — indica ausência do componente na formulação avaliada.

8.2.3. Delineamento experimental e condução do experimento

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, constituído por cinco tratamentos correspondentes à frequência de aplicação do meio de cultura: (i) controle, sem aplicação; (ii) aplicação a cada 7 dias; (iii) aplicação a cada 14 dias; (iv) aplicação a cada 21 dias; e (v) aplicação a cada 28 dias. Foram utilizadas oito repetições por tratamento, sendo cada unidade experimental composta por uma muda.

As mudas foram mantidas em casa de vegetação sob pleno sol, com proteção apenas pela cobertura da estrutura, durante o período experimental de 90 dias. A irrigação foi realizada três vezes por semana, não sendo efetuada adubação complementar ao longo do experimento.

O cultivo foi realizado em sacos plásticos com dimensões de 15 × 25 cm, contendo aproximadamente 2 kg de areia lavada como substrato, previamente utilizada, por apresentar baixa disponibilidade nutricional e permitir avaliar principalmente o efeito do meio de cultura reutilizado. A aplicação do resíduo de meio de cultura foi realizada via solo, utilizando-se volume equivalente a 50 mL de solução por kg de substrato, correspondendo a 100 mL por unidade experimental em cada aplicação, conforme a frequência estabelecida nos tratamentos.

8.2.4. Avaliações de crescimento e acúmulo de biomassa

As avaliações de crescimento foram realizadas mensalmente ao longo do período experimental de 90 dias, sendo mensuradas a altura da planta (cm), com auxílio de uma régua milimetrada, o diâmetro do caule (mm), com auxílio de um paquímetro digital, e o número de folhas. Ao final do experimento, as plantas foram coletadas e submetidas à avaliação das características morfológicas e biométricas, incluindo comprimento radicular (CR, cm), diâmetro do xilopódio (DX, mm), comprimento do xilopódio (CX, cm), número de xilopódios (NX), massa fresca da parte aérea (MFPA, g), massa fresca do sistema radicular (MFR, g) e massa fresca total (MFT, g). Posteriormente, o material vegetal foi acondicionado em estufa de circulação forçada de ar a 65 °C até a obtenção de peso constante, sendo então determinadas a

massa seca da parte aérea (MSPA, g), a massa seca radicular (MSR, g) e a massa seca total (MST, g).

8.2.5. Determinação da área foliar

A área foliar das mudas foi determinada por meio de análise digital de imagens. Para isso, foram obtidas fotografias de todas as folhas utilizando câmera de smartphone Samsung M51 (64 megapixels), mantendo-se altura, ângulo e condições de iluminação padronizados para todas as imagens. As folhas foram posicionadas sobre fundo branco contendo escala de referência para calibração espacial.

As imagens foram analisadas com o aplicativo Canopeo (Patrignani; Ochsner, 2015), que estima a porcentagem de área verde presente na imagem a partir da classificação automática dos pixels.

A área total fotografada foi previamente determinada por calibração espacial utilizando a escala presente nas imagens, resultando em uma área média de 570 cm² por fotografia. A área foliar (AF) foi então obtida pela conversão da porcentagem de cobertura verde fornecida pelo aplicativo em área real, conforme a equação:

$$AF = \frac{\%AV * 570\ cm^2}{100}$$

onde:
AF = área foliar (cm²);
%AV = valor de área verde estimada pelo Canopeo;
570 cm² = área real correspondente ao campo de visão padronizado da imagem.

8.2.6. Índices morfológicos

A partir das variáveis biométricas obtidas, foram calculados índices morfológicos utilizados na avaliação da qualidade das mudas, incluindo a relação entre massa seca da parte aérea e massa seca radicular (MSPA/MSR), a relação altura/diâmetro do caule (H/D) e o Índice de Qualidade de Dickson (IQD) (Dickson *et al*., 1960), de acordo com a Eq. 1:

$$IDQ = \frac{MST\ (g)}{\frac{H\ (cm)}{D\ (mm)} + \frac{MSPA\ (g)}{MSR\ (g)}}$$

onde:
IQD = Índice de Qualidade de Dickson;
MST = massa seca total;
H = altura;
D = diâmetro do caule
MSPA = massa seca da parte aérea;
MSR = massa seca da raiz.

8.2.7. Análises nutricionais das folhas e raízes

Foram realizadas análises nutricionais da parte aérea e do sistema radicular das mudas ao final do experimento. Após a determinação da massa seca, o material vegetal foi separado em parte aérea e raízes, sendo utilizadas quatro repetições por tratamento, sendo cada repetição composta pela biomassa combinada de duas plantas.

As amostras de parte aérea e raízes foram secas em estufa de circulação forçada de ar a 65 °C até massa constante. Posteriormente, o material seco foi moído em moinho de alta rotação (Marconi®) e submetido às digestões químicas específicas para posterior determinação dos nutrientes minerais, conforme metodologia descrita no Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes da Embrapa (Silva, 2009).

O nitrogênio (N) foi determinado pelo método de Kjeldahl, por destilação–titulação, após digestão sulfúrica. Para os demais nutrientes, as amostras foram submetidas à digestão úmida com HNO_3 + $HClO_4$, na proporção 3:1. O fósforo (P) foi determinado por espectrofotometria pelo método do amarelo-de-vanadato; o enxofre (S), pelo método turbidimétrico; e o boro (B), por espectrofotometria com azometina-H. Os teores de potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), sódio (Na), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn) e zinco (Zn) foram determinados por espectrofotometria de absorção atômica. Os resultados foram expressos em g kg^{-1} para N, P, K, Ca, Mg, S e Na, e em mg kg^{-1} para B, Cu, Fe, Mn e Zn.

8.2.8. Monitoramento das condições ambientais

Durante todo o período experimental de 90 dias, as mudas foram mantidas em casa de vegetação com a temperatura e a umidade relativa do ar monitoradas por um termohigrômetro (ASO, modelo AK172) localizado um metro acima do nível do solo. A temperatura média durante o período experimental foi de 29 ± 4 °C e a umidade relativa média foi de 68%.

8.2.9. Análise estatística

Os dados foram inicialmente submetidos aos testes de normalidade de Shapiro–Wilk e homogeneidade das variâncias de Levene utilizando o software Jamovi versão 2.6 (Projeto Jamovi, 2025). Posteriormente, os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e as médias comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Para as variáveis que apresentaram efeito significativo, realizou-se análise de regressão em função do tempo de aplicação do resíduo de meio de cultura, sendo ajustado o modelo quadrático. O ponto de máxima eficiência técnica (PMET) das variáveis foi estimado a partir das equações de regressão ajustadas, utilizando a expressão $(-b/2a)$. Para essas análises foi utilizado o software Sisvar versão 5.8 (Ferreira, 2019).

8.3. Resultados e Discussão

8.3.1. Crescimento ao longo do tempo

A avaliação do crescimento das mudas de umbuzeiro ao longo do período experimental demonstrou incremento crescente em altura, diâmetro e número de folhas em todos os tratamentos utilizando o resíduo de meio de cultura, com exceção do controle (Figura 1). De maneira geral, as maiores taxas de crescimento foram observadas entre 60 e 90 dias após o transplantio.

Para altura, observou-se tendência de maior crescimento nos tratamentos com maior frequência de aplicação do resíduo, com destaque para os tratamentos 7 e 14 dias, que apresentaram os maiores valores aos 90 dias (Figura 1A). Comportamento semelhante foi observado para o diâmetro do caule, no qual todos os tratamentos contendo resíduo de meio de cultura apresentaram incremento superior ao tratamento controle ao longo do período experimental (Figura 1B). O número de folhas também apresentou aumento crescente durante o cultivo, evidenciando estímulo ao crescimento vegetativo das mudas submetidas aos tratamentos contendo resíduo de meio de cultura (Figura 1C).

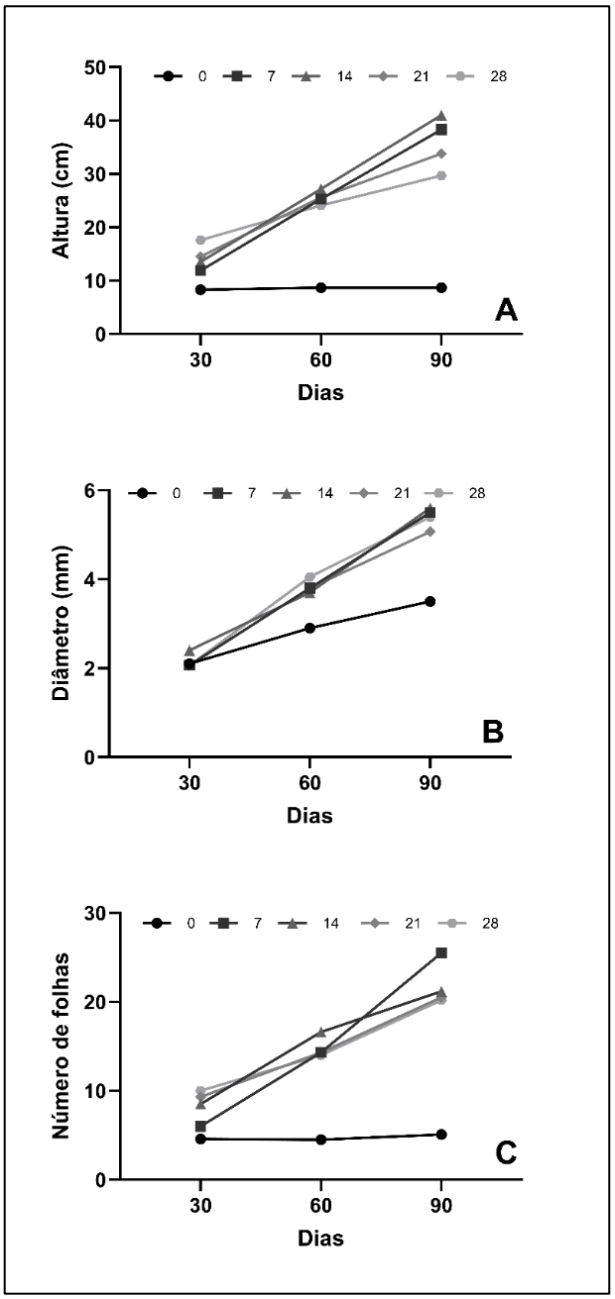


Figura 1. Altura (cm), diâmetro do caule (mm) e número de folhas de mudas de umbuzeiro submetidas a diferentes frequências de aplicação de resíduo de meio de cultura (0, 7, 14, 21 e 28 dias) aos 30, 60 e 90 dias após o transplantio.

8.3.2. Crescimento e área foliar

A frequência de aplicação do resíduo de meio de cultura de tecidos vegetais via solo promoveu alterações significativas na maioria das variáveis morfológicas e de biomassa das mudas. De forma geral, a aplicação mais frequente (a cada 7 dias) e a intermediária (a cada 14 dias) proporcionaram as maiores médias de crescimento, enquanto o aumento do intervalo entre as aplicações (21 e 28 dias) resultou em uma estabilização ou redução no crescimento e desenvolvimento das mudas. Em contraste, as mudas do tratamento controle praticamente não apresentaram crescimento durante o período experimental (Tabela 2).

Tabela 2. Crescimento vegetativo e qualidade de mudas de umbuzeiro submetidas a diferentes tempos de aplicação do resíduo de meio de cultura aos 90 dias.

	Tempo de aplicação (dias)					
Variáveis	**0**	**7**	**14**	**21**	**28**	**CV (%)**
H (cm)	8.7±1.0b	38.3±4.0a	41.0±2.5a	33.8±3.4a	29.7±1.7a	26.1
DC (mm)	3.5±0.2b	5.5±0.3a	5.6±0.3a	5.0±0.2a	5.4±0.1a	16.1
NF	5.1±0.4b	25.5±1.5a	21.2±2.1a	20.5±1.4a	20.2±3.9a	34.4
AF (cm²)	31.2±2.5c	303±44ab	380±29a	296±38ab	203±23b	36.2
MFPA (g)	1.0±0.1b	11.1±1.7a	13.7±1.8a	9.3±1.2a	8.7±1.4a	48.0
MFR (g)	5.7±0.8b	17.5±3.5ab	25.7±4.8a	22.7±4.7a	23.2±4.0a	57.9
MFT (g)	6.8±1.0b	28.7±4.9a	39.4±5.4a	32.0±5.9a	32.0±4.6a	50.2
MSPA (g)	0.3±0.07b	2.1±0.3a	2.5±0.2a	1.9±0.2a	1.8±0.1a	43.2
MSR (g)	0.5±0.08b	1.7±0.6ab	1.8±0.3ab	1.4±0.3ab	2.0±0.3a	36.8
MST (g)	0.8±0.1b	3.8±0.8a	4.3±0.5a	3.4±0.6a	3.8±0.4a	52.0
CR (cm)	29.3±4.3a	25.0±3.0a	25.6±2.3a	25.2±2.4a	23.6±1.9a	33.7
NX	2.2±0.3a	1.6±0.3a	3.0±0.7a	2.3±0.3a	2.7±0.5a	53.6
DX (mm)	15.1±1.2a	20.1±0.9a	20.2±1.7a	19.4±1.8a	19.1±1.9a	22.6
CX (cm)	3.1±0.1b	7.5±1.0ab	9.8±1.3a	11.2±1.6a	10.1±1.3a	40.9
MSPA/MSR	0.7±0.1a	1.9±0.3a	1.7±0.3a	1.9±0.4a	1.0±0.1a	61.0
H/D	2.4±0.2c	6.8±0.5ab	7.3±0.3a	6.5±0.4ab	5.4±0.3b	18.8
IQD	0.27±0.03a	0.48±0.14a	0.50±0.08a	0.42±0.07a	0.59±0.07a	55.8

Os dados representam média ± erro padrão. Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. H = altura da planta; DC = diâmetro do caule; NF = número de folhas; MFPA = massa fresca da parte aérea; MFR = massa fresca da raiz; MFT = massa fresca total; MSPA = massa seca da parte aérea; MSR = massa seca da raiz; MST = massa seca total; AF = área foliar; CR = comprimento radicular; NX = número de xilopódios; DX = diâmetro do xilopódio; CX = comprimento do xilopódio; MSPA/MSR = relação massa seca da parte aérea/massa seca da raiz; H/D = relação altura/diâmetro; IQD = índice de qualidade de Dickson; CV = coeficiente de variação.

Foi observado efeito significativo da frequência de aplicação do resíduo sobre a altura (H), diâmetro do caule (DC) e número de folhas (NF) das mudas. O tratamento controle (sem aplicação) apresentou os menores valores para essas variáveis, diferindo estatisticamente de todas as frequências testadas (7, 14, 21 e 28 dias), as quais não diferiram entre si (Tabela 2).

A altura das mudas variou de 8,7 cm no tratamento controle, para valores entre 29,7 e 41,0 cm nos tratamentos com a aplicação do resíduo, o que representa um incremento superior a 240%. Comportamento semelhante foi observado para o DC, que passou de 3,5 mm para valores entre 5,0 e 5,6 mm, e para o NF, que aumentou de 5,1 para mais de 20 folhas por planta. Para a área foliar (AF), as maiores médias observadas foram na frequência de aplicação a cada 14 dias (380 cm²), diferindo significativamente do controle (31,2 cm²) e do intervalo de 28 dias de aplicação (203 cm²).

Embora o teste de médias tenha demonstrado comportamento semelhante entre os tratamentos com aplicação do resíduo, a análise de regressão permitiu identificar melhor a resposta das variáveis em função da frequência de aplicação (Figura 2). Todas as variáveis

ajustaram-se ao modelo quadrático, indicando incremento inicial seguido por tendência de redução nas maiores frequências avaliadas.

Para altura, o modelo apresentou coeficiente de determinação de $R^2 = 0,86$, estimando o ponto de máxima eficiência técnica (PMET) aos 16,4 dias de aplicação (Figura 2A). O diâmetro do caule ($R^2 = 0,73$) e o número de folhas ($R^2 = 0,68$) apresentaram comportamento semelhante, com os PMET estimados entre 18,4 e 17,3 dias de aplicação, respectivamente (Figura 2 B e C).

Para área foliar, o ajuste quadrático apresentou elevado coeficiente de determinação ($R^2 = 0,94$), indicando máxima expansão foliar próxima a 15,9 dias (Figura 2D). Esse comportamento sugere que frequências intermediárias de aplicação proporcionaram melhor resposta fisiológica das mudas, enquanto aplicações muito frequentes ou mais espaçadas tenderam a reduzir o crescimento vegetativo e a expansão foliar.

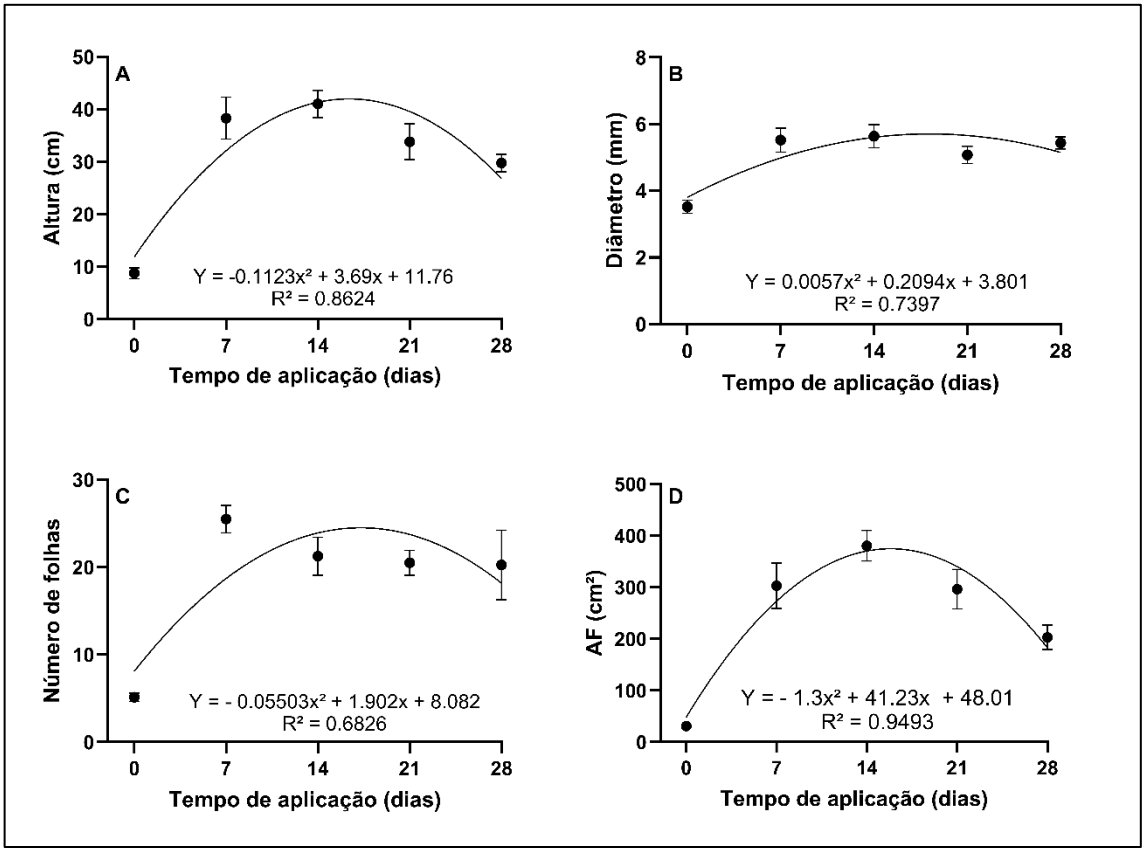


Figura 2. Altura (A), diâmetro do caule (B), número de folhas (C) e área foliar (D) de mudas submetidas a diferentes frequências de aplicação de resíduo de meio de cultura de tecidos vegetais via solo. Os pontos representam as médias observadas e as barras verticais indicam o erro padrão da média (n = 8). As curvas representam os modelos polinomiais quadráticos ajustados, significativos a 5% de probabilidade pelo teste F.

A aplicação do resíduo de meio de cultura favoreceu o crescimento inicial das mudas de umbuzeiro, indicando seu potencial como fonte alternativa de nutrientes (Figura 3). Esse efeito pode estar relacionado à composição mineral dos meios utilizados em cultura de tecidos, uma vez que formulações como MS, WPM e Knudson C apresentam fontes de N, P, K, Ca e Mg, em sais como nitrato de amônio, nitrato de potássio, fosfatos, cloretos, nitratos e sulfatos de cálcio e magnésio (Phillips; Garda, 2019; Saad; Elshahed, 2012). A presença residual desses nutrientes no material descartado pode ter contribuído para os incrementos observados em altura, diâmetro do caule, número de folhas e área foliar, visto que esses elementos atuam em processos essenciais ao crescimento vegetal, como fotossíntese, síntese de proteínas,

metabolismo energético, regulação osmótica e estruturação dos tecidos (Bang *et al*., 2021; Marschner, 2012).

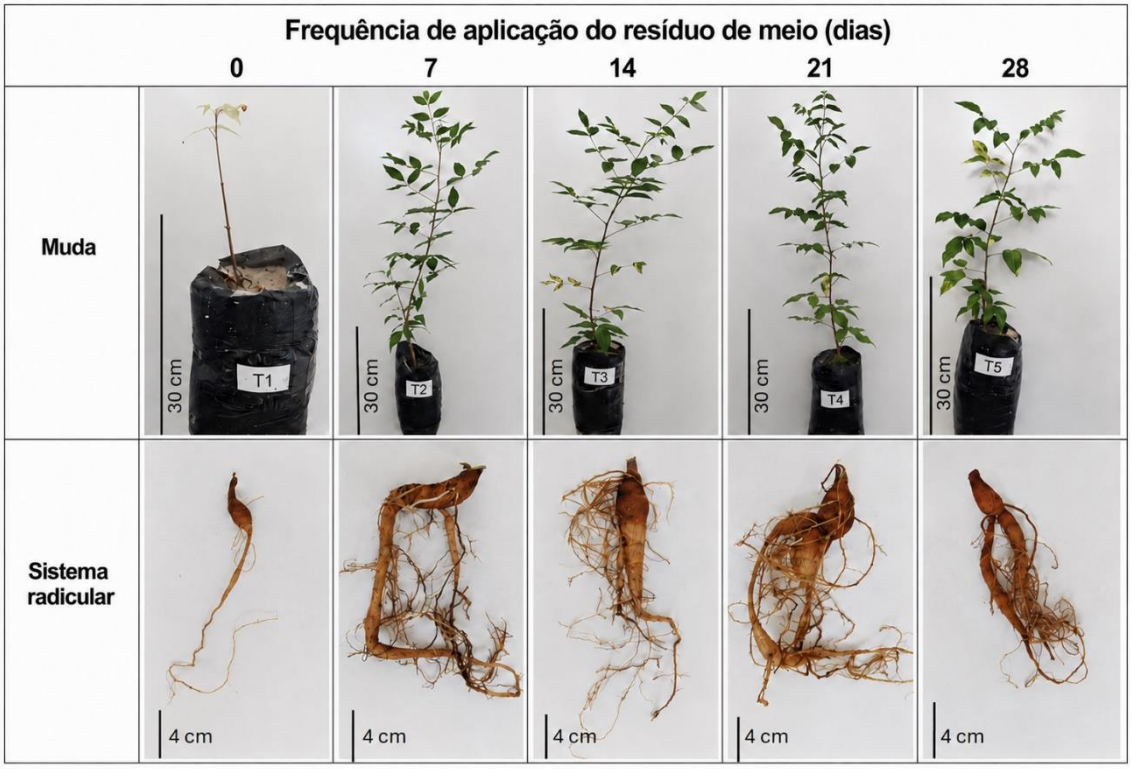


Figura 3. Aspecto visual das mudas e do sistema radicular de umbuzeiro em função da frequência de aplicação do resíduo de meio de cultura. Os tratamentos correspondem a 0, 7, 14, 21 e 28 dias entre aplicações. Barras de escala: 30 cm para as mudas e 4 cm para o sistema radicular. Fonte: Augusto Nascimento.

Os modelos quadráticos indicaram que frequências intermediárias, entre 14 e 18 dias, proporcionaram melhor desempenho das mudas. Esse comportamento sugere maior equilíbrio entre fornecimento de nutrientes e capacidade de absorção pelas plantas, enquanto aplicações muito frequentes podem elevar a concentração de sais no substrato, reduzindo o potencial osmótico e favorecendo desbalanços nutricionais (Atta *et al*., 2023; Balasubramaniam *et al*., 2023). Por outro lado, intervalos mais longos podem reduzir a disponibilidade contínua de nutrientes, limitando o crescimento vegetativo. A maior área foliar observada nas frequências intermediárias também indica melhor expansão da superfície fotossintética, variável diretamente relacionada à interceptação de luz e ao acúmulo de biomassa vegetal (Weraduwage *et al*., 2015).

8.3.3. Acúmulo de biomassa

As variáveis de massa fresca (MFPA, MFR e MFT) e massa seca (MSPA, MSR e MST) seguiram tendência semelhante aos parâmetros de crescimento vegetativo, com o tratamento controle apresentando os menores acúmulos de biomassa em todas as variáveis avaliadas (Tabela 2). Para a massa fresca da parte aérea (MFPA), os tratamentos contendo resíduo não diferiram entre si, porém apresentaram médias superiores ao controle, com destaque para o tratamento aos 14 dias, que apresentou o maior valor (13,7 g). Comportamento semelhante foi observado para a massa fresca total (MFT), na qual os tratamentos com aplicação do resíduo promoveram incremento significativo em relação ao controle, alcançando maior média também aos 14 dias (39,4 g) (Tabela 2).

As variáveis de massa seca da parte aérea (MSPA) e massa seca total (MST) apresentaram comportamento semelhante ao observado para os parâmetros vegetativos. Pelo

teste de médias, todas as frequências de aplicação do resíduo foram superiores ao controle e semelhantes entre si. O tratamento aos 14 dias apresentou os maiores valores para MSPA (2,5 g) e MST (4,3 g), promovendo incremento superior a 730% e 430%, respectivamente, em relação ao tratamento controle (Tabela 2).

A análise de regressão confirmou o comportamento quadrático das variáveis relacionadas ao acúmulo de biomassa (Figura 4). Para MSPA, o modelo apresentou coeficiente de determinação de $R^2 = 0,88$, estimando o PMET próximo a 16,8 dias. Tendência semelhante foi observada para MST, cujo modelo ($R^2 = 0,81$) estimou o ponto máximo próximo a 18,1 dias de aplicação (Figura 4). Esses resultados indicam que frequências intermediárias favoreceram maior acúmulo de biomassa pelas mudas.

Para a massa fresca da raiz (MFR), o maior valor foi observado no tratamento de 14 dias (25,7 g), diferindo do controle (5,7 g), enquanto o tratamento de 7 dias apresentou comportamento intermediário, não diferindo estatisticamente dos demais tratamentos. Já a massa seca da raiz (MSR) apresentou diferença significativa apenas entre o tratamento controle e o tratamento de 28 dias, enquanto os demais tratamentos apresentaram comportamento intermediário (Tabela 2).

O modelo quadrático ajustado para MSR apresentou $R^2 = 0,71$, estimando o PMET próximo a 22,6 dias de aplicação (Figura 4B). Diferentemente das variáveis da parte aérea, o maior acúmulo de biomassa radicular ocorreu em intervalos mais longos entre as aplicações, sugerindo alteração na partição de biomassa das mudas em função da disponibilidade de nutrientes no substrato.

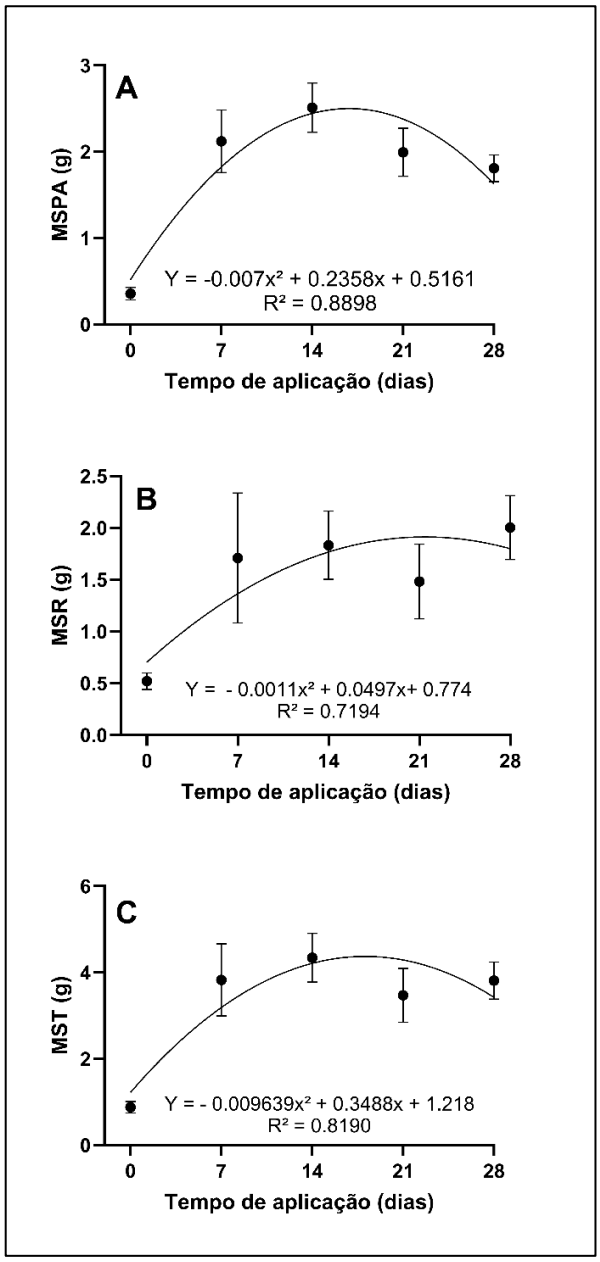


Figura 4. Massa seca da parte aérea (A), massa seca da raiz (B) e massa seca total (C) de mudas submetidas a diferentes frequências de aplicação de resíduo de meio de cultura de tecidos vegetais via solo. Os pontos representam as médias observadas e as barras verticais indicam o erro padrão da média (n = 8). As curvas representam os modelos polinomiais quadráticos ajustados, significativos a 5% de probabilidade pelo teste F.

O acúmulo de massa fresca e seca confirmou que os incrementos observados nas variáveis refletiram em maior produção de biomassa pelas mudas tratadas. A massa seca é uma variável importante por representar o acúmulo efetivo de matéria orgânica nos tecidos vegetais, estando diretamente relacionada à assimilação de carbono e à eficiência de conversão dos recursos disponíveis em crescimento (Hilty *et al*., 2021). Assim, os maiores valores de MSPA e MST nas frequências intermediárias indicam que a aplicação do resíduo favoreceu o alongamento das mudas e a emissão de folhas.

O comportamento quadrático das variáveis de biomassa reforça que a eficiência da aplicação depende da frequência de fornecimento do resíduo. Frequências próximas a 14–18 dias podem ter proporcionado maior equilíbrio entre absorção de nutrientes, expansão da parte aérea e acúmulo de matéria seca. Já o PMET mais tardio observado para MSR sugere resposta diferenciada do sistema radicular, possivelmente relacionada à partição de biomassa entre parte

aérea e raiz. A alocação de biomassa entre folhas, caules e raízes é uma característica plástica e fortemente influenciada pelas condições ambientais e pela disponibilidade de recursos, como água e nutrientes (Freschet; Kichenin; Wardle, 2015; Poorter *et al*., 2012).

8.3.4. Formação de xilopódios e índices de qualidade

O comprimento radicular (CR) e o número de xilopódios (NX) não apresentaram diferenças significativas entre as frequências de aplicação do resíduo (Tabela 2). Esses resultados indicam que a aplicação do resíduo influenciou mais o acúmulo de biomassa radicular do que o alongamento do sistema radicular propriamente dito, refletindo principalmente no aumento da massa seca da raiz (MSR).

Embora o diâmetro do xilopódio (DX) não tenha apresentado diferença significativa entre os tratamentos, o comprimento do xilopódio (CX) foi influenciado positivamente pelas frequências de aplicação do resíduo (Figura 5). Os tratamentos de 14, 21 e 28 dias apresentaram maiores médias em relação ao controle, com destaque para a frequência de 21 dias, que apresentou o maior comprimento (11,2 cm), valor superior a três vezes o observado no tratamento controle (3,1 cm) (Tabela 2).

A análise de regressão para o comprimento do xilopódio demonstrou ajuste quadrático com elevado coeficiente de determinação ($R^2 = 0,99$), estimando o PMET próximo a 21,5 dias de aplicação (Figura 5A). O comportamento observado para essa variável foi semelhante ao verificado para a massa seca da raiz, cujo ponto de máxima resposta ocorreu próximo a 22,6 dias, indicando possível relação entre o desenvolvimento do sistema radicular e o crescimento do xilopódio.

O aumento observado no comprimento do xilopódio sugere que a aplicação do resíduo favoreceu o desenvolvimento estrutural do sistema subterrâneo. Esse comportamento é relevante para o umbuzeiro, uma vez que o xilopódio é uma estrutura adaptativa importante para a sobrevivência da espécie a ambientes sazonalmente secos, atuando como órgão de reserva de água e carboidratos (Leal *et al*., 2024). Assim, o maior desenvolvimento dessa estrutura em frequências intermediárias e mais espaçadas de aplicação sugere que o fornecimento intermitente do resíduo favoreceu o acúmulo de reservas, podendo contribuir para maior rusticidade e sobrevivência das mudas após o transplantio em campo.

A relação massa seca da parte aérea/massa seca da raiz (MSPA/MSR) e o índice de qualidade de Dickson (IQD) não apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos. Por outro lado, a relação altura/diâmetro (H/D) foi influenciada pela frequência de aplicação do resíduo, apresentando menor valor no tratamento controle (2,4) e maior média na frequência de 14 dias (7,3). Na frequência de 28 dias, a relação H/D reduziu significativamente para 5,4 (Tabela 3). A análise de regressão para H/D demonstrou ajuste quadrático com $R^2 = 0,90$, estimando o PMET em 16,3 dias de aplicação (Figura 5B).

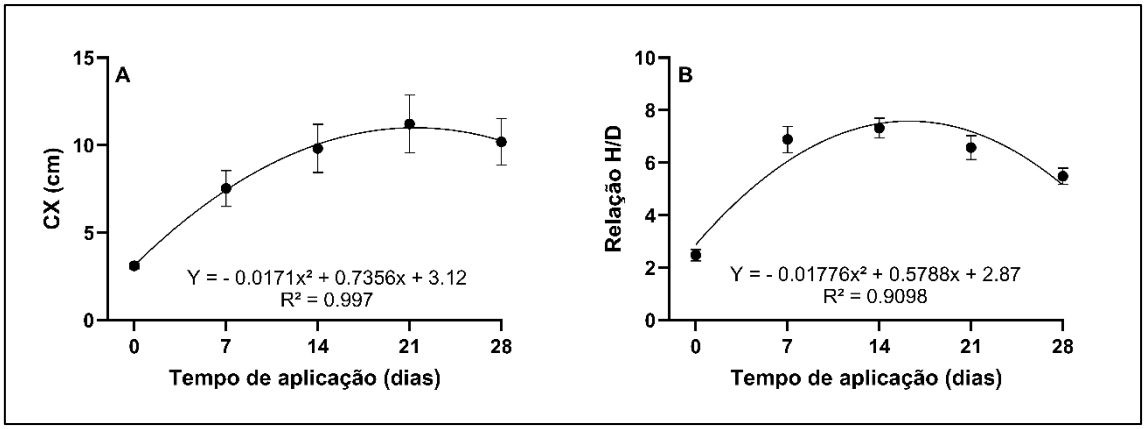


Figura 5. Comprimento do xilopódio (A) e relação H/D de mudas de umbuzeiro submetidas a diferentes frequências de aplicação de resíduo de meio de cultura de tecidos vegetais via solo. Os pontos representam as médias observadas e as barras verticais indicam o erro padrão da

média (n = 8). As curvas representam os modelos polinomiais quadráticos ajustados, significativos a 5% de probabilidade pelo teste F.

A ausência de efeito significativo para a relação MSPA/MSR e para o IQD indica que, embora a aplicação do resíduo tenha promovido maior crescimento e acúmulo de biomassa, não houve alteração expressiva no equilíbrio geral entre parte aérea e sistema radicular, nem na qualidade integrada das mudas. O IQD é considerado um indicador robusto por integrar variáveis de altura, diâmetro e biomassa, permitindo uma avaliação mais ampla da qualidade morfológica das mudas. Além disso, parâmetros como altura, diâmetro do coleto, relação H/D, biomassa aérea, radicular e total são amplamente utilizados na caracterização da qualidade de mudas florestais (Gomes *et al*., 2019; Guimarães *et al*., 2024).

Já a relação H/D foi influenciada diretamente pela frequência de aplicação do resíduo, apresentando maior valor na frequência de 14 dias. Esse resultado reflete o maior estímulo ao crescimento em altura observado nessa frequência, que também esteve associado aos maiores valores de área foliar e biomassa. Embora valores elevados de H/D possam indicar mudas mais alongadas, essa variável deve ser interpretada em conjunto com outros atributos morfológicos, especialmente diâmetro, biomassa e IQD, uma vez que a qualidade de mudas depende da avaliação integrada de diferentes parâmetros morfológicos (Binotto *et al*., 2010; Guimarães *et al*., 2024). Nesse sentido, a ausência de diferença significativa para o IQD sugere que o aumento da relação H/D não comprometeu a qualidade geral das mudas.

8.3.5. Estado nutricional das mudas

A aplicação do resíduo de meio de cultura promoveu alterações significativas nos teores de macro e micronutrientes nas mudas de umbuzeiro, tanto na parte aérea (PA) quanto no sistema radicular (SR) (Tabela 3). Os teores de nitrogênio (N) apresentaram aumento significativo tanto na parte aérea quanto no sistema radicular das mudas submetidas ao resíduo. Na parte aérea, os maiores valores foram observados na frequência de 7 dias (21,8 g/kg), mais que triplicando o teor de N presente no tratamento controle (7,0 g/kg), acompanhando o maior crescimento vegetativo e acúmulo de biomassa observados nas mudas. Enquanto no sistema radicular os maiores teores ocorreram aos 7 (9,7 g/kg) e 14 (8,1 g/kg) dias de aplicação, diferindo significativamente do controle (3,2 g/kg) e do tratamento com aplicação a cada 28 dias (5,6 g/kg) (Tabela 3).

Tabela 3. Teores de macro e micronutrientes em mudas de umbuzeiro submetidas a diferentes frequências de aplicação de resíduo de meio de cultura de tecidos vegetais via solo.

		Tempo de aplicação (dias)					
Nutrientes		**0**	**7**	**14**	**21**	**28**	**CV (%)**
N (g/kg)	PA	7.0±0.8c	21.8±2.3a	18.1±0.6ab	14.4±1.2b	13.6±1.3b	17.9
	SR	3.2±0.1c	9.7±0.7a	8.1±0.5a	7.4±0.2ab	5.6±0.4b	15.4
P (g/kg)	PA	0.6±0.005d	3.0±0.27a	2.2±0.09ab	1.6±0.23bc	1.2±0.07cd	19.8
	SR	0.8±0.07d	3.7±0.3a	2.5±0.1b	2.0±0.2bc	1.1±0.06cd	21.4
K (g/kg)	PA	3.9±0.8c	19.6±1.4a	16.1±1.4ab	13.1±1.6b	11.6±0.5b	16.3
	SR	6.2±0.8b	30.8±3.2a	23.8±2.9a	21.5±1.5a	18.6±2.9a	26.7
Ca (g/kg)	PA	15.1±1.0a	9.5±0.8b	9.3±1.1b	8.8±0.8b	7.7±0.1b	15.1
	SR	2.6±0.04b	3.9±0.2a	2.8±0.1ab	3.1±0.2ab	3.0±0.1ab	13.3
Mg (g/kg)	PA	2.5±0.1a	2.2±0.1ab	2.0±0.1ab	1.9±0.2ab	1.7±0.07b	15.1
	SR	1.6±0.1ab	1.9±0.1a	1.5±0.09ab	1.4±0.1ab	1.3±0.09b	17.7
Na (g/kg)	PA	0.7±0.09a	0.3±0.04b	0.3±0.04b	0.3±0.05b	0.5±0.09ab	32.8
	SR	0.5±0.04b	1.5±0.2a	1.5±0.1a	1.2±0.03a	1.1±0.1a	20.3

S (g/kg)	PA	2.2±0.2a	2.1±0.1a	2.2±0.1a	2.4±0.3a	2.1±0.3a	17.9
	SR	1.2±0.02b	1.8±0.06a	1.9±0.1a	2.1±0.2a	1.6±0.06ab	15.1
B (mg/kg)	PA	-	63,1±7,4a	58,9±2,2a	51,5±2,7a	25,2±0,9b	16,6
	SR	-	35,4±3,9a	30,2±2,1a	34,8±2,7a	36,6±5,4a	22,0
Cu (mg/kg)	PA	5.6±0.7a	2.2±1.0b	2.0±0.4b	3.0±0.4ab	2.2±0.3b	43.6
	SR	5.1±1.1a	1.8±0.3b	3.0±0.3ab	2.1±0.1b	1.7±0.3b	38.3
Fe (mg/kg)	PA	83.9±12a	85.4±4.6a	96.1±8.5a	108±16a	106±9.7a	24.5
	SR	85.5±20a	99.0±14.2a	102.8±18.1a	95.4±10.7a	121.8±20.3a	30.6
Mn (mg/kg)	PA	32.7±2.0b	56.4±6.3a	39.0±2.7b	34.2±3.7b	30.5±1.8b	16.4
	SR	19.2±1.0c	88.2±14.2a	56.3±8.7b	41.0±1.7bc	30.2±2.4bc	28.9
Zn (mg/kg)	PA	9.2±1.7b	16.2±1.6ab	17.4±1.5a	16.6±2.7ab	11.6±0.9ab	23.0
	SR	4.8±0.2c	9.6±1.1ab	10.2±0.7a	11.5±1.0a	5.5±0.7bc	22.0

Os dados representam média ± erro padrão (n = 4). Médias seguidas de mesma letra minúscula na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. PA = Parte Aérea; SR = Sistema Radicular; CV: Coeficiente de Variação. Para B, o tratamento 0 não foi incluído na análise estatística devido à quantidade insuficiente de material vegetal para a determinação analítica.

A análise de regressão demonstrou ajuste quadrático para ambas as variáveis, indicando maiores concentrações de N em frequências intermediárias de aplicação (Figura 6A). Para a parte aérea, o modelo apresentou $R^2 = 0,59$, enquanto no sistema radicular o modelo apresentou $R^2 = 0,72$. Os pontos de máxima eficiência técnica (PMET) foram estimados em 15,0 dias para a parte aérea e 15,2 dias para o sistema radicular. O aumento dos teores de N provavelmente contribuiu para o maior crescimento vegetativo das mudas, considerando a importância desse nutriente na síntese de aminoácidos, proteínas, ácidos nucleicos e clorofila (Bang *et al*., 2021; Marschner, 2012). O elevado acúmulo de N nas plantas pode estar relacionado à presença de NH_4NO_3 e KNO_3 nos meios de cultura utilizados, principalmente no meio MS, que apresenta altas concentrações desses sais (Murashige e Skoog, 1962; Phillips; Garda, 2019).

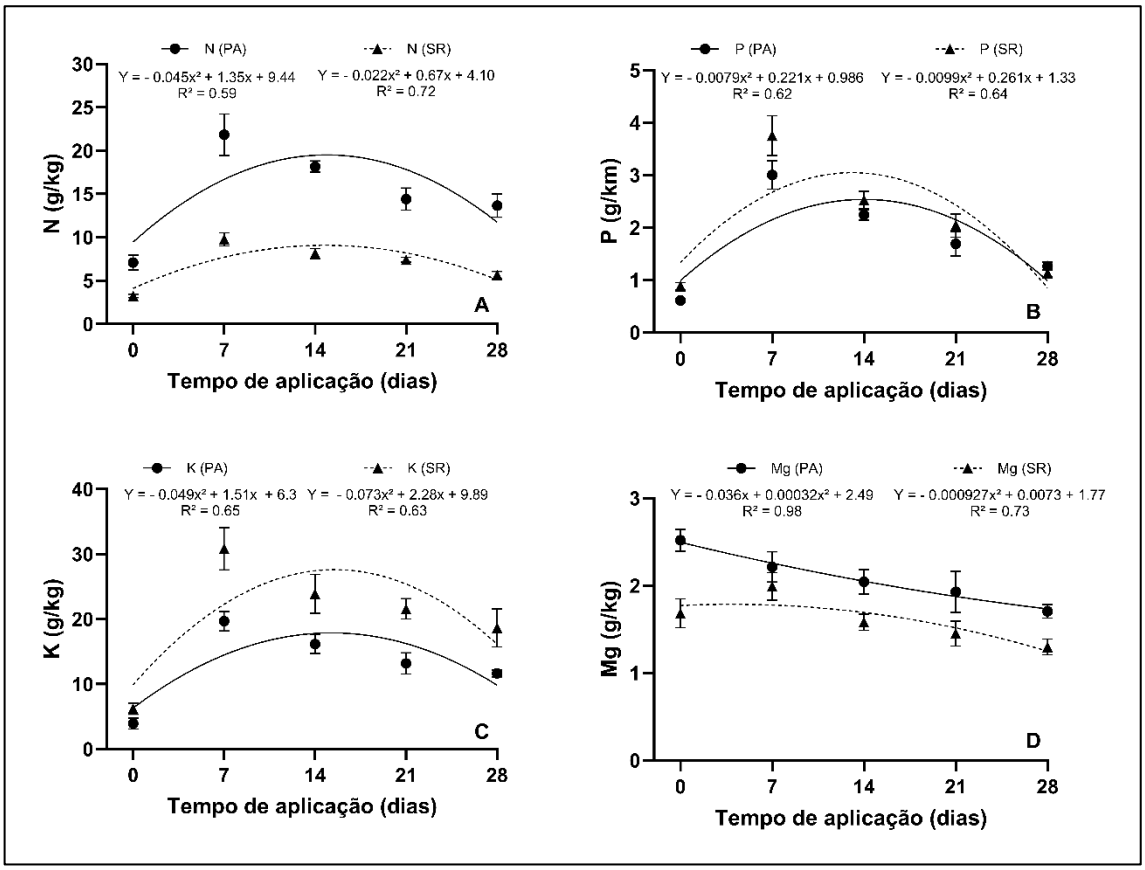


Figura 6. Nitrogênio (A), fósforo (B), potássio (C) e magnésio (D) de mudas de umbuzeiro submetidas a diferentes frequências de aplicação de resíduo de meio de cultura de tecidos vegetais via solo. Os pontos representam as médias observadas e as barras verticais indicam o erro padrão da média (n = 4). As curvas representam os modelos polinomiais quadráticos ajustados, significativos a 5% de probabilidade pelo teste F.

Comportamento semelhante foi observado para fósforo (P) e potássio (K), cujos maiores teores ocorreram nas frequências de 7 e 14 dias (Tabela 3). Para o fósforo na parte aérea, os teores aumentaram de 0,6 g/kg no tratamento controle para 3,0 g/kg na frequência de aplicação aos 7 dias, representando incremento superior a 400% e diferindo significativamente do controle e das frequências de 21 e 28 dias. No sistema radicular, o teor de P aumentou de 0,8 para 3,7 g kg^{-1} aos 7 dias, valor aproximadamente 4,5 vezes superior ao observado no controle. Para o potássio, o maior teor na parte aérea foi observado aos 7 dias de aplicação (19,6 g kg^{-1}), diferindo significativamente do controle (3,9 g/kg) e das frequências de 21 e 28 dias. Esse incremento correspondeu a aumento superior a 400% em relação às mudas não tratadas. No sistema radicular, o K apresentou acúmulo ainda mais expressivo, atingindo 30,8 g/kg aos 7 dias, aproximadamente cinco vezes superior ao controle (6,2 g/kg). Apesar das frequências de 14, 21 e 28 dias não diferirem estatisticamente da aplicação semanal, todas apresentaram valores superiores ao tratamento controle.

Para o P, os modelos quadráticos ajustados para parte aérea (R^2 = 0,62) e sistema radicular (R^2 = 0,64) demonstraram maiores concentrações do nutriente em frequências intermediárias de aplicação, com PMET estimado em 14,0 dias na parte aérea e 13,2 dias no sistema radicular (Figura 6B). Para o K, os modelos na parte aérea (R^2 = 0,65) e no sistema radicular (R^2 = 0,63) apresentaram tendência semelhante, com PMETs estimados em 15,4 e 15,6 dias, respectivamente (Figura 6C).

O aumento dos teores de P e K pode ter contribuído para o maior crescimento das mudas, uma vez que esses nutrientes participam de processos essenciais ao metabolismo vegetal. O P está diretamente envolvido na transferência de energia, na composição de ácidos nucleicos e fosfolipídios e na regulação metabólica, enquanto o K atua principalmente na regulação

osmótica, ativação enzimática, manutenção do turgor celular e controle estomático (Marschner, 2012; Bang *et al*., 2021). A maior disponibilidade desses nutrientes no substrato pode estar relacionada à composição dos meios de cultura utilizados, especialmente MS e WPM, que apresentam fontes minerais de P e K, como KNO_3, KH_2PO_4 e K_2SO_4 em suas formulações (Pasternak; Steinmacher, 2024; Phillips; Garda, 2019).

Diferentemente de N, P e K, os teores de magnésio (Mg) apresentaram tendência de redução nas mudas submetidas ao resíduo (Tabela 3). Na parte aérea, o maior teor foi observado no controle (2,5 g/kg), diferindo significativamente da frequência de 28 dias (1,7 g/kg). No sistema radicular, o maior valor ocorreu aos 7 dias (1,9 g/kg), diferindo da frequência de 28 dias (1,3 g/kg). Os modelos de regressão indicaram tendência de redução das concentrações de Mg com o aumento do intervalo de aplicação do resíduo (Figura 6D). Esse comportamento pode estar associado, em parte, ao efeito de diluição, no qual o rápido incremento da biomassa reduz a concentração de determinados nutrientes nos tecidos vegetais (Jarrell; Beverly, 1981; Kaspari; Welti, 2024). Além disso, os elevados teores de K observados nas mudas tratadas podem ter contribuído para reduzir a absorção e/ou o transporte de Mg, uma vez que a interação antagônica entre K e Mg é amplamente reconhecida na nutrição vegetal (Dölger; Pitann; Mühling, 2024; Xie *et al*., 2021).

Assim como o Mg, os teores de cálcio (Ca) apresentaram tendência de redução na parte aérea das mudas submetidas ao resíduo (Tabela 3). O maior teor foi observado no tratamento controle (15,1 g/kg), diferindo significativamente de todas as frequências de aplicação do resíduo, nas quais os valores variaram entre 7,7 e 9,5 g/kg. No sistema radicular, o maior teor ocorreu aos 7 dias de aplicação (3,9 g/kg), diferindo significativamente do controle (2,6 g/kg), enquanto os demais tratamentos apresentaram comportamento intermediário. A análise de regressão indicou tendência de redução das concentrações de Ca na parte aérea com o aumento da frequência de aplicação do resíduo (Figura 7B).

A redução dos teores de Ca na parte aérea das mudas tratadas, mesmo com a presença desse nutriente nos meios de cultura, pode estar relacionada ao rápido crescimento vegetativo promovido pela aplicação do resíduo. O aumento expressivo da biomassa pode ter diluído a concentração de Ca nos tecidos, comportamento conhecido como efeito de diluição, no qual a concentração de nutrientes diminui à medida que a matéria seca aumenta, sem necessariamente indicar menor absorção total do nutriente (Jarrell; Beverly, 1981).

O maior teor de Ca no sistema radicular aos 7 dias sugere que parte do nutriente disponibilizado pelo resíduo pode ter se acumulado preferencialmente nas raízes. Esse comportamento pode estar associado ao padrão de transporte do Ca na planta, uma vez que esse nutriente é translocado predominantemente pelo xilema e apresenta baixa mobilidade no floema e não pode ser redistribuído eficientemente por longas distâncias até regiões com deficiência (Tang; Luan, 2017; Wdowiak; Podgórska; Szal, 2024; White; Broadley, 2003).

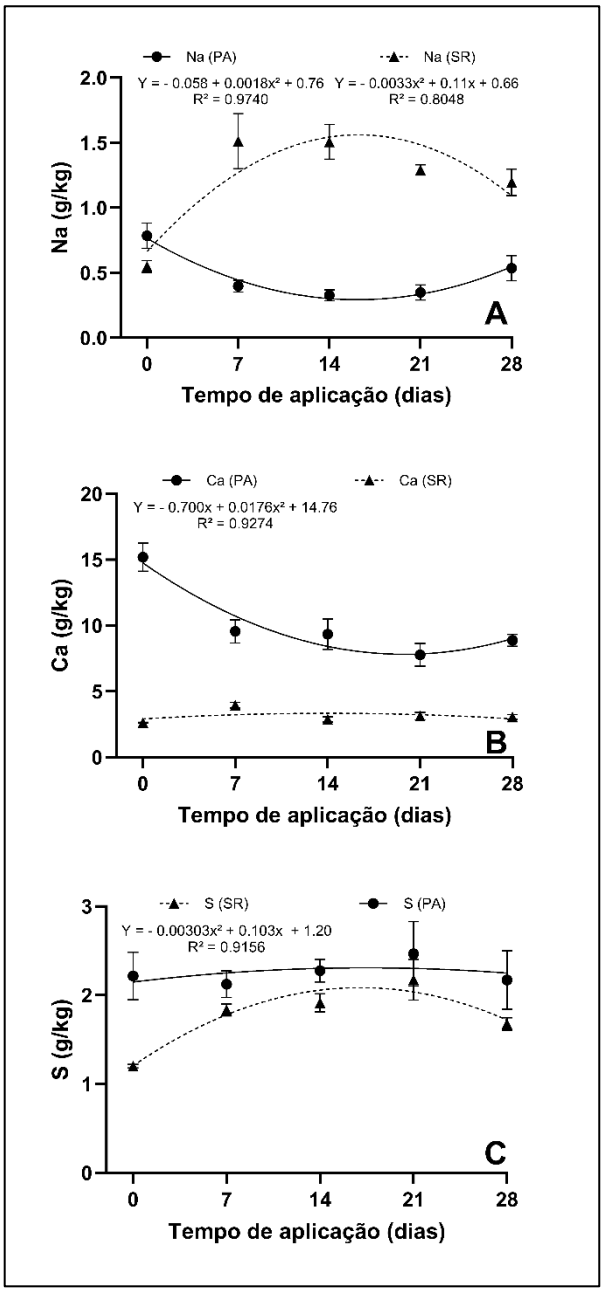


Figura 7. Sódio (A), cálcio (B) e enxofre (C) de mudas de umbuzeiro submetidas a diferentes frequências de aplicação de resíduo de meio de cultura de tecidos vegetais via solo. Os pontos representam as médias observadas e as barras verticais indicam o erro padrão da média (n = 4). As curvas representam os modelos polinomiais quadráticos ajustados, significativos a 5% de probabilidade pelo teste F.

Os teores de sódio (Na) apresentaram comportamento distinto entre parte aérea e sistema radicular das mudas (Tabela 3). Na parte aérea, os teores reduziram de 0,7 g/kg no tratamento controle para 0,3 g/kg nas frequências de 7, 14 e 21 dias, diferindo significativamente do controle. No sistema radicular, ocorreu comportamento oposto, com aumento dos teores de 0,5 g/kg no controle para valores entre 1,1 e 1,5 g/kg nos tratamentos com aplicação do resíduo, todos superiores ao controle.

Os modelos de regressão indicaram tendência quadrática tanto para a parte aérea (R^2 = 0,97) quanto para o sistema radicular (R^2 = 0,80) (Figura 7A). Esse comportamento sugere retenção preferencial de Na nas raízes, reduzindo sua translocação para a parte aérea e minimizando possíveis efeitos tóxicos às folhas. Tanto para Na como também para Ca e Mg na

parte aérea, os modelos ajustados indicaram tendência de redução ou ponto mínimo, não sendo interpretados como PMET de acúmulo nutricional.

O comportamento contrastante dos teores de Na entre parte aérea e sistema radicular sugere retenção preferencial desse elemento nas raízes, reduzindo sua translocação para a parte aérea. Esse padrão pode representar uma resposta fisiológica importante, pois a exclusão de Na das folhas e o controle de seu transporte de longa distância são mecanismos associados à redução de efeitos tóxicos em tecidos fotossintéticos e à tolerância das plantas à salinidade (Almeida *et al*., 2017; Tester, 2003; Wu, 2018). Assim, embora os tratamentos com resíduo tenham aumentado os teores de Na nas raízes, não houve acúmulo proporcional na parte aérea, indicando possível limitação da translocação desse elemento.

O enxofre (S) não apresentou diferenças significativas na parte aérea das mudas (Tabela 3). Entretanto, no sistema radicular houve ajuste quadrático com $R^2 = 0,91$, indicando maiores concentrações do nutriente em frequências intermediárias de aplicação. Para o enxofre no sistema radicular, o modelo quadrático estimou PMET aos 17,0 dias de aplicação, indicando maior acúmulo desse nutriente em frequências intermediárias (Figura 7C). O aumento dos teores de S nas raízes pode estar associado à presença de sulfatos nos meios de cultura, especialmente $MgSO_4$, K_2SO_4, $MnSO_4$ e $ZnSO_4$, presentes nas formulações MS e WPM (Murashige; Skoog, 1962; Lloyd; McCown, 1980). O S participa da composição de aminoácidos sulfurados, proteínas, coenzimas e compostos relacionados ao metabolismo antioxidativo e às respostas ao estresse (Davidian; Kopriva, 2010; Kopriva; Malagoli; Takahashi, 2019; Singh *et al*., 2025).

Os teores de cobre (Cu) apresentaram redução nas mudas submetidas ao resíduo de meio de cultura em relação ao tratamento controle (Tabela 3). Na parte aérea, o maior teor foi observado no controle (5,6 mg/kg), diferindo significativamente das frequências de 7, 14 e 28 dias, cujos valores variaram entre 2,0 e 2,2 mg/kg. No sistema radicular, comportamento semelhante foi observado, com o maior teor registrado no controle (5,1 mg/kg), diferindo significativamente das frequências de 7, 21 e 28 dias. Esse comportamento pode estar associado ao efeito de diluição provocado pelo maior acúmulo de biomassa nas mudas tratadas. Os modelos de regressão para Cu indicaram tendência de redução das concentrações do nutriente tanto na parte aérea quanto no sistema radicular, não sendo observados PMETs relacionados ao acúmulo de Cu nos tecidos vegetais (Figura 8A).

A redução dos teores de Cu nas mudas tratadas, tanto na parte aérea quanto no sistema radicular, ocorreu simultaneamente ao maior crescimento e acúmulo de biomassa das plantas, o que indica possível efeito de diluição nas concentrações desse micronutriente (Jarrell; Beverly, 1981). Mesmo com menores teores de Cu, as mudas submetidas ao resíduo apresentaram melhor desempenho vegetativo, sugerindo que as concentrações observadas foram suficientes para sustentar o crescimento inicial. O Cu é requerido em baixas concentrações pelas plantas e atua em processos essenciais, como transporte de elétrons, respiração, fotossíntese e metabolismo antioxidativo (Printz *et al*., 2016; Xu *et al*., 2024).

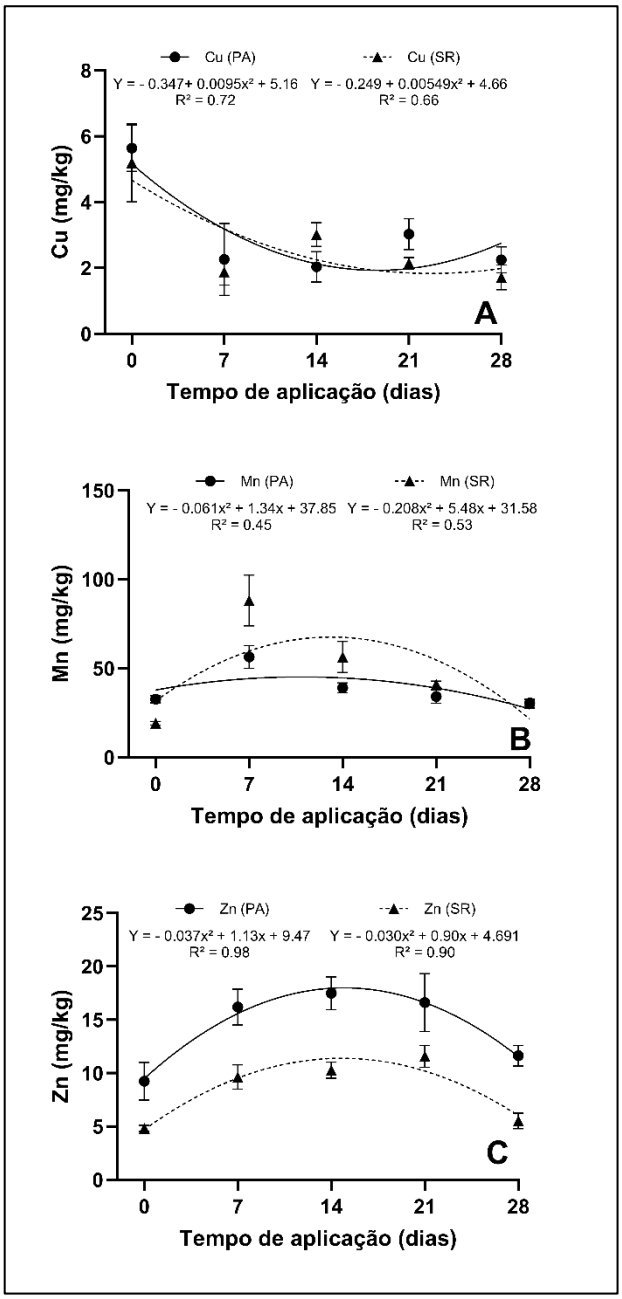


Figura 8. Cobre (A), manganês (B) e zinco (C) de mudas de umbuzeiro submetidas a diferentes frequências de aplicação de resíduo de meio de cultura de tecidos vegetais via solo. Os pontos representam as médias observadas e as barras verticais indicam o erro padrão da média (n = 4). As curvas representam os modelos polinomiais quadráticos ajustados, significativos a 5% de probabilidade pelo teste F.

Os teores de manganês (Mn) foram influenciados pela aplicação do resíduo de meio de cultura, principalmente no sistema radicular das mudas (Tabela 3). Na parte aérea, o maior teor foi observado aos 7 dias de aplicação (56,4 mg/kg), representando incremento superior a 70% em relação ao controle (32,7 mg/kg). No sistema radicular, o acúmulo foi ainda mais expressivo, atingindo 88,2 mg/kg aos 7 dias, valor aproximadamente 4,6 vezes superior ao controle (19,2 mg/kg).

A análise de regressão demonstrou ajuste quadrático para Mn tanto na parte aérea (R^2 = 0,45) quanto no sistema radicular (R^2 = 0,53), com PMETs estimados próximos a 11,0 e 13,2 dias, respectivamente (Figura 8B). O aumento dos teores de Mn nas mudas tratadas, especialmente no sistema radicular, pode estar relacionado à presença de $MnSO_4$ nas formulações dos meios de cultura utilizados, indicando que parte desse micronutriente

permaneceu disponível no resíduo e foi absorvida pelas plantas. O Mn é essencial à fotossíntese, particularmente no complexo de evolução de oxigênio do fotossistema II, além de atuar na ativação enzimática e no metabolismo antioxidativo (Alejandro *et al*., 2020; Millaleo *et al*., 2010). Embora os modelos tenham indicado resposta quadrática, os coeficientes de determinação moderados sugerem que os PMETs estimados para Mn devem ser interpretados apenas como tendência de acúmulo, e não como frequência ótima de aplicação para esse nutriente.

O ferro (Fe) não foi influenciado estatisticamente pelas frequências de aplicação em nenhuma das frações ($p > 0,05$) (Tabela 4). Por outro lado, os teores de zinco (Zn) aumentaram significativamente nas mudas submetidas ao resíduo, principalmente entre as frequências de 7 e 21 dias (Tabela 3). Na parte aérea, o maior teor foi observado aos 14 dias de aplicação (17,4 mg/kg), aproximadamente 89% superior ao controle (9,2 mg/kg). No sistema radicular, os maiores valores ocorreram aos 14 e 21 dias, atingindo 10,2 e 11,5 mg/kg, respectivamente, mais que o dobro do observado no tratamento controle (4,8 mg/kg).

A análise de regressão demonstrou ajuste quadrático para Zn tanto na parte aérea quanto no sistema radicular, com elevados coeficientes de determinação ($R^2 = 0,98$ e $R^2 = 0,90$, respectivamente) (Figura 8C). Os PMETs foram estimados em aproximadamente 15,2 dias para a parte aérea e 15,0 dias para o sistema radicular, coincidindo com os maiores incrementos em crescimento vegetativo e área foliar observados nas mudas.

O aumento dos teores de Zn pode estar relacionado à presença de $ZnSO_4$ nos meios MS e WPM, contribuindo para maior atividade metabólica e crescimento das plantas. Os maiores teores de Zn observados próximos aos 15 dias coincidiram com a faixa de melhor desempenho das mudas para altura e área foliar, sugerindo uma possível associação entre a disponibilidade desse micronutriente e o crescimento vegetativo. O Zn atua como componente estrutural e cofator de diversas enzimas e proteínas, participando de processos relacionados à síntese proteica, estabilidade de membranas, metabolismo antioxidativo e regulação do crescimento vegetal (Hamzah Saleem *et al*., 2022; Zeng *et al*., 2021). Além disso, esse micronutriente está relacionado ao metabolismo de auxinas, uma vez que sua deficiência pode comprometer a síntese de triptofano, aminoácido precursor do ácido indolacético (AIA), hormônio associado ao alongamento celular e ao desenvolvimento da parte aérea (Gao *et al*., 2024; Jalal *et al*., 2024).

8.4. Conclusão

A aplicação via solo do resíduo de meio de cultura de tecidos vegetais favoreceu o crescimento, o acúmulo de biomassa e o estado nutricional de mudas de umbuzeiro. As melhores respostas ocorreram, de modo geral, em frequências intermediárias de aplicação, com pontos de máxima eficiência técnica estimados principalmente entre 14 e 18 dias para a maioria das variáveis de crescimento e biomassa. A aplicação do resíduo também alterou os teores de nutrientes nas mudas, com destaque para o aumento de N, P, K, S, Mn e Zn, além de mudanças na distribuição de Na, Ca e Mg entre parte aérea e sistema radicular. Assim, o meio de cultura descartado apresenta potencial como fonte alternativa de nutrientes para a produção de mudas de umbuzeiro, representando uma estratégia promissora de reutilização de resíduos laboratoriais em uma perspectiva de economia circular.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Os autores agradecem a James Cardoso, Vitor Emanuel, Etelvan Nascimento, Maria Iracema e Luciano Souza pelo auxílio na coleta dos frutos; ao técnico Inácio Roque, do Laboratório de Cultura de Tecidos Vegetais da Embrapa, pelo apoio na coleta dos meios de cultura; aos analistas Robson Dantas

e Daniel de Oliveira, dos Laboratórios de Nutrição Vegetal e Animal da Embrapa, respectivamente, pelo auxílio nas análises nutricionais; ao técnico João dos Santos, da Universidade Federal de Sergipe, pelo apoio na condução do experimento; e às alunas Mara Lúcia e Graziela Andrade pelo auxílio na tabulação dos dados.

8.5. Referências Bibliográficas

ABDALLA, N.; EL-RAMADY, H.; SELIEM, M. K.; EL-MAHROUK, M. E.; TAHA, N.; BAYOUMI, Y.; SHALABY, T. A.; DOBRÁNSZKI, J. An Academic and Technical Overview on Plant Micropropagation Challenges. **Horticulturae**, v. 8, n. 8, p. 677, 25 jul. 2022.

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

ALMEIDA, D. M.; OLIVEIRA, M. M.; SAIBO, N. J. M. Regulation of Na+ and K+ homeostasis in plants: towards improved salt stress tolerance in crop plants. **Genetics and Molecular Biology**, v. 40, n. 1 suppl 1, p. 326–345, 27 mar. 2017.

ATTA, K.; MONDAL, S.; GORAI, S.; SINGH, A. P.; KUMARI, A.; GHOSH, T.; ROY, A.; HEMBRAM, S.; GAIKWAD, D. J.; MONDAL, S.; BHATTACHARYA, S.; JHA, U. C.; JESPERSEN, D. Impacts of salinity stress on crop plants: improving salt tolerance through genetic and molecular dissection. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, art. 1241736, 2023.

BALASUBRAMANIAM, T.; SHEN, G.; ESMAEILI, N.; ZHANG, H. Plants' response mechanisms to salinity stress. **Plants**, v. 12, n. 12, art. 2253, 2023.

BANG, T. C. de; HUSTED, S.; LAURSEN, K. H.; PERSSON, D. P.; SCHJOERRING, J. K. The molecular–physiological functions of mineral macronutrients and their consequences for deficiency symptoms in plants. **New Phytologist**, v. 229, n. 5, p. 2446–2469, 2021.

BINOTTO, A. F.; LÚCIO, A. D. C.; LOPES, S. J. Correlations between growth variables and the Dickson quality index in forest seedlings. **CERNE**, v. 16, n. 4, p. 457–464, dez. 2010.

DAVIDIAN, J.-C.; KOPRIVA, S. Regulation of Sulfate Uptake and Assimilation—the Same or Not the Same? **Molecular Plant**, v. 3, n. 2, p. 314–325, 2010.

DÖLGER, J. L.; PITANN, B.; MÜHLING, K. H. Potassium induced suppression of magnesium uptake and translocation is limited in oat (*Avena sativa* L.). **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 187, n. 4, p. 454–458, 11 ago. 2024.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer analysis system to fixed effects split plot type designs. **Revista Brasileira de Biometria**, v. 37, n. 4, p. 529–535, 20 dez. 2019.

FERREIRA, T. C. A cadeia produtiva do umbu: entre o assistencialismo e a autonomia. **Ethnoscientia – Brazilian Journal of Ethnobiology and Ethnoecology**, v. 10, n. 2, p. 47, 2025.

FRESCHET, G. T.; KICHENIN, E.; WARDLE, D. A. Explaining within-community variation in plant biomass allocation: a balance between organ biomass and morphology above vs below ground? **Journal of Vegetation Science**, v. 26, n. 3, p. 431–440, 14 maio 2015.

GAO, J.; ZHUANG, S.; ZHANG, W. Advances in plant auxin biology: synthesis, metabolism, signaling, interaction with other hormones, and roles under abiotic stress. **Plants**, v. 13, n. 17, art. 2523, 2024.

GOMES, S. H. M.; GONÇALVES, F. B.; FERREIRA, R. A.; PEREIRA, F. R. M.; RIBEIRO, M. M. de J. Avaliação dos parâmetros morfológicos da qualidade de mudas de *Paubrasilia echinata* (pau-brasil) em viveiro florestal. **Scientia Plena**, v. 15, n. 1, 27 fev. 2019.

GUIMARÃES, Z.; SILVA, D. C. da; FERREIRA, M. Seedling quality and short-term field performance of three Amazonian forest species as affected by site conditions. **iForest - Biogeosciences and Forestry**, v. 17, n. 2, p. 80–89, 30 abr. 2024.

HAMEG, R.; ARTETA, T. A.; LANDIN, M.; GALLEGO, P. P.; BARREAL, M. E. Modeling and Optimizing Culture Medium Mineral Composition for in vitro Propagation of Actinidia arguta. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, 23 dez. 2020.

HAMZAH SALEEM, M.; USMAN, K.; RIZWAN, M.; AL JABRI, H.; ALSAFRAN, M. Functions and strategies for enhancing zinc availability in plants for sustainable agriculture. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, art. 1033092, 2022.

HASNAIN, A.; NAQVI, S. A. H.; AYESHA, S. I.; KHALID, F.; ELLAHI, M.; IQBAL, S.; HASSAN, M. Z.; ABBAS, A.; ADAMSKI, R.; MARKOWSKA, D.; BAAZEEM, A.; MUSTAFA, G.; MOUSTAFA, M.; HASAN, M. E.; ABDELHAMID, M. M. A. Plants *in vitro* propagation with its applications in food, pharmaceuticals and cosmetic industries: current scenario and future approaches. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, art. 1009395, 2022.

HILTY, J.; MULLER, B.; PANTIN, F.; LEUZINGER, S. Plant growth: the what, the how, and the why. **New Phytologist**, v. 232, p. 25–41, 2021.

JALAL, A.; FURLANI JÚNIOR, E.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M. Interaction of zinc mineral nutrition and plant growth-promoting bacteria in tropical agricultural systems: a review. **Plants**, v. 13, n. 5, art. 571, 2024.

JARRELL, W. M.; BEVERLY, R. B. The dilution effect in plant nutrition studies. In: BRADY, N. C. (ed.). **Advances in Agronomy**. [S. l.]: Academic Press, 1981. v. 34, p. 197–224.

KASPARI, M.; WELTI, E. A. R. Nutrient dilution and the future of herbivore populations. **Trends in Ecology & Evolution**, v. 39, n. 9, p. 809–820, 1 set. 2024.

KOPRIVA, S.; MALAGOLI, M.; TAKAHASHI, H. Sulfur nutrition: Impacts on plant development, metabolism, and stress responses. **Journal of Experimental Botany**, v. 70, n. 16, p. 4069–4073, 19 ago. 2019.

LEAL, A. S.; FIDELIS, A.; ARAUJO, M. A. de; COZIN, B. B.; MARTINS, A. R. Belowground systems in tropical savanna: Fabaceae morphoanatomical traits and their relation to fire. **Plant Biology**, v. 26, n. 7, p. 1118–1130, 16 dez. 2024.

LINS NETO, E. M. de F.; PERONI, N.; MARANHÃO, C. M. C.; MACIEL, M. I. S.; ALBUQUERQUE, U. P. de. Analysis of umbu (*Spondias tuberosa* Arruda (Anacardiaceae)) in different landscape management regimes. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 184, n. 7, p. 4489–4499, 20 jul. 2012.

LLOYD, G.; McCOWN, B. Commercially-feasible micropropagation of mountain laurel, *Kalmia latifolia*, by use of shoot-tip culture. **Combined Proceedings, International Plant Propagators' Society**, v. 30, p. 421-427, 1980.

LOYOLA-VARGAS, V. M.; OCHOA-ALEJO, N. An introduction to plant tissue culture: advances and perspectives. In: LOYOLA-VARGAS, V. M.; OCHOA-ALEJO, N. (ed.). **Plant Cell Culture Protocols**. New York: Springer New York, 2018. p. 3–13.

MARIOTTI, B.; OLIET, J. A.; ANDIVIA, E.; TSAKALDIMI, M.; VILLAR-SALVADOR, P.; IVETIĆ, V.; MONTAGNOLI, A.; KERKEZ JANKOVIĆ, I.; BILIR, N.; BOHLENIUS, H.; CVJETKOVIĆ, B.; DŪMIŅŠ, K.; HEISKANEN, J.; HINKOV, G.; FLØISTAD, I. S.; COCOZZA, C. A global review on innovative, sustainable, and effective materials composing growing media for forest seedling production. **Current Forestry Reports**, v. 9, p. 413–428, 2023.

MARSCHNER, H. **Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants**. San Diego: Elsevier, 2012.

MESA, J. A.; SIERRA-FONTALVO, L.; ORTEGON, K.; GONZALEZ-QUIROGA, A. Advancing circular bioeconomy: a critical review and assessment of indicators. **Sustainable Production and Consumption**, v. 46, p. 324–342, 2024.

MILLALEO, R.; REYES-DÍAZ, M.; IVANOV, A. G.; MORA, M. L.; ALBERDI, M. Manganese as essential and toxic element for plants: transport, accumulation and resistance mechanisms. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 10, n. 4, p. 470–481, 2010.

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, 28 jul. 1962.

NASCIMENTO, A. V. de S.; SANTOS, P. A. A.; MUNIZ, A. V. C. da S.; LÉDO, A. da S. The propagation of umbuzeiro (*Spondias tuberosa* Arruda), a native fruit tree of growing importance for the Brazilian semi-arid region. **Forests, Trees and Livelihoods**, p. 1–25, 16 fev. 2026.

OLIVEIRA, K. A. de; CALDAS, C. P.; SILVA, W. A. V. da; DANTAS, T. dos S.; MACHADO, J. C. B.; FERREIRA, M. R. A.; SOARES, L. A. L. *Spondias tuberosa*: a promising food species from the Caatinga biome—a comprehensive review of its chemistry, biological and nutritional potential, and applications. **Revista Brasileira de Farmacognosia**, v. 35, n. 5, p. 922–934, 2025.

PASTERNAK, T. P.; STEINMACHER, D. Plant growth regulation in cell and tissue culture *in vitro*. **Plants**, v. 13, n. 2, art. 327, 2024.

PATRIGNANI, A.; OCHSNER, T. E. Canopeo: A powerful new tool for measuring fractional green canopy cover. **Agronomy Journal**, v. 107, n. 6, p. 2312–2320, 2015.

PHILLIPS, G. C.; GARDA, M. Plant tissue culture media and practices: an overview. **In Vitro Cellular & Developmental Biology – Plant**, v. 55, n. 3, p. 242–257, 2019.

POORTER, H.; NIKLAS, K. J.; REICH, P. B.; OLEKSYN, J.; POOT, P.; MOMMER, L. Biomass allocation to leaves, stems and roots: meta-analyses of interspecific variation and environmental control. **New Phytologist**, v. 193, n. 1, p. 30–50, 2012.

PRINTZ, B.; LUTTS, S.; HAUSMAN, J. F.; SERGEANT, K. Copper trafficking in plants and its implication on cell wall dynamics. **Frontiers in Plant Science**, v. 7, art. 601, 2016.

RODRIGUES, N. L.; SOUZA, A. L. da C.; OLIVEIRA, C. C. de; CARVALHO, M. G. de; LIMA, B. R. de; ALMEIDA AKUTSU, R. de C. C. de; LANA, V. S. de; RAPOSO, A.; SARAIVA, A.; HAN, H.; CARVALHO, I. M. M. de. Nutritional and biological attributes of *Spondias tuberosa* (Umbu) fruit: an integrative review with a systematic approach. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 130, art. 106196, 2024.

SAAD, A. I. M.; ELSHAHED, A. M. Plant tissue culture media. In: LEVA, A.; RINALDI, L. M. R. (ed.). **Recent advances in plant *in vitro* culture**. [S. l.]: InTech, 2012. p. 29–40..

SALES, R. P. de; SILVA, L. C. da; NEVES, A. G. da S.; FAJARDO, C. G.; PINHEIRO, L. G.; VIEIRA, F. de A. Addressing conservation needs: genetic diversity and population ecology of the endemic tree *Spondias tuberosa* Arruda. **Scientifica**, v. 2024, art. 5023974, 2024.

SILVA, F. C. da (ed.). **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2009. 627 p.

SINGH, A.; KHARE, S.; NIHARIKA; GUPTA, P. Sulfur and phosphorus transporters in plants: integrating mechanisms for optimized nutrient supply. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 224, art. 109918, 2025.

TANG, R.-J.; LUAN, S. Regulation of calcium and magnesium homeostasis in plants: from transporters to signaling network. **Current Opinion in Plant Biology**, v. 39, p. 97–105, 2017.

TESTER, M.; DAVENPORT, R. Na^+ tolerance and Na^+ transport in higher plants. **Annals of Botany**, v. 91, n. 5, p. 503–527, 2003.

VANDECASTEELE, B.; BLINDEMAN, L.; AMERY, F.; PIETERS, C.; OMMESLAG, S.; VAN LOO, K.; DE TENDER, C.; DEBODE, J. Grow–store–steam–re-peat: reuse of spent growing media for circular cultivation of *Chrysanthemum*. **Journal of Cleaner Production**, v. 276, art. 124128, 2020.

VELASCO-MUÑOZ, J. F.; MENDOZA, J. M. F.; AZNAR-SÁNCHEZ, J. A.; GALLEGO-SCHMID, A. Circular economy implementation in the agricultural sector: definition, strategies and indicators. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 170, art. 105618, 2021.

WDOWIAK, A.; PODGÓRSKA, A.; SZAL, B. Calcium in plants: an important element of cell physiology and structure, signaling, and stress responses. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 46, art. 108, 2024.

WERADUWAGE, S. M.; CHEN, J.; ANOZIE, F. C.; MORALES, A.; WEISE, S. E.; SHARKEY, T. D. The relationship between leaf area growth and biomass accumulation in *Arabidopsis thaliana*. **Frontiers in Plant Science**, v. 6, art. 167, 2015.

WHITE, P. J.; BROADLEY, M. R. Calcium in plants. **Annals of Botany**, v. 92, n. 4, p. 487–511, 2003.

WU, H. Plant salt tolerance and Na^+ sensing and transport. **The Crop Journal**, v. 6, n. 3, p. 215–225, 2018.

XIE, K.; CAKMAK, I.; WANG, S.; ZHANG, F.; GUO, S. Synergistic and antagonistic interactions between potassium and magnesium in higher plants. **The Crop Journal**, v. 9, n. 2, p. 249–256, 2021.

XU, E.; LIU, Y.; GU, D.; ZHAN, X.; LI, J.; ZHOU, K.; ZHANG, P.; ZOU, Y. Molecular mechanisms of plant responses to copper: from deficiency to excess. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 25, n. 13, art. 6993, 2024.

ZENG, H.; WU, H.; YAN, F.; YI, K.; ZHU, Y. Molecular regulation of zinc deficiency responses in plants. **Journal of Plant Physiology**, v. 261, art. 153419, 2021.

9. ARTIGO 6
NEW METHOD FOR UMBU TREE (*Spondias tuberosa* Arruda) PROPAGATION VIA ENDOCARP REMOVAL AND *IN VITRO* SEED GERMINATION

Artigo aceito para publicação no periódico Acta Scientiarum. Agronomy

NASCIMENTO, A. V. S.; SANTOS, P. A. A.; SANTANA, M. C.; MUNIZ, A. V. C. S.; LEDO, A. S. New method for umbu tree (*Spondias tuberosa* Arruda) propagation via endocarp removal and in vitro seed germination. **Acta Scientiarum. Agronomy**, 2026.

ABSTRACT

The development of efficient protocols for the sexual propagation of umbu tree (*Spondias tuberosa* Arruda) is essential for genetic variability assessment, genotype selection, and conservation programs. Selected genotypes may be multiplied through micropropagation techniques for large-scale clonal production and germplasm conservation. This study aimed to evaluate and validate a new propagation method for *S. tuberosa* based on seed removal from the endocarp followed by *in vitro* germination. Mature fruit from four mother plants was collected in the state of Sergipe, Brazil, and the extracted seeds were compared to intact dispersal units under *in vitro* and *ex vitro* conditions. Biometric and physico-physiological attributes of the dispersal units, including dimensions, mass, water content, and 1000-seed weight, were also assessed. *In vitro* germination resulted in a high germination percentage (82%) and high germination speed at 30 days with low contamination rates (5%). In contrast, intact dispersal units did not germinate *in vitro*, exhibited a high contamination rate (50%), and showed reduced *ex vitro* germination, ranging from 16 to 59% at 60 days depending on the mother plant. Among the mother plants, M2-NSG had the highest performance, with 82% in vitro germination, 59% *ex vitro* germination, and 51% normal seedlings compared to M1-GC. Regarding culture media, M3-GC exhibited the highest germination percentages (72 and 60% on Murashige and Skoog and Wood Plant Media, respectively), whereas M4-PR showed the lowest germination rates, ranging from 22 to 28%. These results demonstrate that the endocarp functions as a physical barrier, constraining germination and compromising the disinfestation efficiency. Endocarp removal combined with *in vitro* germination is an efficient and promising strategy for producing high-quality seedlings.

Keywords: Caatinga, dormancy breaking, dispersal unit, micropropagation, physiological variability, mother plant selection.

9.1. Introduction

The umbu tree (*Spondias tuberosa* Arruda) is a fruit-bearing species belonging to the Anacardiaceae family that is endemic to the Caatinga biome (Santana et al., 2025). Its fruit, the umbu, is an important source of income for smallholder farmers in the Brazilian semiarid region, as the fruit can be consumed fresh or processed into juices, sweets, ice creams, popsicles, pulps, and liqueurs (Rodrigues et al., 2024a). The species is well adapted to environments with low water availability, mainly due to the presence of xylopodia, which are specialized structures for water and nutrient storage (Nascimento et al., 2026; Silva et al., 2009).

Spondias tuberosa propagation primarily occurs via dispersal units (DUs; pyrenes). However, physical dormancy imposed by a rigid, woody endocarp surrounding the seed hinders propagation (Simas et al., 2019). This structure acts as a mechanical barrier that restricts gas exchange, water uptake, and embryo expansion, resulting in slow and irregular emergence and a low germination percentage (Bewley et al., 2013; Lopes et al., 2009). In addition to

mechanical restriction, the woody endocarp may impose physiological constraints on germination. Reduced permeability limits water imbibition and oxygen diffusion to the embryo, restricting the respiratory activity and metabolic activation required for germination (Penfield, 2017). Such conditions may maintain high abscisic acid levels or delay gibberellin-mediated embryo growth, contributing to prolonged dormancy and irregular seedling emergence (Baskin & Baskin, 2014; Bewley et al., 2013).

Plant tissue culture comprises several techniques recognized as effective strategies for supporting the propagation and conservation of native species that exhibit seed dormancy, such as *S. tuberosa* (Pence & Bruns, 2024). Among these techniques, *in vitro* germination has gained prominence due to its potential for supporting micropropagation protocols, as seedlings obtained under *in vitro* conditions represent an ideal source of explants because they are uniform and free of contamination (Nascimento et al., 2020).

In vitro germination also makes it possible to overcome common limitations, such as the high contamination rate and tissue oxidation resulting from the release of phenolic compounds from explants (Lédo et al., 2007). Woody species, in particular, present greater challenges for *in vitro* establishment due to endogenous or epiphytic microorganisms, whose complete elimination during disinfestation procedures may cause irreversible plant tissue damage (Oliveira et al., 2013).

The use of *in vitro* germinated seedlings represents a practical and economically advantageous solution, as their development occurs under aseptic conditions, reducing the risk of contamination (Silva et al., 2025a). The establishment of efficient *in vitro* germination protocols increases seedling establishment and survival rates, facilitating their application in micropropagation systems. This technique is highly relevant for conservation programs targeting threatened and/or difficult-to-propagate species, as it enables large-scale seedling production and the maintenance and selection of genotypes of interest under controlled conditions (George et al., 2008; Pence, 2010).

Due to the limitations imposed by the endocarp and the high contamination rates associated with *S. tuberosa* DUs, there is a need to develop methodologies that enhance germination and early seedling establishment under *in vitro* conditions. Therefore, the present study aimed to evaluate and validate a new propagation method based on endocarp removal and *in vitro* seed germination with the goal of establishing an efficient protocol for obtaining contamination-free *in vitro* seedlings from different *S. tuberosa* genotypes with a high physiological potential.

9.2. Materials and Methods

9.2.1. Plant material collection and preparation

Mature *S. tuberosa* fruit was collected from four mother plants located in the municipalities of Graccho Cardoso (M1-GC and M3-GC), Nossa Senhora da Glória (M2-NSG), and Poço Redondo (M4-PR) in the state of Sergipe, Brazil. The sampling sites were selected to represent contrasting environmental conditions in the Brazilian semiarid region.

The municipalities differ in annual rainfall, with averages of 823.9 mm in Graccho Cardoso, 701.4 mm in Nossa Senhora da Glória, and 387.8 mm in Poço Redondo, representing decreasing water availability (EMDAGRO). The distances between collection sites were approximately 30 km between Graccho Cardoso and Nossa Senhora da Glória, 55 km between Nossa Senhora da Glória and Poço Redondo, and 85 km between Graccho Cardoso and Poço Redondo. The mother plants were located in natural populations growing under field conditions typical of the Caatinga biome. After collection, the fruit was manually depulped, and the resulting DUs were stored in zip-lock plastic bags under laboratory conditions at room temperature for approximately 2 months prior to the establishment of the experiments.

9.2.2. Seed extraction from the endocarp

Seeds were extracted from the endocarp by making a longitudinal cut in the DU using a PVC pipe cutter. The cut was made a few millimeters away from the central region to avoid damage to the different seed structures. Using fine-tipped forceps, endocarp fragments that hindered seed removal were carefully eliminated. The seeds were then extracted and assigned to the *in vitro* treatments. Inoculation was carried out on the same day as seed removal from the endocarp (Figure 1).

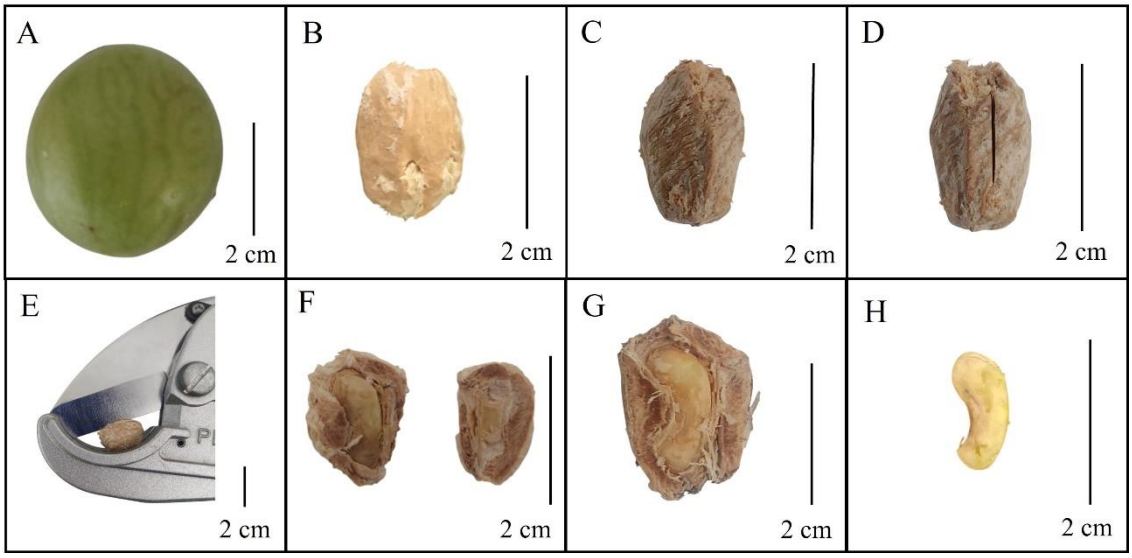


Figure 1. Seed extraction from the *Spondias tuberosa* endocarp. (A) Mature fruit; (B) dispersal unit in lateral view with the longitudinal axis positioned horizontally; (C) dispersal unit in lateral view with the longitudinal axis oriented vertically; (D) indication of the cutting site on the endocarp; (E) cut performed using a PVC pipe cutter; (F and G) longitudinal section of the dispersal unit; and (H) extracted seed.

9.2.3. Disinfestation, culture medium preparation, and growth conditions

Seeds or DUs were surface-disinfected in a laminar airflow cabinet following the method described by Santos et al. (2018). Briefly, seeds or DUs were immersed in 70% ethanol for 30 s and then soaked in sodium hypochlorite solution containing 1.25% active chlorine and 2 drops of neutral detergent for 10 min. The material was rinsed three times with distilled and autoclaved water.

The culture media used were wood plant medium (WPM; Lloyd & McCown, 1980) and Murashige and Skoog medium (MS; Murashige & Skoog, 1962), and they were applied following the experimental design. The media were supplemented with 30 g L^{-1} sucrose. For gelling, 7 g L^{-1} agar was used (Experiments 1–2) or 4 g L^{-1} Phytagel™ (Experiment 3). The pH of the media was adjusted to 5.8 ± 0.1 prior to autoclaving at 121°C and 1.0 atm for 20 min. *In vitro* cultures were maintained in a growth room under LED lighting with a photosynthetic photon flux density of 60 µmol m^{-2} s^{-1}, 12-h photoperiod, temperature of 25 ± 2°C, and relative humidity of approximately 70%.

9.2.4. Biometric analyses of dispersal units

Biometric analyses, water content, and 1000-seed weight were determined for DUs obtained from the 4 collected *S. tuberosa* mother plants (M1-GC, M2-NSG, M3-GC, and M4-PR). Biometric measurements were performed on 50 DUs per mother plant using a digital caliper (precision of 0.01 mm) to determine the length, width, and thickness. The individual mass was measured using a semi-analytical balance (precision of 0.001 g). Descriptive

statistics, including the mean, minimum, and maximum values, variance, standard deviation, and coefficient of variation, were applied.

The seed water content was determined according to the Rules for Seed Testing (RAS; Brazil, 2025) using the oven-drying method at 105 ± 2°C for 24 h. There were 5 replicates of 10 seeds, and the results were expressed on a wet basis. The 1000-seed weight (TSW) was determined following RAS guidelines using 8 replicates of 100 seeds, and the results were converted to the equivalent of 1000 seeds.

9.2.5. Experiments

Experiments were conducted in a completely randomized design under different *in vitro* and *ex vitro* germination conditions to evaluate the potential of the *S. tuberosa* seed extraction technique.

9.2.5.1. Experiments 1 and 2: Effect of endocarp removal on the *in vitro* and *ex vitro* germination of *S. tuberosa* mother plants

In Experiments 1 and 2, seeds/DUs from mother plants M1-GC and M2-NSG were subjected to 4 treatments: (i) *in vitro* SE – seeds extracted from the endocarp and placed on culture medium; (ii) *in vitro* DU – intact dispersal units incubated under *in vitro* conditions; (iii) *ex vitro* DU – dispersal units sown in washed sand; and (iv) *ex vitro* SE – seeds extracted from the endocarp and sown in washed sand. The germination percentage (at 7, 15, 30, and 60 days) and contamination percentage (at 60 days) were evaluated.

For the *ex vitro* treatments, there were 4 replicates, each consisting of 25 DUs or seeds placed in polyethylene trays (29.5 × 44 cm) containing washed and sieved sand as the substrate. The substrate had a fine texture, with a granulometric composition of 96.29% sand, 1.83% silt, and 1.88% clay, determined using the Bouyoucos hydrometer method. The sand was used without sterilization. The trays were maintained in a greenhouse under natural light conditions. DUs or seeds were sown at approximately 1 cm depth, and irrigation was performed manually to maintain the moisture of the substrate close to field capacity throughout the experimental period. For the *in vitro* assays, there were 4 replicates, each consisting of 5 flasks (capacity 190 mL) supplemented with 20 mL of culture medium, and 5 seeds or DUs were placed in each flask, totaling 100 experimental units across both assays.

After completion of the two assays, a comparative analysis was performed between mother plants M1-GC and M2-NSG regarding *in vitro* and *ex vitro* germination and the number of normal *in vitro* seedlings at 60 days. *In vitro* germination was assessed based on radicle protrusion, and *ex vitro* germination was determined by the emergence of the hypocotyl above the substrate's surface. Normal seedlings were defined as those that developed both a root and shoot.

9.2.5.2. Experiment 3: Effects of the culture medium and mother plant on *in vitro* germination

Experiment 3 evaluated the *in vitro* germination as a function of the mother plant (M3-GC and M4-PR) and culture medium (WPM and MS). The experimental design was a 2 × 2 factorial (2 mother plants and 2 culture media), totaling 4 treatments, with 10 replicates per treatment, each consisting of 5 test tubes. The experimental unit consisted of 1 test tube (25 × 150 mm) containing 10 mL of culture medium. There was 1 seed per tube, resulting in 50 experimental units per treatment. The germination percentage was evaluated after 30 days.

9.2.6. Statistical analyses

The means of the evaluated variables were subjected to the Shapiro–Wilk normality test. Analysis of variance (ANOVA) was performed, and means were compared using Tukey's test at a significance level of $p \leq 0.05$, except for the contamination variable (%) and comparisons

between mother plants, in which means were compared using Student's t-test ($p \leq 0.05$). All statistical analyses were performed using Sisvar software, version 5.8 (Ferreira, 2019).

9.3. Results and Discussion

9.3.1. *In vitro* germination

The *in vitro* germination of *S. tuberosa* seeds generally began 24 h after placement on the culture medium with the cotyledon opening. After 48 h, the onset of radicle protrusion was observed. Cotyledon chlorophyllization typically started around 72 h after placement, shortly after radicle emergence, although this process occurred earlier in some cases (Figure 2). Overall, the first normal seedlings (with both root and shoot) were observed 7 days after placement, with seedling emergence extending up to approximately 20 days.

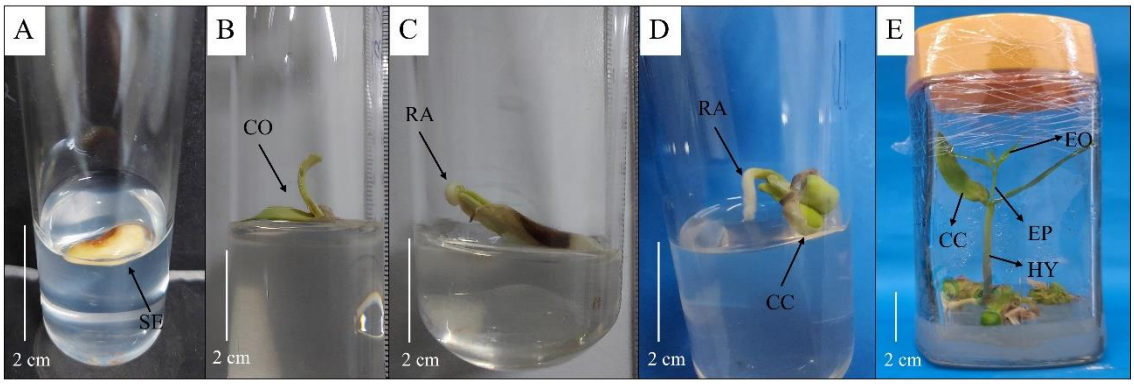


Figure 2. *In vitro* germination of *Spondias tuberosa* seeds without the endocarp. (A) Seed inoculated under *in vitro* conditions; (B) cotyledon opening; (C) radicle emergence; (D) cotyledon chlorophyllization and root growth; and (E) normal seedling. SE – seed; CO – cotyledon opening; CC – cotyledon chlorophyllization; RA – radicle; HY – hypocotyl; EP – epicotyl; EO – eophyll (first pair of leaves).

9.3.2. Effect of endocarp removal on in vitro and ex vitro germination and in vitro contamination

In Experiment 1, endocarp presence had a significant effect on both the *in vitro* and *ex vitro* germination of the M1-GC mother plant (Table 1.I). In treatment T1 (*in vitro* SE), *in vitro* germination reached 9% at 7 days and increased to 68% at 30 days. In contrast, treatment T2 (*in vitro* DU) showed no germination at any of the evaluated periods. Similarly, extracted seeds sown in sand did not germinate under *ex vitro* conditions (T4 – *ex vitro* SE). The *ex vitro* DU treatment (T3) showed a lower germination percentage, reaching 16% at 60 days.

Table 1. *In vitro* and *ex vitro* germination, normal seedlings (NS), and *in vitro* contamination percentage of dispersal units (DUs) and seeds extracted (SE) from two *Spondias tuberosa* mother plants at 7, 15, 30, and 60 days after sowing.

I.	**Mother plant 1 - GC**				
	Germination (%) - days				
	7	15	30	60	Contamination (%)
T1-*in vitro* SE	9.0±3.4a	32±8.3a	68±4.8a	68±4.8a	5.0±5.0b
T2-*in vitro* DU	0.0±0.0b	0.0±0.0b	0.0±0.0b	0.0±0.0c	50±12.9a
T3-*ex vitro* DU	0.0±0.0b	0.0±0.0b	1.0±1.0b	16±5.1b	-
T4-*ex vitro* SE	0.0±0.0b	0.0±0.0b	0.0±0.0b	0.0±0.0c	-

II.	Mother plant 2 - NSG			
	Germination (%) - days			
	7	15	30	60
T1-*in vitro* SE	56±4.3a	73±5.7a	82±5.2a	82±5.2a
T2-*in vitro* DU	0.0±0.0b	0.0±0.0b	0.0±0.0c	0.0±0.0c
T3-*ex vitro* DU	0.0±0.0b	14±5.2b	45±9.5b	59±7.5b
T4-*ex vitro* SE	0.0±0.0b	0.0±0.0b	0.0±0.0c	0.0±0.0c

III.	Mother plant 1 – GC × Mother plant 2 - NSG		
	G (%) - *ex vitro*	G (%) - *in vitro*	PN (%) - *in vitro*
T1- M1/GC	16±5.1b	68±7.5a	30±7.3b
T2- M2/NSG	59±7.5a	82±5.5a	51±4.1a

Values are presented as the mean ± standard error of the mean. Means followed by the same letter within a column do not differ significantly ($p \leq 0.05$). Germination data were compared using Tukey's test, and contamination and comparisons between mother plants were analyzed using Student's t-test. SE = extracted seeds; DU = dispersal units; NS = normal seedlings. "–" indicates that the variable was not evaluated for that treatment. M1-GC and M2-NSG correspond to the evaluated mother plants.

A higher contamination percentage was observed in treatment T2 (*in vitro* DU), reaching 50%, compared to treatment T1 (*in vitro* SE), which showed only 5% contamination (Figure 3). This high contamination rate was attributed to the difficulty of asepsis due to the presence of cavities and irregularities in the endocarp, which hinder the action of disinfecting agents. In addition, the rigid endocarp limits seed imbibition, inhibiting germination.

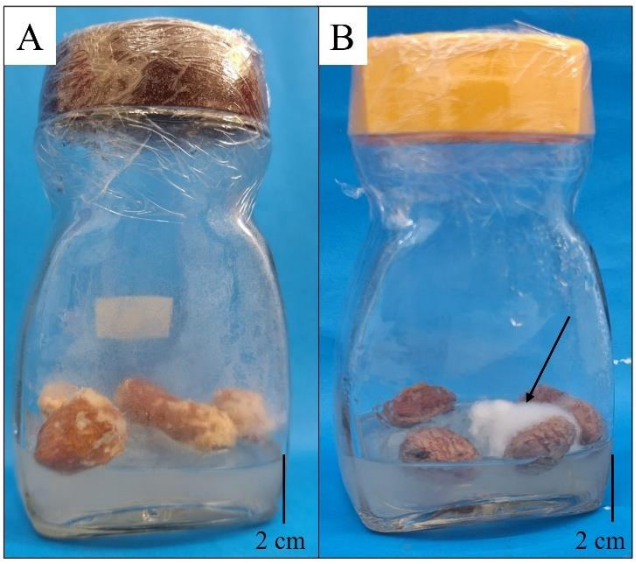


Figure 3. (A) *Spondias tuberosa* dispersal units under *in vitro* conditions; (B) fungal contamination observed at 60 days.

In Experiment 2, seeds (T1 – *in vitro* SE) from the M2-NSG mother plant showed rapid initial germination, reaching 56% at 7 days and increasing to 81% at 30 days. In treatment T2, *ex vitro* DUs exhibited delayed and lower germination rates, reaching only 14% at 15 days and 59% at 60 days after sowing. As observed for the M1-GC mother plant, DUs placed *in vitro* and seeds sown in sand did not germinate (Table 1.II). These results support the restrictive role of the endocarp on the disinfestation efficiency and embryo emergence.

The extraction of *S. tuberosa* seeds from DUs has been described as a complex procedure, mainly due to the strong adhesion of the endocarp, which increases the risk of mechanical damage (Rodrigues et al., 2024b). Previous studies have reported that seeds removed from the endocarp failed to germinate after 96 h. Moreover, intense fungal proliferation and tissue deterioration have also been observed (Rodrigues et al., 2024b, 2025). Santos et al. (2018) first demonstrated the feasibility of this technique via embryo rescue and *in vitro* propagation. However, the embryo excision procedure has not been described in detail.

Seed excision has proven to be a promising strategy for other species exhibiting physical dormancy imposed by a rigid endocarp. In olive (*Olea europaea* L.), endocarp removal enables *in vitro* establishment, increases the germination rate, and reduces the time required for progeny quality assessment (Germanà et al., 2014; Montilon et al., 2022; Santos et al., 2023).

Dormancy in species such as pequi (*Caryocar brasiliense* Camb.) (Santos et al., 2011), Taiwan cherry (*Prunus campanulata* Maxim.) (Bisognin et al., 2008), bottle gourd (*Lagenaria siceraria* (Molina) Standl.) (Fior et al., 2011), and butiá (*Butia capitata* (Mart.) Becc.) (Homczinski et al., 2023) has been associated with the rigidity of external structures, particularly the endocarp or seed coat. Successfully overcoming dormancy in these species mainly involves the physical removal of these barriers, enabling embryo development and radicle expansion. The combination of *in vitro* germination and removal of this barrier is frequently employed, as it increases the germination percentage and germination rate and enables the production of *in vitro* seedlings.

9.3.3. Effect of mother plant on *in vitro* seed germination and *ex vitro* dispersal unit germination

In the comparison among mother plants, both those tested *in vitro* (M1-GC and M2-NSG) showed high total germination rates (68 and 82%, respectively) with no significant difference (Table 1.III). However, M2-NSG exhibited a higher percentage of normal seedlings *in vitro* (51%) compared to M1-GC (30%). Under *ex vitro* conditions, M2-NSG also showed a higher germination percentage (59%) than M1-GC (16%).

Physiological differences among mother plants from different *S. tuberosa* populations have been reported by other authors. Silva et al. (2025b) highlighted that the quality and physiological characteristics of *S. tuberosa* DUs are determined by genetic origin and strongly influenced by the edaphoclimatic conditions of the collection environment, such as soil type and water availability. Thus, the observed variation reflects the complex interaction between genotype and environment.

9.3.4. Effects of the culture medium and mother plant on *in vitro* germination

In Experiment 3, there was a significant effect of the mother plant on *in vitro* germination. Seeds from mother plant M3-GC showed a higher germination percentage, reaching 72% on MS medium and 60% on WPM with no significant differences between culture media. In contrast, seeds from mother plant M4-PR exhibited lower germination with 28% on WPM and 22% on MS, differing statistically from those originating from GC (Figure 4).

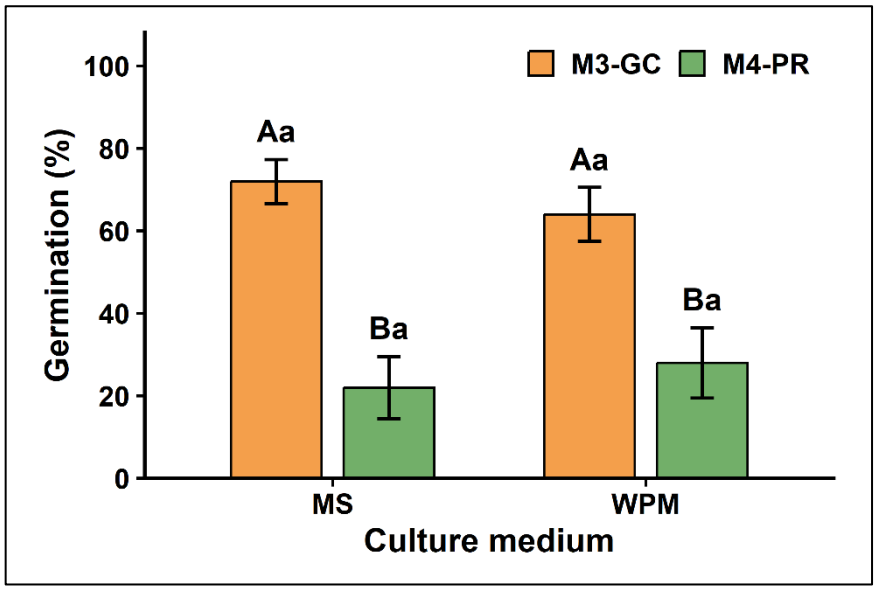


Figure 4. *In vitro* germination of *Spondias tuberosa* seeds from mother plants M3-GC and M4-PR cultured on MS and WPM media. Bars represent the mean ± standard error. Means followed by the same uppercase letter do not differ among populations within each medium, and means followed by the same lowercase letter do not differ among culture media within each population according to Tukey's test ($p \leq 0.05$).

Even when collected from similar environments, DUs from different mother plants may exhibit distinct physiological qualitites, influenced by factors such as fruit maturation stage, reserve allocation, and water content at the time of dispersal (Nobre et al., 2017; Silva et al., 2025b). These factors act synergistically and may explain the heterogeneity in germination responses commonly observed in this species.

No effects of the culture medium were observed on *in vitro* germination, indicating that *S. tuberosa* seed germination under *in vitro* conditions is not influenced by nutritional differences between media, despite the higher nutrient concentration in MS compared to WPM (Lloyd & McCown, 1980; Murashige & Skoog, 1962). The similarity in responses suggests that the species does not rely on high external mineral availability during the germination phase, likely because seed reserves are sufficient to sustain initial metabolic events.

9.3.5. Correlation with biometric attributes

The variability observed among DUs from different sources (mother plants) can be partially explained by their biometric attributes. The case of mother plant M2-NSG is noteworthy; despite presenting the lowest mean weight (0.62 g) and shortest length (15.55 mm) among all evaluated matrices, it had a higher germination (*in vitro* and *ex vitro*) than M1-GC. In addition, the TSW of this mother plant was also lower than that of the others (Table 2). This suggests that, for this mother plant, superior performance is driven by a higher intrinsic physiological quality or more efficient resource allocation, rather than by DU size alone (Bewley et al., 2013). The biometric data refer to the DUs, and these variables may not directly reflect seed characteristics.

For mother plant M3-GC, the higher *in vitro* germination percentage (72%) may correlate to its greater weight (1.29 g) and higher water content (14.07%) compared to all other evaluated mother plants. In contrast, mother plant M4-PR exhibited the lowest *in vitro* germination percentage (22%) with a lower weight (1.17 g) and water content (11.50%) than M3-GC (Table 2). Seeds with greater mass and a higher water content generally possess larger nutritional reserves and higher physiological potential, facilitating germination (Wang et al., 2025).

Although water content is a key factor for metabolic activation and the onset of germination, increasing the moisture content of *S. tuberosa* DUs from 8.58 to 49.55% after 24 h of imbibition reduced the germination, which decreased from 54.5% (non-imbibed control) to 41.5% (Nobre et al., 2017). This effect suggests that prolonged imbibition causes physiological imbalances, possibly associated with tissue water saturation, reduced oxygen diffusion, and the induction of fermentative processes, impairing germination (Rolletschek et al., 2025).

Table 2. Biometric characteristics of the dispersal units of four *Spondias tuberosa* mother plants.

Mother plants	Length (mm)	Width (mm)	Thickness (mm)	Weight (g)	Moisture content (%)	TSW (g)
M1-GC	19.07±0.16b	13.12±0.12a	11.09±0.09a	1.21±0.02ab	10.4±0.20b	1136.5
M2-NSG	15.55±0.09c	11.33±0.07c	8.91±0.06b	0.62±0.01c	10.6±0.26b	622.87
M3-GC	18.59±0.19b	11.67±0.13c	8.97±0.08b	1.29±0.02a	14.07±0.59a	1297.8
M4-PR	20.37±0.24a	12.52±0.11b	9.04±0.08b	1.17±0.02b	11.50±0.72b	1174.1
CV (%)	7.01	6.81	6.2	15.69	9.68	-
Mean	18.39	12.16	9.5	1.07	11.42	1057.8

Means followed by the same letter within a column do not differ statistically according to Tukey's test ($p \leq 0.05$). Values are expressed as the mean ± standard error of the mean (n = 50). TSW = 1000-seed weight. CV = coefficient of variation.

Biometric variation was observed among the evaluated mother plants (Table 3). DUs from M4-PR were generally longer, whereas M1-GC exhibited a greater diameter and thickness, resulting in more voluminous structures. In contrast, M2-NSG produced smaller and lighter DUs. Low standard deviations and coefficients of variation indicated good within-lot uniformity, particularly for linear dimensions. Mass showed comparatively higher variability, likely reflecting differences in fruit maturation and reserve accumulation.

In this context, the biometric ranges recorded here were comparable to, but broader than, those reported by Silva et al. (2025b), who described *S. tuberosa* DUs with lengths of 19.3–20.3 mm, widths of 13.6–14.2 mm, thicknesses of 10.8–11.0 mm, and masses of 1.12–1.20 g. These biometric differences confirm the influence of genetic and environmental factors on DU development and explain the contrasting physiological responses observed among mother plants.

Table 3. Descriptive statistics of the dispersal unit biometric characteristics of four *Spondias tuberosa* mother plants.

Mother plants	Variable	Mean	Minimum	Maximum	Variance	SD	CV (%)
M1-GC	Length (mm)	19.07	16.4	21.7	1.3	1.14	6.00
	Width (mm)	13.12	10.7	14.7	0.83	0.91	6.90
	Thickness (mm)	11.09	9.7	12.3	0.42	0.65	5.90
	Mass (g)	1.21	0.72	1.84	0.04	0.2	16.7
M2-NSG	Length (mm)	15.55	13.9	16.6	0.48	0.69	4.40
	Width (mm)	11.33	10.1	12.5	0.3	0.55	4.90
	Thickness (mm)	8.91	7.8	10	0.23	0.48	5.40
	Mass (g)	0.62	0.41	0.85	0.01	0.08	13.4
M3-GC	Length (mm)	18.59	16.2	22.8	1.98	1.41	7.60

	Width (mm)	11.67	10	14.6	0.93	0.96	8.30
	Thickness (mm)	8.97	7.7	10.3	0.35	0.59	6.60
	Mass (g)	1.29	0.9	1.58	0.04	0.19	14.8
M4-PR	Length (mm)	20.37	16.2	23.5	2.89	1.7	8.30
	Width (mm)	12.52	10.1	13.8	0.69	0.83	6.60
	Thickness (mm)	9.04	7.7	10.5	0.38	0.62	6.80
	Mass (g)	1.17	0.84	1.48	0.03	0.17	14.5

Means, minimum, and maximum values, variance, standard deviation (SD), and coefficient of variation (CV%) calculated from 50 dispersal units per mother plant. M1-GC, M2-NSG, M3-GC, and M4-PR correspond to the evaluated mother plants.

These results confirm that *in vitro* propagation through seeds without the endocarp is a promising strategy for obtaining high-quality *S. tuberosa* seedlings, reducing the germination time and minimizing contamination losses. The variability observed among DUs collected from different mother plants indicates the potential for selecting superior seed sources with a higher germination capacity and improved responses under *in vitro* culture conditions. This approach represents a relevant methodological advance for conservation programs and large-scale seedling production.

9.4. Conclusions

Endocarp removal combined with *in vitro* seed germination was shown to be an efficient method for overcoming the barriers imposed by physical dormancy as well as *in vitro* microbial contamination of *S. tuberosa* DUs. Seeds without the endocarp showed rapid and high germination under *in vitro* conditions. In contrast, the presence of the endocarp prevented *in vitro* establishment, and seeds extracted from the endocarp failed to germinate under *ex vitro* conditions. The biometric differences observed among DUs indicate that their physical attributes influence germination performance. The variation in germination was associated with DUs originating from different mother plants, with those collected from M2-NSG showing higher germination percentages.

Acknowledgements
This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brazil (CAPES) – Finance Code 001. The authors thank the technicians João dos Santos (Universidade Federal de Sergipe) and Inácio Roque de Andrade Junior (Embrapa Tabuleiros Costeiros) for their assistance in conducting the experiments, as well as James Cardoso (Monumento Natural Grota do Angico), Vitor Emanuel de Souza Nascimento, and Luciano Souza for their support during fruit collection.

9.5. References

Baskin, C. C., & Baskin, J. M. (2014). *Seeds: Ecology, biogeography, and evolution of dormancy and germination* (2nd ed.). Academic/Elsevier. https://doi.org/10.1016/C2013-0-00597-X

Bewley, J. D., Bradford, K. J., Hilhorst, H. W. M., & Nonogaki, H. (2013). *Seeds: Physiology of development, germination and dormancy* (3rd ed.). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-4693-4

Bisognin, D. A., Silva, A. L. L. da, Horbach, M. A., Girotto, J., & Barriquello, C. J. (2008). Germinação e propagação in vitro de porongo. *Ciência Rural*, *38*(2), 332–339. https://doi.org/10.1590/S0103-84782008000200006

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. (2025). *Regras para análise de sementes* (399 p.). MAPA/ACS.

Ferreira, D. F. (2019). Sisvar: A computer analysis system to fixed effects split plot type designs. *Brazilian Journal of Biometrics*, *37*(4), 529–535. https://doi.org/10.28951/rbb.v37i4.450

Fior, C. S., Rodrigues, L. R., Leonhardt, C., & Schwarz, S. F. (2011). Superação de dormência em sementes de *Butia capitata*. *Ciência Rural*, *41*(7), 1150–1153. https://doi.org/10.1590/S0103-84782011005000087

George, E. F., Hall, M. A., & De Klerk, G.-J. (2008). *Plant propagation by tissue culture* (3rd ed.). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5005-3

Germanà, M. A., Chiancone, B., Hammami, S. B. M., & Rapoport, H. F. (2014). Olive embryo *in vitro* germination potential: Role of explant configuration and embryo structure among cultivars. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, *118*(3), 409–417. https://doi.org/10.1007/s11240-014-0493-5

Homczinski, I., dos Santos, J. M., Sanson, D., Garrett, A. T. de A., & Peres, F. S. B. (2023). Quebra de dormência induzida por ácido giberélico e germinação *in vitro* de sementes e embriões zigóticos de *Prunus campanulata* Maxim. *Evidência*, *23*(1), 9–22. https://doi.org/10.18593/evid.32526

Lédo, A. da S., Seca, G. S. V., Barboza, S. B. S. C., & Silva Junior, J. F. da. (2007). Crescimento inicial de mangabeira (*Hancornia speciosa* Gomes) em diferentes meios de germinação *in vitro*. *Ciência e Agrotecnologia*, *31*(4), 989–993. https://doi.org/10.1590/S1413-70542007000400007

Lloyd, G., & McCown, B. (1980). Commercially feasible micropropagation of mountain laurel, *Kalmia latifolia*, by use of shoot-tip culture. *Proceedings of the International Plant Propagators' Society*, *30*, 421–427.

Lopes, P. S. N., Magalhães, H. M., Gomes, J. G., Brandão Júnior, D. da S., & Araújo, V. D. de. (2009). Superação da dormência de sementes de umbuzeiro (*Spondias tuberosa* Arr. Câm.) utilizando diferentes métodos. *Revista Brasileira de Fruticultura*, *31*(3), 872–880. https://doi.org/10.1590/S0100-29452009000300034

Montilon, V., Susca, L., Potere, O., Roseti, V., Campanale, A., Saponari, A., Montemurro, C., Fanelli, V., Venerito, P., & Bottalico, G. (2022). Embryo culture, *in vitro* propagation, and molecular identification for advanced olive breeding programs. *Horticulturae*, *8*(1), 36. https://doi.org/10.3390/horticulturae8010036

Murashige, T., & Skoog, F. (1962). A revised medium for rapid growth and bio assays with tobacco tissue cultures. *Physiologia Plantarum*, *15*(3), 473–497. https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x

Nascimento, A. V. de S., Mendonça, A. M. das C., Campos, J. A., Santana, M. C. de, & Santos, P. A. A. (2020). *In vitro* germination and micropropagation of *Myracrodruon urundeuva* Allemão (Anacardiaceae). *Plant Cell Culture & Micropropagation*, *16*, 16–e156. https://doi.org/10.46526/pccm.2020.v16.156

Nascimento, A. V. S., Santos, P. A. A., Muniz, A. V. C. S., & Lédo, A. S. (2026). The propagation of umbuzeiro (*Spondias tuberosa* Arruda), a native fruit tree of growing importance for the Brazilian semi-arid region. *Forests, Trees and Livelihoods*, 1–25. https://doi.org/10.1080/14728028.2026.2626995

Nobre, D. A. C., Neta, I. C. S., Maia, V. M., Souza, D. A. M. S., & Alexandre, R. S. (2017). Qualidade física, fisiológica e superação de dormência de sementes de umbu. *Pesquisa Agropecuária Pernambucana*, *22*, e201705. https://doi.org/10.12661/pap.2017.013

Oliveira, L. S. de, Dias, P. C., & Brondani, G. E. (2013). Micropropagação de espécies florestais brasileiras. *Pesquisa Florestal Brasileira*, *33*(76), 439–453. https://doi.org/10.4336/2013.pfb.33.76.481

Pence, V. C. (2010). The possibilities and challenges of *in vitro* methods for plant conservation. *Kew Bulletin*, *65*, 539–547. https://doi.org/10.1007/s12225-011-9245-4

Pence, V. C., & Bruns, E. B. (2024). Scratching the surface: The *in vitro* research that will be critical for conserving exceptional plants to scale. *In Vitro Cellular & Developmental Biology–Plant*, *60*, 266–282. https://doi.org/10.1007/s11627-023-10405-w

Penfield, S. (2017). Seed dormancy and germination. *Current Biology*, *27*, R874–R878. https://doi.org/10.1016/j.cub.2017.05.050

Rodrigues, A. M. B., Torres, M. F. O., Nunes, V. V., Oliveira, L. M., Silva, A. M., & Carvalho, I. M. M. (2024a). Unveiling the structure of *Spondias tuberosa* dispersal units through X-ray imaging. *Genetic Resources and Crop Evolution*, *71*, 947–956. https://doi.org/10.1007/s10722-023-01751-0

Rodrigues, A. M. B., Torres, M. F. O., Nunes, V. V., Souza, J. L., Santana, N. A., Pinheiro, A. C., & Mann, R. S. (2025). Pre-germination treatments for *Spondias tuberosa* seeds. *Revista DELOS*, *18*(64), e4044. https://doi.org/10.55905/rdelosv18.n64-078

Rodrigues, N. L., Souza, A. L. C., Oliveira, C. C., Carvalho, M. G., Lima, B. R., Akutsu, R. C. C. A., Lana, V. S., Raposo, A., Saraiva, A., Han, H., & Carvalho, I. M. M. (2024b). Nutritional and biological attributes of *Spondias tuberosa* (umbu) fruit: An integrative review with a systematic approach. *Journal of Food Composition and Analysis*, *130*, 106196. https://doi.org/10.1016/j.jfca.2024.106196

Rolletschek, H., Borisjuk, L., Gómez-Álvarez, E. M., & Pucciariello, C. (2025). Advances in seed hypoxia research. *Plant Physiology*, *197*(1), kiae556. https://doi.org/10.1093/plphys/kiae556

Santana, N. A., Nunes, V. V., Silva, M. S. O. da, & Silva-Mann, R. (2025). Phenotypic selection for improvement of *Spondias tuberosa* trees in on-farm biodiversity conservation. *Genetic Resources and Crop Evolution*, *72*, 3603–3620. https://doi.org/10.1007/s10722-024-02164-3

Santos, B. R., Paiva, R., Abbade, L. C., & Aquino, S. O. de. (2011). Germinação *in vitro* e *ex vitro* de sementes de pequi [*Caryocar brasiliense* Camb. (Caryocaraceae)]. *Naturalia*, *34*, 43–47.

Santos, F. F. D., Strassburger, A. S., Bandeira, J. D. M., Coutinho, E. F., & Moraes, D. M. D. (2023). Germinação e aclimatação de oliveira cv. Arbequina. *Revista Científica Rural*, *25*(1), 339–357. https://doi.org/10.29327/246831.25.1-22

Santos, P. A. A., Dias, G. S., Mendonça, A. M. C., Silva Júnior, C. D., Silva, L. C., & Santana, M. C. (2018). Embryo rescue of *Spondias tuberosa* and exogenous application of gibberellic acid. *Acta Horticulturae*, *1224*, 39–44. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2018.1224.6

Silva, E. C., Nogueira, R. J. M. C., Vale, F. H. A., Melo, N. F. de, & Araújo, F. P. de. (2009). Water relations and organic solutes production in four umbu tree (*Spondias tuberosa*) genotypes under intermittent drought. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, *21*(1), 43–53. https://doi.org/10.1590/S1677-04202009000100006

Silva, G. A. de S. da, Rocha, T. T., & Herrera, R. C. (2025a). Micropropagação de espécies lenhosas nativas: Análise do conhecimento científico e perspectivas para a conservação. *Fronteira: Journal of Social, Technological and Environmental Science*, *14*(1), 267–298. https://doi.org/10.21664/2238-8869.2025v14i1.p267-298

Silva, J. H. C. S., Silva, J. N. de, Rodrigues, C. M., Silva, E. L. F. de, Almeida, L. G. A. de, Bernardo, M. K. F., Nascimento, K. L. de, Ramos, R. de S., Nascimento, N. F. F. de, & Alves, E. U. (2025b). Phenotypic expression of diaspores indicates genetic diversity in natural populations of *Spondias tuberosa* (Anacardiaceae). *Biology*, *14*(12), 1641. https://doi.org/10.3390/biology14121641

Simas, B. R. S., Freitas, T. A. S., Freitas, I. S., & Silva, L. L. (2019). Desafios da propagação sexuada do umbuzeiro, *Spondias tuberosa* Arr. (Anacardiaceae). *Revista Científica Intelletto*, *4*(2), 1–10. https://revista.grupofaveni.com.br/index.php/revista-intelletto/article/view/142

Wang, X., Sun, J., Yi, Z., & Dong, S. (2025). Effects of seed size on soybean performance: Germination, growth, stress resistance, photosynthesis, and yield. *BMC Plant Biology*, *25*, 219. https://doi.org/10.1186/s12870-025-06224-3

10. ARTIGO 7
ESTABELECIMENTO *IN VITRO* E RESPOSTAS MORFOGÊNICAS DE *Spondias tuberosa* Arruda SOB DIFERENTES CONDIÇÕES DE CULTIVO

RESUMO

Spondias tuberosa Arruda, conhecida como umbuzeiro, é uma frutífera nativa da Caatinga com importância ecológica e socioeconômica para o semiárido brasileiro. No entanto, os estudos envolvendo sua micropropagação ainda são escassos, limitando a definição de protocolos eficientes para o estabelecimento e a multiplicação *in vitro* da espécie. Este estudo teve como objetivo avaliar fatores relacionados ao estabelecimento e à multiplicação *in vitro* de umbuzeiro. Foram conduzidos experimentos para avaliar: i) a concentração do meio WPM e o uso de carvão ativado na germinação *in vitro* de sementes extraídas do endocarpo; ii) o efeito de concentrações de $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ no desenvolvimento inicial e na senescência apical; iii) o efeito do tipo de explante e da suplementação com BAP; e iv) o efeito de BAP, KIN e sua combinação na multiplicação *in vitro*. A germinação foi influenciada pela interação entre concentração do meio WPM e carvão ativado, sendo menor no WPM completo sem carvão ativado (12,5%) e maior nos tratamentos 1/2 WPM sem carvão (52,1%), WPM completo com carvão (46,2%) e 1/2 WPM com carvão (37,3%). O aumento da concentração de $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ não reduziu a senescência nem favoreceu a formação de plantas normais, embora tenha sido observada tendência linear negativa para a formação de hipocótilo. Na multiplicação, os segmentos nodais cotiledonares apresentaram maior competência morfogênica que os explantes apicais, especialmente para número de brotos, folhas e enraizamento. BAP e KIN, isoladamente ou em combinação, não aumentaram o número de brotos, mas a combinação de 2 mg L^{-1} de BAP + 2 mg L^{-1} de KIN favoreceu a emissão de folhas. Os resultados indicam avanços no estabelecimento *in vitro* de umbuzeiro, mas evidenciam a necessidade de ajustes adicionais para elevar a multiplicação e reduzir a senescência apical.

Palavras-chave: Umbuzeiro, cultura de tecidos vegetais, Caatinga, carvão ativado, citocininas, micropropagação.

10.1. Introdução

Spondias tuberosa Arruda (Anacardiaceae), conhecida popularmente como umbuzeiro ou imbuzeiro, é uma frutífera nativa da Caatinga com grande importância ecológica, socioeconômica e cultural para o semiárido brasileiro (Mertens *et al*., 2017). A espécie apresenta elevada adaptação às condições de seca, associada a características morfofisiológicas como a formação de xilopódio, estrutura subterrânea de reserva que favorece a sobrevivência em ambientes com restrição hídrica (Matos *et al*., 2020; Silva *et al*., 2009).

O umbuzeiro destaca-se pela produção de frutos de interesse alimentar e agroindustrial, com potencial para uso em sistemas produtivos, restauração e conservação da biodiversidade regional (Freitas *et al*., 2024; Rodrigues *et al*., 2024). No entanto, sua exploração ainda ocorre predominantemente de forma extrativista, com poucos pomares comerciais estabelecidos para produção racional da fruta, o que ainda dificulta a oferta regular dos frutos e a ampliação do cultivo (Gama *et al*., 2024; Sales *et al*., 2025).

A propagação do umbuzeiro apresenta limitações importantes que impedem a expansão da cultura. A propagação por sementes é amplamente utilizada na produção de mudas e favorece a manutenção da variabilidade genética e a formação precoce do xilopódio (Reis e*t al*., 2010). No entanto, é limitada pela emergência lenta e desuniforme de plântulas, associada à presença do endocarpo rígido que envolve as sementes, além do crescimento lento e da variabilidade entre progênies (Lopes *et al*., 2009; Rocha *et al*., 2019). Por outro lado, técnicas

assexuadas, como estaquia e enxertia, permitem a multiplicação de genótipos superiores, mas ainda apresentam entraves, como dificuldade de formação de xilopódio em mudas de estacas, necessidade de mão de obra especializada e limitada disponibilidade de materiais genéticos caracterizados para porta-enxerto e copa (Gomes *et al*., 2010; Mertens *et al*., 2015; Rocha *et al*., 2019; Souza, 2019).

A cultura de tecidos vegetais representa uma alternativa para a propagação, conservação e produção de mudas de espécies lenhosas frutíferas nativas, como o umbuzeiro, permitindo o cultivo sob condições controladas e a obtenção de plantas a partir de sementes ou explantes (Long *et al*., 2022; Castro-Camba *et al*., 2023; Grzelak *et al*., 2024; Pasternak; Steinmacher, 2024). No entanto, apesar dos avanços em estudos sobre germinação, produção de mudas e propagação vegetativa do umbuzeiro, as pesquisas envolvendo cultura de tecidos ainda são escassas. Em revisão recente sobre a propagação do umbuzeiro foi relatado que apenas uma pequena parcela dos estudos disponíveis abordou a micropropagação da espécie, evidenciando a necessidade de novos protocolos voltados ao estabelecimento e à multiplicação *in vitro* (Nascimento *et al*., 2026).

No estabelecimento *in vitro*, a concentração salina do meio e o uso de aditivos como carvão ativado podem influenciar a germinação e o desenvolvimento inicial das plântulas. O meio WPM, desenvolvido para espécies lenhosas, tem sido amplamente utilizado em protocolos de cultivo *in vitro*, mas ajustes em sua concentração podem ser necessários conforme a espécie e a fase de desenvolvimento (Gonzales-Alvarado *et al*., 2025; Lloyd; McCown, 1980). Além disso, o carvão ativado pode atuar na adsorção de compostos presentes no meio ou liberados pelos tecidos, reduzindo efeitos inibitórios durante o cultivo *in vitro* (Ebrahimi *et al*., 2024; Thomas, 2008). Problemas como senescência ou necrose apical também podem comprometer a conversão de plântulas normais e a continuidade do cultivo. Esses distúrbios têm sido associados, entre outros fatores, à baixa mobilidade do cálcio, à reduzida transpiração e ao acúmulo de gases como o etileno em ambientes fechados de cultivo *in vitro* (Machado *et al*., 2014; Silva *et al*., 2020; Wdowiak *et al*., 2024).

Na fase de multiplicação, as citocininas, como BAP (6-benzilaminopurina) e KIN (cinetina), são frequentemente utilizadas para estimular a brotação e aumentar a taxa de multiplicação (Pasternak; Steinmacher, 2024). Entretanto, a eficiência desses reguladores depende do tipo de explante, do balanço hormonal endógeno e da competência morfogênica do tecido (Long *et al*., 2022; Shimizu-Sato; Tanaka; Mori, 2009; Yuan *et al*., 2023). Assim, a avaliação conjunta de diferentes condições de estabelecimento e multiplicação é necessária para avançar no estabelecimento de protocolos eficientes para propagação *in vitro* do umbuzeiro.

Com base nisso, este estudo teve como objetivo avaliar fatores associados ao estabelecimento e à multiplicação *in vitro* de umbuzeiro, testando a concentração do meio WPM e o uso de carvão ativado na germinação, o aumento da concentração de $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ no desenvolvimento inicial e na senescência apical, e o efeito do tipo de explante e das citocininas BAP e KIN nas respostas morfogênicas durante a multiplicação *in vitro*.

10.2. Material e Métodos

10.2.1. Coleta e preparo do material vegetal

Frutos maduros de umbuzeiro foram coletados em árvores matrizes localizadas nos municípios de Graccho Cardoso, Nossa Senhora da Glória e Poço Redondo, no estado de Sergipe, Brasil. Após a coleta, os frutos foram despolpados manualmente, e as unidades de dispersão obtidas foram acondicionadas em sacos plásticos tipo zip-lock, sob condições de laboratório, até a instalação dos experimentos.

A extração das sementes do endocarpo foi realizada conforme metodologia proposta por Nascimento *et al*. (2026). Resumidamente, as unidades de dispersão foram seccionadas longitudinalmente com auxílio de cortador de tubos de PVC, realizando-se o corte a poucos milímetros da região central, a fim de evitar danos às estruturas internas da semente. Em

seguida, fragmentos do endocarpo foram removidos cuidadosamente com auxílio de pinça de ponta fina, permitindo a retirada das sementes. A inoculação foi realizada no mesmo dia da extração das sementes do endocarpo.

10.2.2. Desinfestação, preparo do meio de cultura e condições de cultivo

A desinfestação das sementes foi realizada em câmara de fluxo laminar, conforme metodologia descrita por Santos *et al*. (2018), por meio da imersão em etanol 70% por 30 s, seguida de solução de hipoclorito de sódio contendo 1,25% de cloro ativo por 10 min, acrescida de duas gotas de detergente neutro. Ao final, o material vegetal foi enxaguado três vezes em água destilada e autoclavada.

O meio de cultura utilizado foi o WPM (Wood Plant Medium), formulado por Lloyd e McCown (1980), em diferentes concentrações e suplementações, conforme cada experimento. O pH do meio foi ajustado para 5,8 ± 0,1 antes da autoclavagem, realizada a 121 °C e 1,0 atm por 20 min. As culturas foram mantidas em sala de crescimento sob iluminação LED, com intensidade luminosa de 60 μmol m^{-2} s^{-1}, fotoperíodo de 12 h, temperatura de 25 ± 2 °C e umidade relativa de aproximadamente 70%.

10.2.3. Experimento 1 — Efeito da concentração do meio WPM e do carvão ativado na germinação *in vitro*

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial 2 × 2, constituído por duas concentrações do meio WPM, completo e com metade da concentração de sais, e pela presença ou ausência de carvão ativado. Os meios foram suplementados com 30 g L^{-1} de sacarose e solidificados com 4 g L^{-1} de Phytagel. Nos tratamentos com carvão ativado, foi utilizada a concentração de 1 g L^{-1}.

Cada tubo de ensaio (25 × 150 mm) contendo 10 mL de meio de cultura e uma semente inoculada foi considerado uma unidade experimental. Foram utilizadas 199 unidades experimentais, distribuídas em 48 repetições para 1/2 WPM sem carvão, 51 repetições para 1/2 WPM com carvão, 48 repetições para WPM completo sem carvão e 52 repetições para WPM completo com carvão. Aos 30 dias de cultivo, foram avaliadas a germinação, determinada pela emissão da raiz, e a formação de plantas normais, caracterizadas pela emissão de raiz, hipocótilo e parte aérea.

10.2.4. Experimento 2 — Efeito de concentrações de cálcio na germinação e no desenvolvimento inicial *in vitro*

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, com quatro tratamentos correspondentes a diferentes concentrações de $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ no meio de cultura: 96, 440, 880 e 1320 mg L^{-1}. O tratamento com 96 mg L^{-1} de $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ correspondeu ao meio WPM padrão. Os meios foram suplementados com 30 g L^{-1} de sacarose e solidificados com 7 g L^{-1} de ágar.

Cada frasco (20 mL de meio de cultura) contendo cinco sementes foi considerado uma unidade experimental, com 10 repetições por tratamento. Aos 30 dias de cultivo, foram avaliadas a germinação, determinada pela emissão da raiz; a formação de hipocótilo; a formação de plantas normais, caracterizadas pela emissão de raiz, hipocótilo e parte aérea; e a senescência. A germinação, a formação de hipocótilo e a formação de plântulas normais foram avaliadas em relação ao número total de sementes inoculadas por frasco. A senescência foi avaliada apenas entre as plantas normais formadas.

10.2.5. Experimento 3 — Efeito da concentração de BAP e do tipo de explante na multiplicação *in vitro*

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial 2 × 2, constituído por duas concentrações de BAP, 0 e 2 mg L^{-1}, e dois tipos de explantes, segmento apical e segmento nodal cotiledonar. Os explantes foram obtidos de

plântulas germinadas *in vitro*, com idade entre 20 e 40 dias, e padronizados com aproximadamente 2 cm de comprimento. O meio de cultura utilizado foi o WPM, suplementado com 30 g L^{-1} de sacarose, carvão ativado a 1 g L^{-1} e solidificado com 4 g L^{-1} de Phytagel.

Foram avaliados 133 tubos de ensaio (25 × 150 mm com 10 mL de meio de cultura), cada um contendo um único explante, sendo cada tubo considerado uma unidade experimental. O número de unidades experimentais por tratamento variou de 26 a 43, de acordo com a disponibilidade de explantes.

Aos 60 dias de cultivo, foram avaliadas a responsividade, o número de brotos, o número de folhas, a formação de raízes e a sobrevivência. A responsividade foi determinada pela presença de brotação, sendo considerados responsivos os explantes com número de brotos maior ou igual a 1. A formação de raízes e a sobrevivência foram registradas como presença ou ausência da resposta.

10.2.6. Experimento 4 — Efeito de BAP, KIN e sua combinação na multiplicação *in vitro*

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, com seis tratamentos: controle, 2 mg L^{-1} de BAP, 4 mg L^{-1} de BAP, 2 mg L^{-1} de KIN, 4 mg L^{-1} de KIN e 2 mg L^{-1} de BAP + 2 mg L^{-1} de KIN. Foram utilizados explantes (segmentos apicais e cotiledonares) obtidos de plântulas germinadas *in vitro*, com idade entre 20 e 40 dias, padronizados com aproximadamente 2 cm de comprimento. O meio de cultura utilizado foi o WPM, suplementado com 30 g L^{-1} de sacarose, carvão ativado a 1 g L^{-1} e solidificado com 7 g L^{-1} de ágar.

Cada tubo de ensaio (25 × 150 mm com 10 mL de meio de cultura) contendo um explante foi considerado uma unidade experimental. Após a exclusão dos explantes contaminados, foram utilizadas 93 unidades experimentais válidas, distribuídas em 14 repetições no controle, 18 em 2 mg L^{-1} de BAP, 14 em 4 mg L^{-1} de BAP, 15 em 2 mg L^{-1} de KIN, 17 em 4 mg L^{-1} de KIN e 15 em 2 mg L^{-1} de BAP + 2 mg L^{-1} de KIN.

Aos 60 dias de cultivo, foram avaliadas a responsividade, o número de brotos, o número de folhas, a formação de raízes, a formação de xilopódio e a altura da parte aérea. A responsividade foi determinada pela presença de brotação, sendo considerados responsivos os explantes com número de brotos maior ou igual a 1. A formação de raízes e de xilopódio foi registrada como presença ou ausência da característica.

10.2.7. Análises estatísticas

Os dados foram analisados de acordo com o delineamento experimental e a natureza das variáveis avaliadas. Variáveis binárias ou proporcionais (germinação, formação de hipocótilo, formação de plantas normais, responsividade, enraizamento, formação de xilopódio, sobrevivência e senescência) foram analisadas por modelos lineares generalizados com distribuição binomial e função de ligação logit. Para variáveis de contagem, como número de brotos e número de folhas, utilizaram-se modelos lineares generalizados com distribuição Poisson e função de ligação log. A sobredispersão foi avaliada pela razão entre os resíduos de Pearson ao quadrado e os graus de liberdade residuais, quando detectada, foram ajustados modelos quasi-binomial ou quasi-Poisson, conforme a natureza da variável.

Nos experimentos fatoriais (combinação entre tipo de explante e concentração de BAP; concentração do meio WPM e presença ou ausência de carvão ativado), testou-se inicialmente a interação entre os fatores. Quando significativa, as combinações foram comparadas entre si, quando não significativa, consideraram-se apenas os efeitos principais. As comparações entre médias marginais estimadas foram realizadas com ajuste de p pelo método de Holm, adotando-se 5% de significância.

Nos experimentos com apenas um fator (concentrações de $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ e tratamentos com BAP, KIN e sua combinação), as comparações dos tratamentos com o controle foram realizadas por médias marginais estimadas, utilizando-se o teste de Dunnett, a 5% de significância. No experimento com $CaCl_2 \cdot 2H_2O$, germinação, formação de hipocótilo e

formação de plântulas normais foram analisadas como proporções, considerando o número de respostas positivas em relação ao número total de sementes por frasco, por meio da estrutura cbind (sucessos, insucessos). A senescência foi analisada em relação ao número de plântulas normais formadas, considerando apenas as unidades experimentais com pelo menos uma plântula normal. A altura da parte aérea, no experimento com BAP, KIN e sua combinação, foi analisada pelo teste de Kruskal-Wallis seguido do teste de Dunn a 5% de significância.

Quando houve variação no número de unidades experimentais válidas, em razão da disponibilidade de explantes ou da exclusão de materiais contaminados, as análises consideraram o número real de unidades avaliadas por tratamento. Todas as análises estatísticas foram realizadas no ambiente computacional R, versão 4.3.3.

10.3. Resultados e Discussão

10.3.1. Efeito da concentração do meio WPM e do carvão ativado na germinação *in vitro*

A germinação *in vitro* de sementes de umbuzeiro foi influenciada pela interação entre a concentração do meio WPM e a presença de carvão ativado (Figura 1). O menor percentual de germinação foi observado no WPM completo sem carvão ativado, com 12,5%. Os demais tratamentos apresentaram maiores percentuais, variando de 37,3% no 1/2 WPM com carvão, a 52,1% no 1/2 WPM sem carvão e 46,2% no WPM completo com carvão ativado.

A resposta observada mostra que o efeito do carvão ativado dependeu da concentração salina do meio. No WPM completo, a adição de carvão ativado elevou a germinação, tornando a resposta semelhante à observada nos tratamentos com ½ WPM. Esse comportamento pode estar relacionado à capacidade do carvão ativado de adsorver compostos presentes no meio de cultura ou liberados pelo material vegetal, reduzindo possíveis efeitos inibitórios durante o estabelecimento *in vitro* (Pan; Staden, 1998; Thomas, 2008). Resposta positiva ao uso de carvão ativado em meio WPM também foi observada na germinação *in vitro* de *Sideroxylon obtusifolium*, espécie lenhosa nativa da Caatinga, reforçando que esse componente pode favorecer o estabelecimento inicial de sementes em condições *in vitro* (Silva *et al*., 2024).

A formação de plantas normais não foi influenciada significativamente pela concentração do meio WPM, pelo carvão ativado ou pela interação entre os fatores. Os percentuais variaram de 8,3% no WPM completo sem carvão a 23,1% no WPM completo com carvão, sem diferença estatística entre os tratamentos. Assim, germinação e a formação de plantas normais parecem representar etapas distintas do estabelecimento *in vitro* de umbuzeiro, indicando que a maior germinação nem sempre resultou em maior conversão em plantas normais. O baixo número de plantas normais pode ter relação ainda com outros fatores, como o tempo de armazenamento das unidades de dispersão (Santana *et al*., 2025), ou ainda com possíveis danos físicos sofridos pela semente no momento da retirada do endocarpo.

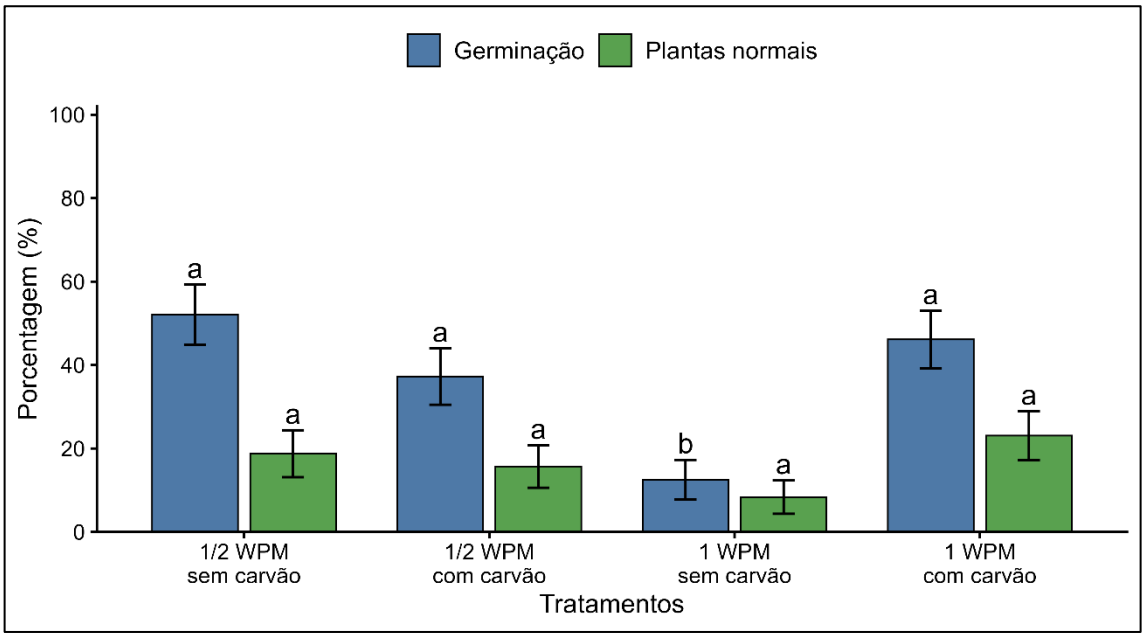


Figura 1. Germinação e formação de plantas normais de umbuzeiro cultivadas *in vitro* em meio WPM completo ou com metade da concentração de sais, na presença ou ausência de carvão ativado. Barras representam porcentagem média ± erro-padrão. Letras iguais indicam ausência de diferença significativa entre os tratamentos dentro de cada variável, pelo modelo linear generalizado binomial a 5% de significância. As comparações foram realizadas separadamente para germinação e plantas normais.

A germinação observada nos tratamentos mais favoráveis também confirma o potencial do cultivo *in vitro* de sementes sem endocarpo como estratégia para superar limitações impostas pela dormência física do umbuzeiro. Estudos anteriores com sementes excisadas já haviam demonstrado que a remoção das barreiras associadas ao endocarpo favorece o estabelecimento *in vitro* da espécie (Santos *et al*., 2018). Assim, o presente estudo amplia essa abordagem ao demonstrar que sementes extraídas do endocarpo podem germinar em meio WPM, com resposta influenciada pela concentração salina do meio e pela presença de carvão ativado (Figura 2).

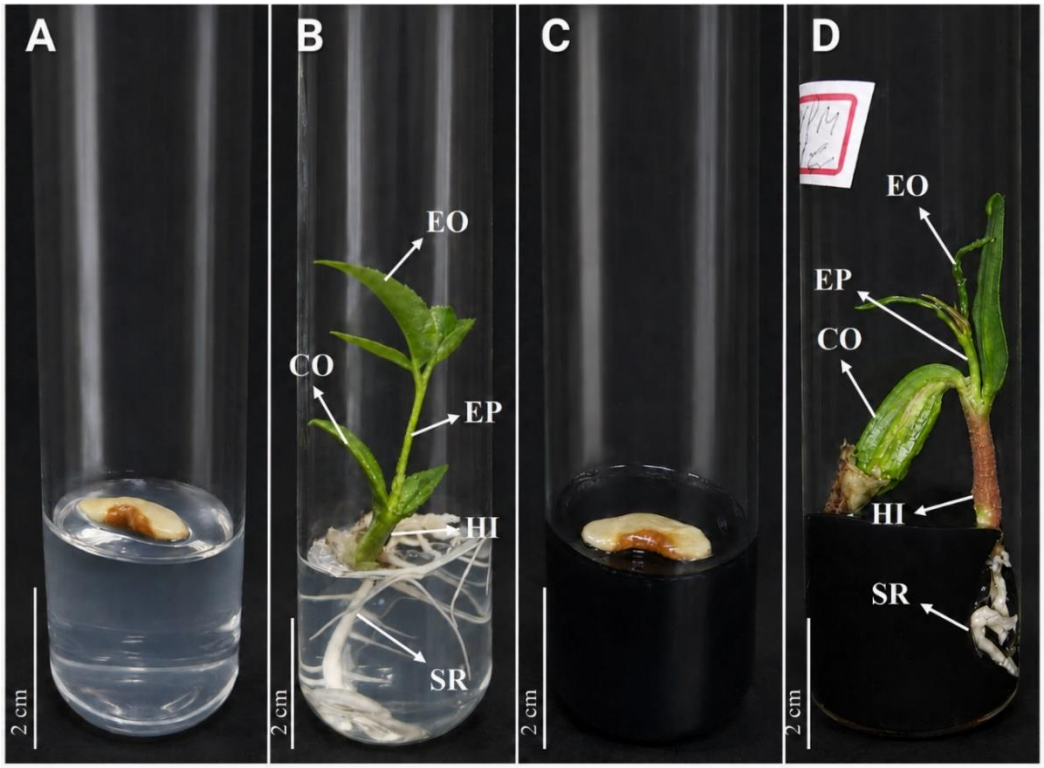


Figura 2. Germinação *in vitro* de sementes de umbuzeiro e desenvolvimento inicial de plântulas em diferentes condições de cultivo.(A) Semente inoculada em meio de cultura sem carvão ativado; (B) plântula desenvolvida em meio sem carvão ativado, com estruturas vegetativas e sistema radicular visíveis; (C) semente inoculada em meio suplementado com carvão ativado; (D) plântula desenvolvida em meio com carvão ativado. EO = eófilo; EP = epicótilo; CO = cotilédone; HI = hipocótilo; SR = sistema radicular. Barras = 2 cm. Fonte: Augusto Nascimento.

10.3.2. Efeito de concentrações de cálcio na germinação e no desenvolvimento inicial *in vitro*

O aumento da concentração de $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ no meio WPM foi avaliado como estratégia para reduzir a senescência apical e favorecer o desenvolvimento inicial de plântulas de umbuzeiro, considerando o papel do cálcio na estabilidade da parede celular e sua baixa mobilidade em condições *in vitro*. As concentrações testadas não diferiram do controle quanto à germinação, formação de hipocótilo, formação de plantas normais e senescência (Tabela 3). A germinação variou de 50,0% no tratamento com 1320 mg L^{-1} a 66,0% no tratamento com 880 mg L^{-1} de $CaCl_2 \cdot 2H_2O$, enquanto a formação de plantas normais variou de 12,0% a 22,0%.

Tabela 1. Germinação, formação de hipocótilo, plantas normais e senescência de umbuzeiro cultivado *in vitro* sob diferentes concentrações de $CaCl_2 \cdot 2H_2O$.

Tratamentos	**Variáveis**			
$CaCl_2 \cdot 2H_2O$ (mg L^{-1})	**G (%)**	**Hipocótilo (%)[1]**	**PN (%)**	**Senescência (%)**
96	56,0±7,0 a	42,0±8,9 a	16,0±5,2 a	75,0±15,3 a
440	56,0±7,0 a	40,0±8,8 a	16,0±5,2 a	50,0±17,7 a
880	66,0±6,7 a	32,0±8,4 a	22,0±5,9 a	63,6±14,5 a
1320	50,0±7,1 a	18,0±6,9 a	12,0±4,6 a	83,3±15,2 a

Valores apresentados como média ± erro-padrão. G = germinação, determinada pela emissão de raiz; PN = plantas normais, caracterizadas pela emissão de raiz, hipocótilo e parte aérea. Germinação, formação de hipocótilo e plantas normais foram calculadas em relação ao número total de sementes inoculadas por frasco. A senescência foi calculada em relação ao número de

plantas normais formadas. Letras iguais na coluna não diferem entre si pelo teste de Dunnett em relação ao controle, a 5% de significância.

Inicialmente, esperava-se que o incremento de cálcio pudesse reduzir a senescência apical, uma vez que esse nutriente participa da manutenção da integridade da parede celular e das membranas, além de atuar em processos de sinalização celular (Wdowiak; Podgórska; Szal, 2024). No entanto, a ausência de redução da senescência sugere que o problema não foi resolvido apenas pelo aumento da concentração de $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ no meio (Figura 4).

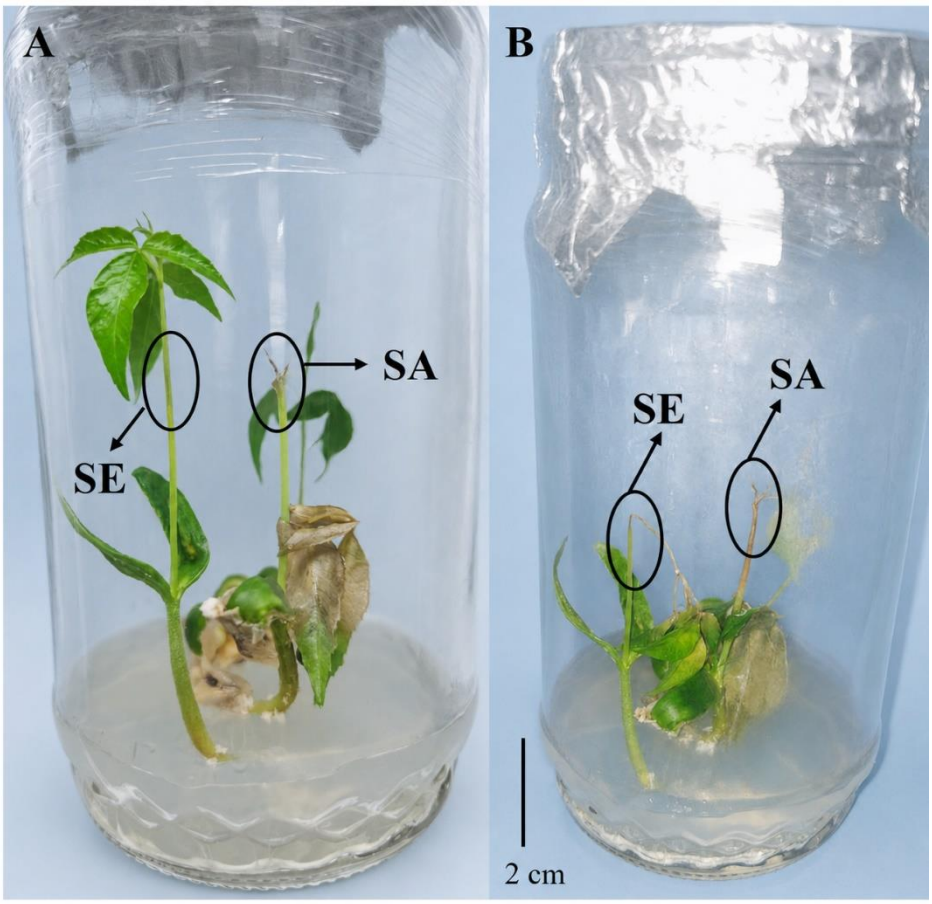


Figura 3. Senescência em plântulas de umbuzeiro cultivadas *in vitro*. (A) Plântulas com indicação de senescência no epicótilo (SE) e no segmento apical (SA); (B) Plântulas com senescência avançada e tombamento. Barra = 2 cm. Fonte: Augusto Nascimento.

Em condições *in vitro*, a elevada umidade relativa e a baixa transpiração nos frascos podem limitar o transporte de Ca^{2+} para tecidos jovens, favorecendo sintomas de deficiência localizada, como a necrose ou senescência apical (Machado *et al*., 2014; Silva *et al*., 2020). Além disso, o acúmulo de etileno no interior dos frascos pode contribuir para alterações no desenvolvimento, senescência e morte de tecidos cultivados *in vitro*, especialmente em sistemas com baixa troca gasosa (Gautam *et al*., 2024; Pasternak; Steinmacher, 2024). Dessa forma, a senescência observada em umbuzeiro pode estar relacionada não apenas à concentração de cálcio no meio, mas também à sua distribuição interna nas plântulas e às condições físicas do cultivo, incluindo baixa transpiração e acúmulo de etileno no microambiente *in vitro*.

Adicionalmente, observou-se de forma pontual a formação de uma estrutura semelhante à inflorescência em uma plântula cultivada no tratamento com 880 mg L^{-1} de $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ (Figura 5). Como esse evento ocorreu em apenas uma unidade experimental, não foi considerado variável de resposta nem submetido à análise estatística. No entanto, essa ocorrência sugere que as condições *in vitro* podem alterar o padrão normal de desenvolvimento das plântulas de umbuzeiro. A floração *in vitro* é uma resposta morfogênica complexa,

influenciada por fatores como composição do meio, reguladores de crescimento, estado fisiológico do explante e condições ambientais de cultivo (Peeters; Gardiner; Proveniers, 2026). Assim, estudos futuros poderiam investigar se essa resposta ocorre de forma recorrente ou se representa apenas uma alteração morfológica isolada.

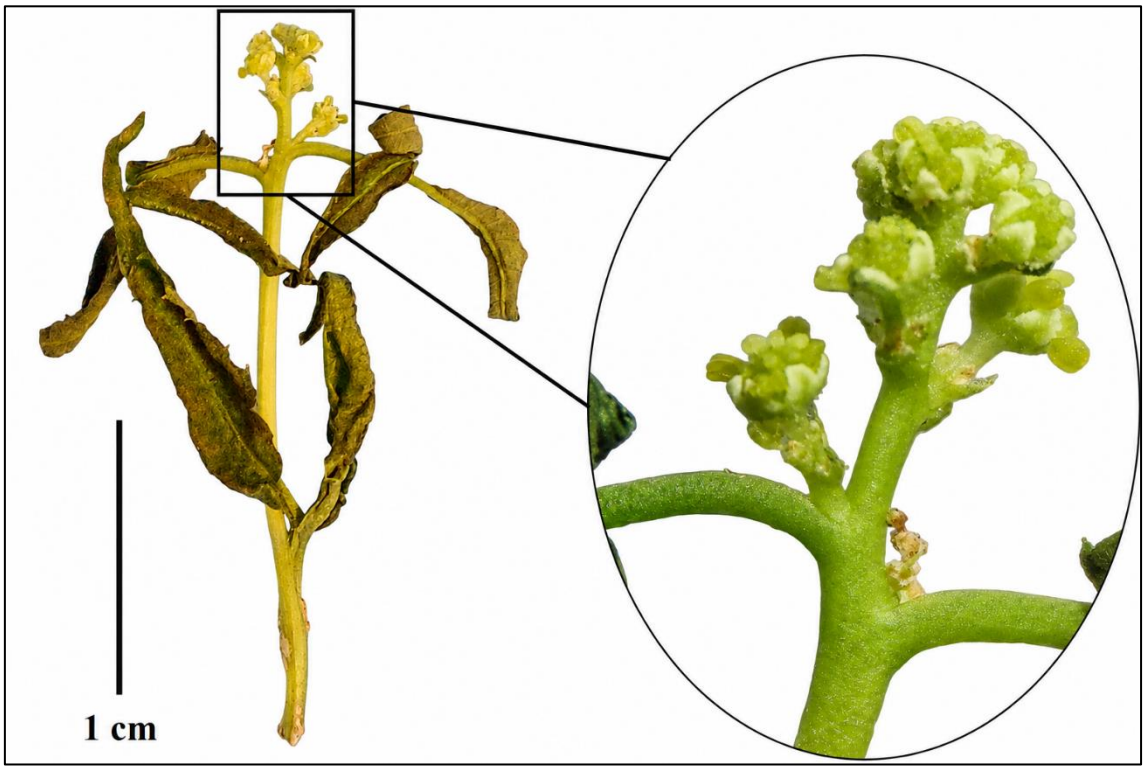


Figura 4. Plântula de umbuzeiro cultivada *in vitro* apresentando a formação de estrutura semelhante à inflorescência no tratamento contendo 880 mg L^{-1} de $CaCl_2 \cdot 2H_2O$. A região delimitada indica a porção apical, e a ampliação mostra a estrutura em detalhe. Barra = 1 cm. Fonte: Augusto Nascimento.

10.3.3. Efeito da concentração de BAP e do tipo de explante na multiplicação *in vitro*

A responsividade dos explantes foi influenciada pela interação entre a concentração de BAP e o tipo de explante (Figura 7). Na ausência de BAP, os segmentos nodais cotiledonares apresentaram maior responsividade que os segmentos apicais, com 95,3% e 65,3%, respectivamente. Na presença de 2 mg L^{-1} de BAP, não houve diferença entre os tipos de explante. Esse resultado indica que a resposta inicial de umbuzeiro depende da combinação entre o regulador de crescimento e a origem do explante (Figura 6).

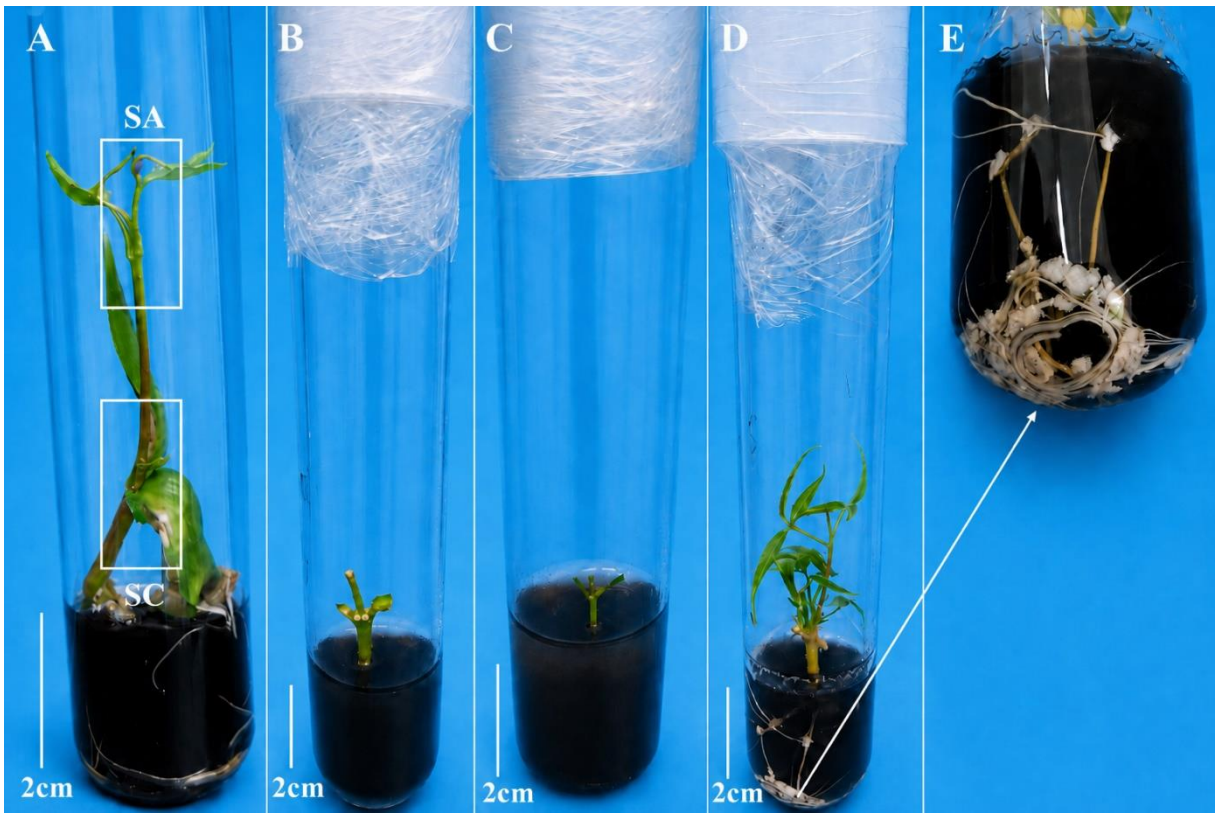


Figura 5. Estabelecimento e desenvolvimento *in vitro* de explantes de umbuzeiro em meio de cultura. (A) Plântula utilizada como fonte de explantes, com destaque para o segmento apical (SA) e o segmento cotiledonar (SC). (B–C) Explantes cotiledonar e apical, respectivamente. (D) Desenvolvimento de brotações em segmento cotiledonar. (E) Formação de raízes e possivelmente de xilopódios associadas à base dos explantes. Barras = 2 cm. Fonte: Augusto Nascimento.
Figura 5.

Para o número de brotos, número de folhas e formação de raízes, não houve interação significativa entre BAP e tipo de explante, nem efeito isolado da concentração de BAP (Figura 7). Entretanto, essas variáveis foram influenciadas pelo tipo de explante, com superioridade dos segmentos nodais cotiledonares. O número médio de brotos variou de 1,00 a 1,18 nos segmentos apicais e de 1,94 a 2,08 nos segmentos nodais cotiledonares. O número de folhas variou de 1,71 nos segmentos apicais a 2,58 nos nodais cotiledonares, enquanto o enraizamento variou de 22,7% a 28,5% nos apicais e de 44,1% a 50,0% nos nodais cotiledonares (Figura 3).

A sobrevivência dos explantes não apresentou interação significativa entre BAP e tipo de explante, mas foi influenciada pela concentração de BAP. Os tratamentos contendo 2 mg L^{-1} de BAP apresentaram maiores percentuais de sobrevivência, variando de 83,3% a 84,2%, enquanto os tratamentos sem BAP apresentaram valores entre 55,5% e 73,0% (Figura 7). Assim, embora o BAP não tenha promovido aumento significativo no número de brotos, folhas ou raízes, sua presença no meio de cultura favoreceu a manutenção da viabilidade dos explantes.

A maior resposta dos segmentos nodais cotiledonares está de acordo com resultados relatados para outras espécies arbóreas. Em *Myracrodruon urundeuva*, espécie da família Anacardiaceae e nativa da Caatinga, assim como o umbuzeiro, segmentos cotiledonares apresentaram maior número de brotos em comparação aos apicais, sendo indicados como uma região mais responsiva para a regeneração de brotações (Silva *et al*., 2021; Nascimento *et al*., 2020). Resultados semelhantes foram observados em *Cariniana legalis*, na qual segmentos nodais cotiledonares proporcionaram maior número e comprimento de brotos, além de maior enraizamento em comparação aos segmentos apicais (Aragão *et al*., 2017). Em *Cedrela fissilis*, a resposta organogênica também variou conforme o tipo de explante e a presença de BA, com

alterações associadas ao desenvolvimento de brotos, ao metabolismo de carboidratos e ao conteúdo de poliaminas (Aragão *et al*., 2016).

A melhor resposta dos segmentos nodais cotiledonares provavelmente está associada à origem anatômica do explante e à presença de regiões nodais com maior capacidade de retomada do crescimento, uma vez que a regeneração *in vitro* depende da presença de células competentes e da regulação hormonal endógena (Pasternak; Steinmacher, 2024). Além disso, ajustes metabólicos específicos do tecido, envolvendo compostos relacionados ao crescimento, como carboidratos e poliaminas, podem participar da resposta organogênica (Aragão *et al*., 2016; Larriba *et al*., 2021). A relação entre tecidos cotiledonares, hipocótilo e metabolismo de auxina também sugere que diferenças na origem do explante podem influenciar a capacidade de regeneração e crescimento *in vitro* (Zheng *et al*., 2016).

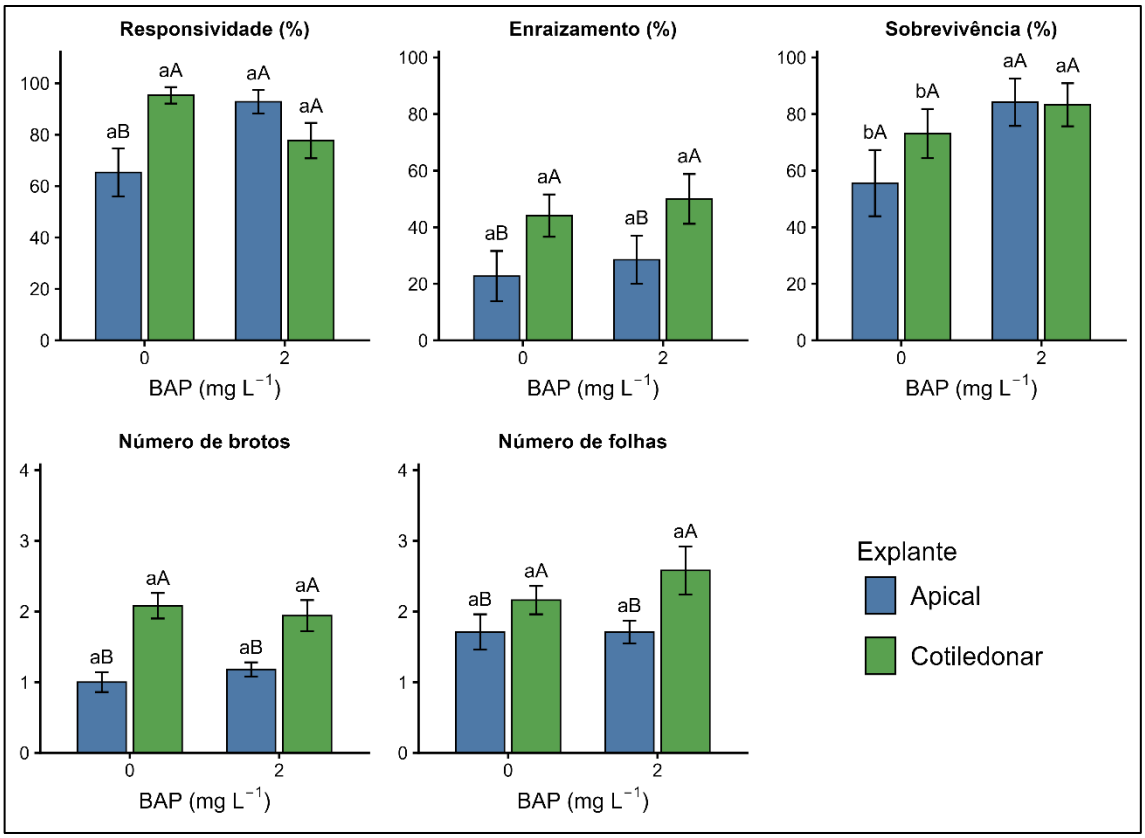


Figura 6. Respostas morfogênicas de explantes apicais e nodais cotiledonares de umbuzeiro cultivados *in vitro* em meio WPM suplementado com 0 ou 2 mg L^{-1} de BAP. Barras representam média ± erro-padrão. Letras minúsculas comparam concentrações de BAP, e letras maiúsculas comparam tipos de explante. Letras iguais não diferem entre si com base em médias marginais estimadas e ajuste de p pelo método de Holm, a 5% de significância.

10.3.4. Efeito de BAP, KIN e sua combinação na multiplicação *in vitro*

Os tratamentos com BAP, KIN e sua combinação não influenciaram significativamente a responsividade, a formação de raízes, a formação de xilopódio, o número de brotos e a altura da parte aérea dos explantes de umbuzeiro (Tabela 2). A responsividade variou de 71,4% no tratamento com 4 mg L^{-1} de BAP a 94,1% no tratamento com 4 mg L^{-1} de KIN, sem diferença estatística entre os tratamentos. A formação de raízes variou de 27,8% em 2 mg L^{-1} de BAP a 60,0% na combinação de 2 mg L^{-1} de BAP + 2 mg L^{-1} de KIN, enquanto a formação de xilopódio variou de 14,3% no controle a 40,0% em 2 mg L^{-1} de KIN, também sem diferença significativa.

O número de brotos apresentou pouca variação entre os tratamentos, com médias entre 1,00 e 1,27 brotos por explante. O número de folhas foi a única variável influenciada pelos reguladores de crescimento, sendo maior na combinação de 2 mg L^{-1} de BAP + 2 mg L^{-1} de

KIN, com média de 4,07 folhas por explante, diferindo do controle, que apresentou 1,64 folha por explante. Os demais tratamentos apresentaram valores intermediários. A altura da parte aérea variou de 1,24 cm no controle a 2,24 cm na combinação de 2 mg L^{-1} de BAP + 2 mg L^{-1} de KIN, sem diferença significativa.

A ausência de incremento no número de brotos indica que, nas concentrações avaliadas, BAP e KIN não foram eficientes para aumentar a taxa de multiplicação de umbuzeiro. Apesar da elevada responsividade, os explantes desenvolveram, em média, uma única brotação, sugerindo que a resposta ocorreu principalmente pela ativação ou alongamento de gemas preexistentes, e não pela indução de múltiplas brotações. Esse comportamento também foi observado em estudo pioneiro com segmentos nodais de umbuzeiro, no qual a maior brotação ocorreu em baixa concentração de BAP, enquanto concentrações mais elevadas reduziram a brotação e o crescimento dos explantes (Melo; Fári; Teixeira, 1997). Resposta semelhante foi relatada em *Myracrodruon urundeuva*, espécie lenhosa da família Anacardiaceae, na qual segmentos nodais e apicais apresentaram desenvolvimento predominante de um único broto durante a multiplicação (Nascimento *et al*., 2020; Silva *et al*., 2021).

A ocorrência de brotação mesmo na ausência de reguladores de crescimento indica que os explantes apresentavam competência morfogênica própria. Essa resposta pode estar relacionada ao balanço hormonal endógeno, especialmente à presença de citocininas endógenas capazes de promover a ativação de gemas axilares. As citocininas atuam na superação da dominância apical e estimulam a brotação, enquanto a auxina produzida no ápice tende a inibir o crescimento de gemas laterais (Shimizu-Sato; Tanaka; Mori, 2009; Tan *et al*., 2019; Yuan *et al*., 2023).

Tabela 2. Efeito de diferentes citocininas e concentrações na multiplicação *in vitro* de umbuzeiro.

Tratamentos	**Variáveis**					
	Resp. (%)	**NB**	**NF**	**AP (cm)**	**Raiz (%)**	**Xilo. (%)**
Controle	78,6±11,0a	1,0±0,27a	1,6±0,4b	1,24±0,07a	35,7±12,8a	14,3±9,4a
2BAP	72,2±10,6a	1,1±0,26a	2,9±0,50ab	2,13±0,48a	27,8±10,6a	16,7±8,8
4BAP	71,4±12,1a	1,1±0,29a	3,3±0,60ab	1,74±0,30a	50±13,4a	35,7±12,8a
2KIN	86,7±8,8a	1,2±0,29a	3,4±0,59ab	1,59±0,17a	40±12,6a	40±12,7a
4KIN	94,1±5,7a	1,1±0,26a	3,1±0,53ab	1,55±0,18a	29,4±11,1a	17,6±9,3a
2BAP+2KIM	93,3±6,4a	1,2±0,28a	4,0±0,64a*	2,24±0,38a	60±12,6a	33,3±12,2a

Valores apresentados como média ± erro-padrão. BAP = 6-benzilaminopurina; KIN = cinetina; NB = número de brotos; NF = número de folhas; AP = altura da parte aérea; Xilo. = formação de xilopódio. Responsividade, raiz e xilopódio foram expressos em porcentagem. Asterisco indica diferença significativa em relação ao controle pelo teste de Dunnett, a 5% de significância. Para as variáveis binárias, foram utilizados modelos lineares generalizados binomiais; para NB e NF, modelos Poisson ou quasi-Poisson; e para AP, teste de Kruskal-Wallis.

10.4. Conclusão

A germinação *in vitro* de sementes de umbuzeiro foi influenciada pela concentração do meio WPM e pela presença de carvão ativado, com menor resposta no WPM completo sem carvão. O aumento da concentração de $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ não reduziu a senescência apical nem favoreceu a formação de plantas normais, indicando que esse problema não foi resolvido apenas pela maior disponibilidade de cálcio no meio.

Na fase de multiplicação, os segmentos nodais cotiledonares apresentaram maior competência morfogênica que os explantes apicais, especialmente para emissão de brotos,

folhas e raízes. A adição de BAP e KIN, isoladamente ou em combinação, não aumentou o número de brotos, embora a combinação de 2 mg L^{-1} de BAP + 2 mg L^{-1} de KIN tenha favorecido a emissão de folhas.

Assim, os resultados indicam avanços no estabelecimento *in vitro* de umbuzeiro, mas mostram a necessidade de novas pesquisas para aumentar a multiplicação e reduzir a senescência apical.

10.5. Referências Bibliográficas

ARAGÃO, V. P. M.; NAVARRO, B. V.; SILVA, A. T.; SILVEIRA, V.; SANTA-CATARINA, C. Micropropagation of *Cariniana legalis* (Martius) O. Kuntze, an endangered hardwood tree from the Brazilian Atlantic Forest. **Plant Cell Culture & Micropropagation**, v. 13, n. 2, p. 41–50, 2017.

ARAGÃO, V. P. M.; RIBEIRO, Y. R. de S.; REIS, R. S.; MACEDO, A. F.; FLOH, E. I. S.; SILVEIRA, V.; SANTA-CATARINA, C. *In vitro* organogenesis of *Cedrela fissilis* Vell. (Meliaceae): the involvement of endogenous polyamines and carbohydrates on shoot development. **Plant Cell, Tissue and Organ Culture**, v. 124, n. 3, p. 611–620, 2016.

CASTRO-CAMBA, R.; VIELBA, J. M.; COVELO, P.; VIDAL, N.; SÁNCHEZ, C. Reducing costs, improving profits: a low-cost culture media for woody plants micropropagation. **Journal of Forest Science**, v. 69, n. 9, p. 377–388, 2023.

EBRAHIMI, T.; PIRI, K.; ABDOLI, A.; TOHIDFAR, M. Effect of activated charcoal on *in vitro* propagation of *Lythrum salicaria* L. (Lythraceae). **Journal of Medicinal Plants and By-products**, v. 13, n. 2, p. 293–302, 2024.

FREITAS, J. S. de; NOVO, A. de A.; KUNIGAMI, C. N.; MOREIRA, D. de L.; FREITAS, S. P.; MATTA, V. M. da; JUNG, E. P.; RIBEIRO, L. de O. *Spondias tuberosa* and *Spondias mombin*: nutritional composition, bioactive compounds, biological activity and technological applications. **Resources**, v. 13, n. 5, art. 68, 2024.

GAMA, D. C.; DEUS, D. A. de; OLIVEIRA, F. F. de; CASTRO, M. S. de; SOUZA, M. O. de; NASCIMENTO, J. S. do. Umbu tree (*Spondias tuberosa* Arr. Cam. – Anacardiaceae): from extractive to planted culture in Brazil. **Scientia Agraria**, v. 20, n. 2, p. 1–10, 2024.

GAUTAM, N.; FARODA, P.; AGARWAL, T.; HARISH; GUPTA, A. K. Effect of microclimatic physical factors on *in vitro* morphogenesis of plants: a systematic review. **Discover Agriculture**, v. 2, art. 13, 2024.

GOMES, W. A.; MENDONÇA, R. M. N.; SOUZA, E. P.; ESTRELA, M. A.; MELO, V. E. S.; SILVA, S. M.; SOUZA, A. P. Garfagem e diâmetro de porta-enxerto na obtenção de mudas de umbuzeiro do acesso Laranja. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 32, n. 3, p. 952–959, 2010.

GONZALES-ALVARADO, A. C.; HILARIO-ROMÁN, N.; REVILLA-CHÁVEZ, J. M.; CCOPE, C. R. S.; MORI-VÁSQUEZ, J. A. Woody Plant Medium optimizes *in vitro* germination and development of *Calycophyllum spruceanum*. **Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín**, v. 78, n. 3, p. 11353–11363, 2025.

GRZELAK, M.; PACHOLCZAK, A.; NOWAKOWSKA, K. Challenges and insights in the acclimatization step of micropropagated woody plants. **Plant Cell, Tissue and Organ Culture**, v. 159, art. 72, 2024.

LARRIBA, E.; SÁNCHEZ-GARCÍA, A. B.; MARTÍNEZ-ANDÚJAR, C.; ALBACETE, A.; PÉREZ-PÉREZ, J. M. Tissue-specific metabolic reprogramming during wound-induced organ formation in tomato hypocotyl explants. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 22, n. 18, art. 10112, 2021.

LLOYD, G.; MCCOWN, B. Commercially feasible micropropagation of mountain laurel, *Kalmia latifolia*, by use of shoot-tip culture. **Combined Proceedings of the International Plant Propagators' Society**, v. 30, p. 421–427, 1980.

LONG, Y.; YANG, Y.; PAN, G.; SHEN, Y. New insights into tissue culture plant-regeneration mechanisms. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, art. 926752, 2022.

LOPES, P. S. N.; MAGALHÃES, H. M.; GOMES, J. G.; BRANDÃO JÚNIOR, D. da S.; ARAÚJO, V. D. de. Superação da dormência de sementes de umbuzeiro (*Spondias tuberosa* Arr. Câm.) utilizando diferentes métodos. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 31, n. 3, p. 872–880, 2009.

MACHADO, M. P.; SILVA, A. L. L. da; BIASI, L. A.; DESCHAMPS, C.; BESPALHOK FILHO, J. C.; ZANETTE, F. Influence of calcium content of tissue on hyperhydricity and shoot-tip necrosis of *in vitro* regenerated shoots of *Lavandula angustifolia* Mill. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 57, n. 5, p. 636–643, 2014.

MATOS, F. S.; FREITAS, I. A. S.; PEREIRA, V. L. G.; PIRES, W. K. L. Effect of gibberellin on growth and development of *Spondias tuberosa* seedlings. **Revista Caatinga**, v. 33, n. 4, p. 1124–1130, 2020.

MELO, N.; FÁRI, M.; TEIXEIRA, J. *In vitro* cultivation of nodal segments of the umbu tree [*Spondias tuberosa* (Arr.) Cam.]. **Acta Horticulturae**, n. 447, p. 535–538, 1997.

MERTENS, J.; ALMEIDA-CORTEZ, J. S. de; GERMER, J.; SAUERBORN, J. Umbuzeiro (*Spondias tuberosa*): a systematic review. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, n. 36, p. 179–197, 2015.

MERTENS, J.; GERMER, J.; SIQUEIRA FILHO, J. A.; SAUERBORN, J. *Spondias tuberosa* Arruda (Anacardiaceae), a threatened tree of the Brazilian Caatinga? **Brazilian Journal of Biology**, v. 77, n. 3, p. 542–552, 2017.

NASCIMENTO, A. V. de S.; MENDONÇA, A. M. das C.; SILVA JÚNIOR, C. D.; SANTANA, M. C.; SANTOS, P. A. A. *In vitro* germination and micropropagation of *Myracrodruon urundeuva* Allemão (Anacardiaceae). **Plant Cell Culture & Micropropagation**, v. 16, art. e156, p. 1–7, 2020.

NASCIMENTO, A. V. de S.; SANTOS, P. A. A.; MUNIZ, A. V. C. da S.; LÉDO, A. da S. The propagation of umbuzeiro (*Spondias tuberosa* Arruda), a native fruit tree of growing importance for the Brazilian semi-arid region. **Forests, Trees and Livelihoods**, v. 35, n. 3, p. 1–25, 2026.

PAN, M. J.; VAN STADEN, J. The use of charcoal in *in vitro* culture: a review. **Plant Growth Regulation**, v. 26, p. 155–163, 1998.

PASTERNAK, T. P.; STEINMACHER, D. Plant growth regulation in cell and tissue culture *in vitro*. **Plants**, v. 13, n. 2, art. 327, 2024.

PEETERS, N. R.; GARDINER, J.; PROVENIERS, M. Integrating meristem initiation and floral fate control: toward de novo flower organogenesis *in vitro*. **Frontiers in Plant Science**, v. 17, art. 1739266, 2026.

REIS, R. V. dos; FONSECA, N.; LÉDO, C. A. da S.; GONÇALVES, L. S. A.; PARTELLI, F. L.; SILVA, M. G. de M.; SANTOS, E. A. Estádios de desenvolvimento de mudas de umbuzeiros propagadas por enxertia. **Ciência Rural**, v. 40, n. 4, p. 787–792, 2010.

ROCHA, G. T.; SILVA, A. G. da; MARTINS, J. B.; PEIXOTO, N.; RODRIGUES, F. Vegetative propagation of *Spondias tuberosa* and *Spondias dulcis* with the use of immersion in indole acetic acid. **Revista Caatinga**, v. 32, n. 4, p. 858–866, 2019.

RODRIGUES, N. L.; SOUZA, A. L. da C.; OLIVEIRA, C. C. de; CARVALHO, M. G. de; LIMA, B. R. de; AKUTSU, R. de C. C. de A.; LANA, V. S. de; RAPOSO, A.; SARAIVA, A.; HAN, H.; CARVALHO, I. M. M. de. Nutritional and biological attributes of *Spondias tuberosa* (Umbu) fruit: an integrative review with a systematic approach. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 130, art. 106196, 2024.

SALES, R. P. de; NEVES, A. G. da S.; PINHEIRO, L. G.; FAJARDO, C. G.; AZEVEDO, T. K. B. de; VIEIRA, F. de A. Fruit exploitation and climate suitability for *Spondias tuberosa*: implications for management and conservation. **Cerne**, v. 31, art. e103465, 2025.

SANTANA, N. A.; NUNES, V. V.; SILVA, M. S. O. da; SILVA-MANN, R. Phenotypic selection for improvement of *Spondias tuberosa* trees in on-farm biodiversity conservation. **Genetic Resources and Crop Evolution**, v. 72, n. 3, p. 3603–3620, 2025.

SANTOS, P. A. A.; DIAS, G. S.; MENDONÇA, A. M. C.; SILVA JÚNIOR, C. D.; SILVA, L. C.; SANTANA, M. C. Embryo rescue of *Spondias tuberosa* and exogenous application of gibberellic acid. **Acta Horticulturae**, v. 1224, p. 39–44, 2018.

SHIMIZU-SATO, S.; TANAKA, M.; MORI, H. Auxin-cytokinin interactions in the control of shoot branching. **Plant Molecular Biology**, v. 69, n. 4, p. 429–435, 2009.

SILVA, E. C.; NOGUEIRA, R. J. M. C.; VALE, F. H. A.; MELO, N. F. de; ARAÚJO, F. P. de. Water relations and organic solutes production in four umbu tree (*Spondias tuberosa*) genotypes under intermittent drought. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 21, n. 1, p. 43–53, 2009.

SILVA, I. T. da; LIMA, A. P. P. S.; SANTANA, J. R. F. de. *In vitro* establishment of *Sideroxylon obtusifolium* (Roem. & Schult.) T. D. Penn. **Revista Caatinga**, v. 37, art. e11850, 2024.

SILVA, J. A. T. da; NEZAMI-ALANAGH, E.; BARREAL, M. E.; KHER, M. M.; WICAKSONO, A.; GULYÁS, A.; HIDVÉGI, N.; MAGYAR-TÁBORI, K.; MENDLER-DRIENYOVSZKI, N.; MÁRTON, L.; LANDÍN, M.; GALLEGO, P. P.; DRIVER, J. A.;

DOBRÁNSZKI, J. Shoot tip necrosis of *in vitro* plant cultures: a reappraisal of possible causes and solutions. **Planta**, v. 252, art. 47, 2020.

SILVA, T. S.; CARVALHO FILHO, R. S. L.; FONSECA, P. T.; SANTANA, J. R. F. de. *In vitro* shoot regeneration in *Myracrodruon urundeuva* Fr. All. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 51, art. e69269, 2021.

SOUZA, F. X. de. *Spondias* rootstock in the formation of seedlings of the yellow mombin. **Revista Ciência Agronômica**, v. 50, n. 4, p. 635–639, 2019.

TAN, M.; LI, G.; CHEN, X.; XING, L.; MA, J.; ZHANG, D.; GE, H. J.; HAN, M.; SHA, G.; AN, N. Role of cytokinin, strigolactone, and auxin export on outgrowth of axillary buds in apple. **Frontiers in Plant Science**, v. 10, art. 616, 2019.

THOMAS, T. D. The role of activated charcoal in plant tissue culture. **Biotechnology Advances**, v. 26, n. 6, p. 618–631, 2008.

WDOWIAK, A.; PODGÓRSKA, A.; SZAL, B. Calcium in plants: an important element of cell physiology and structure, signaling, and stress responses. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 46, art. 108, 2024.

YUAN, Y.; KHOURCHI, S.; LI, S.; DU, Y.; DELAPLACE, P. Unlocking the multifaceted mechanisms of bud outgrowth: advances in understanding shoot branching. **Plants**, v. 12, n. 20, art. 3628, 2023.

ZHENG, Z.; GUO, Y.; NOVÁK, O.; CHEN, W.; LJUNG, K.; NOEL, J. P.; CHORY, J. Local auxin metabolism regulates environment-induced hypocotyl elongation. **Nature Plants**, v. 2, art. 16025, 2016.

11. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho reuniu diferentes abordagens relacionadas à propagação, produção de mudas, cultivo *in vitro* e aproveitamento de resíduos de meios de cultura para o umbuzeiro (*Spondias tuberosa* Arruda), espécie nativa da Caatinga e de grande importância ecológica, socioeconômica e cultural para o semiárido brasileiro. Os resultados mostram que a produção de mudas da espécie depende de diferentes fatores, como a escolha das matrizes, as condições de germinação e emergência, o manejo nutricional e o uso de estratégias biotecnológicas adequadas.

A revisão sobre a propagação do umbuzeiro mostrou que, apesar dos avanços existentes, ainda há limitações para a produção de mudas em larga escala. A germinação lenta e desuniforme e a necessidade de protocolos mais eficientes de propagação vegetativa e micropropagação continuam sendo pontos importantes para o avanço da propagação da espécie.

A avaliação das unidades de dispersão, da emergência e do crescimento inicial demonstrou grande variação entre árvores matrizes. As características biométricas variaram entre as matrizes avaliadas, mas não explicaram isoladamente o desempenho das mudas, indicando que a seleção de matrizes deve considerar, em conjunto, atributos físicos, fisiológicos e de crescimento inicial.

No cultivo inicial das mudas, o uso de fertilizante de liberação controlada e a condição de luminosidade influenciaram o crescimento e a qualidade das plantas. Doses intermediárias favoreceram o desenvolvimento das mudas e a formação do xilopódio, enquanto doses mais elevadas não resultaram em ganhos proporcionais, podendo reduzir o crescimento das mudas.

A reutilização de resíduos de meios de cultura apresentou potencial para favorecer o crescimento inicial das mudas, especialmente quando aplicados em frequências menores de aplicação. Essa prática pode contribuir para o aproveitamento de resíduos de meio de cultura e para a adoção de estratégias mais sustentáveis na produção de mudas.

No cultivo *in vitro*, a remoção do endocarpo mostrou-se uma etapa determinante para o estabelecimento das sementes. As unidades de dispersão intactas apresentaram limitações à germinação e maior ocorrência de contaminação, enquanto as sementes sem endocarpo apresentaram melhor desempenho, com respostas variáveis conforme a matriz e o meio de cultura utilizado. O estudo de micropropagação permitiu avançar na compreensão das respostas do umbuzeiro *in vitro*. Os resultados indicaram que o estabelecimento e o desenvolvimento dos explantes são influenciados pelo tipo de material vegetal, pela composição do meio de cultura e pelas condições nutricionais adotadas. As respostas observadas reforçam a necessidade de ajustes no protocolo, especialmente para reduzir limitações associadas à senescência apical, ao desenvolvimento dos brotos e favorecer a obtenção de plantas mais uniformes.

De forma geral, a tese contribui para o avanço das estratégias de propagação do umbuzeiro ao integrar ferramentas biotecnológicas e práticas silviculturais aplicadas à produção de mudas. A remoção do endocarpo, o cultivo *in vitro*, o manejo nutricional, a seleção de matrizes e o aproveitamento de resíduos de meios de cultura representam etapas complementares para tornar a propagação e a produção de mudas mais eficientes, sustentáveis e adequadas às características da espécie. Esses resultados fornecem subsídios para ações de conservação, domesticação e uso sustentável do umbuzeiro no semiárido brasileiro.